



PD 14747



003098303

COBISS

Univerzitet u Beogradu  
Građevinski fakultet - Beograd

Dragan B. Arzenović

OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJE  
BETONSKIH RADOVA  
NA NISKIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

«Doktorska disertacija»

Beograd  
1993





92 1993

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET - BEOGRAD

DRAGAN B. ARIZANOVIĆ

OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJE  
BETONSKIH RADOVA  
NA NISKIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

BEOGRAD, 1993. god.

УНИВЕРЗИТЕТСКА БИБЛИОТЕКА  
„СВ. СВЕТОСЛАВ И МАРКОВИЌ“ ГРАД  
П. И. Бр. 98303





Disertacija je rađena na Građevinskom fakultetu u Beogradu pod rukovodstvom :

prof. dr **Živojina Prašćevića**, dipl.građ.inž.

prof. dr **Srdana Venečanina**, dipl.građ.inž.



# OPTIMIZACIJA TEHNOLOGIJE BETONSKIH RADOVA NA NISKIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

(doktorska disertacija)

## Apstrakt:

Brzi razvoj proizvodnih procesa u građevinarstvu vodi ka sve većoj industrijalizaciji ali se betonski radovi u najvećoj meri još uvek izvode pod uticajem surovih klimatskih uticaja. Za betoniranje pod posebnim ambijentalnim uslovima izvodači radova koriste različite metode rada. Kako je izbor tehnologije strateška odluka do koje se mora doći u trenutku kada o klimatskom režimu postoje samo procene a ne postoji ni jedinstven stav Izvodača o prioritetnim zahtevima koje nova tehnologija mora zadovoljiti, to selekcija alternativnih metoda rada i njihovo rangiranje predstavljaju vrlo složen problem višekriterijumske optimizacije. Iako između metoda za betoniranje u zimskim ili letnjim mesecima postoje suštinske razlike nesumnjiv je i značajan stepen sličnosti pa je to dopustilo isti metodološki pristup problemu. Polazeći od potrebe da nam savremena tehnologija zadovoljava niz zahteva formiran je skup kriterija najrazličitijih priroda (tehničke, tehnološke, mehaničke, ekološke, sociološke) na koje je projektovan set metoda rada. Stepem zadovoljenja određenih kriterija je meren primenom skala ocena a samim kriterijima su pod određenim uslovima pridruženi ponderi koji odražavaju specifičnu i za odluku neophodnu strukturu preference donosioca odluke. Osnova numeričkog postupka selekcije i rangiranja alternativnih metoda je metoda ELECTRE koja je modifikovana za potrebe grupnog odlučivanja a ostavljena je mogućnost selektivnog isključivanja kako kriterija tako i metoda da bi se testirao njihov uticaj na rang selektiranih metoda. Postupak je prilagođen formiranju savetodavnog sistema za donošenje odluka i dopušta analizu kako za razne klimatske uslove tako i razne konstruktivne sisteme a otvoren je za uvođenje novih kriterija i formiranje preciznijih skala za ocenu tehnologija rada.

Ključne reči: Beton, Zimsko betoniranje, Letnje betoniranje, Klima Temperatura, Relativna vlažnost, Moduo površine preseka, Selekcija Višekriterijumska optimizacija, ELECTRE metoda.



# OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY OF CONCRETE WORKS ON LOW AND HIGH TEMPERATURES

(Doctoral thesis)

## Summary:

Fast development of construction industry processes led to the wider industrialization, but a greater part of concrete is still placed in situ under severe climatic conditions. For concrete works under special ambient circumstances (hot weather, cold weather) concrete technologists use a lot of different methods. Selection and ranking between alternative concreting methods is a difficult multicriterial optimization problem. There are substantial differences between the cold weather and hot weather concreting, but there is a significant degree of similarity to which allowed us to use the same methodological approach. Sets of different nature criteria (technical, technological, mechanical, ecological, sociological) were proposed on the basis that nowadays technology has to satisfy various human needs. These sets and criteria were used on a set of concreting methods (alternatives). Degree to which different criteria were satisfied were measured by a set of scales and every criterion, under certain circumstances, got its own weight. Weighing system was constructed to correspond to decision-maker's preferences. Framework for ranking was ELECTRE method that was modified in accordance with need to satisfy group decision-making and to obtain possibility of eliminating certain criteria or methods, which provides a way of testing of their influence on ranking of selected methods. The proposed method of ranking is open for implementation of new criteria and more precise scales for technology performance's measurement and valuation, and can be used in an expert system that could bring a more comfortable way of decision making.

Key words: Concrete, Cold weather concreting, Hot weather concreting, Climat, Temperature, Relative humidity, Cross sectional modulus, Selection, Multicriterial optimization, ELECTRE



# SADRŽAJ

## UVOD I STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE

I - VII

### 1. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE

1.1. OPŠTI POJMOVI I DEFINICIJE

1

1.2. KARAKTERISTIKE NEKIH KLIMATSKIH PODRUČJA

2

1.3. UTICAJ KLIME NA PRODUKTIVNOST RADA

5

### 2. KARAKTERISTIKE KOMPONENTI BETONSKE MEŠAVINE

2.1. OPŠTE ODLIKE

7

2.2. CEMENT

8

2.3. AGREGAT

12

2.4. VODA

15

2.5. ADITIVI

18

### 3. KARAKTERISTIKE SVEŽE BETONSKE MASE

3.1. SPECIFIČNOSTI RADA U POSEBNIM USLOVIMA

23

3.2. BRZINA VEZIVANJA I HEMIZAM OČVRŠĆAVANJA

24

3.3. OBRADLJIVOST MEŠAVINE

25

3.4. PROMENE FIZIČKIH OSOBINA MLADOG BETONA

28

3.5. ŠTETNE POSLEDICE RADA U POSEBNIM USLOVIMA

33

### 4. PROIZVODNJA, TRANSPORT I UGRADIVANJE BETONA

4.1. KONTROLA TEMPERATURE MEŠAVINE

36

4.2. PROBLEMI PROIZVODNJE I TRANSPORTA BETONA

40

4.3. UGRADIVANJE BETONA U POSEBNIM USLOVIMA

47

### 5. PROBLEMI U VEZI SA NEGOVANJEM BETONA

5.1. METODE I TEHNOLOŠKI RAZLOZI NEGE BETONA

49

5.2. DUŽINA NEGOVANJA - FUNKCIJA PROMENE TEMPERATURE BETONA

52

5.3. KONTROLA KARAKTERISTIKA BETONA I SKIDANJE OPLATE

61

5.4. TRAJNOST KAO FUNKCIJA SASTAVA I NEGE BETONA

65

### 6. METODE RADA NA NISKIM TEMPERATURAMA

6.1. POLAZNI STAVOVI

68

6.2. PRIMENA HEMIJSKIH DODATAKA

71

6.3. ZAGREVANJE KOMPONENTI BETONSKE MEŠAVINE

74

6.4. TERMOS METODA I NJENE PODVARIJANTE	75
6.5. ZAGREVANJE BETONA PRE ILI POSLE UGRAĐIVANJA	78
6.5.1. OPŠTI PROBLEMI ZAGREVANJA BETONA	78
6.5.2. ZAGREVANJE BETONA PRE UGRAĐIVANJA	79
6.5.3. ZAGREVANJE BETONA PRIMENOM EFEKTA ELEKTRIČNOG OTPORA	80
6.5.4. ZAGREVANJE BETONA INDUKCIJOM I INFRA-CRVENIM ZRAČENJEM	86
6.6. OSTALE METODE	83
<b>7. METODE RADA NA VISOKIM TEMPERATURAMA</b>	
7.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE POSTOJEĆIH METODA	86
7.2. HLAĐENJE KOMPONENTI BETONSKE MEŠAVINE	87
7.3. RETEMPEROVANJE SVEŽEG BETONA	91
7.4. PRIMENA ZAŠTITNIH PREMAZA	93
<b>8. METODE OPTIMIZACIJE, PRINCIPI, MODELI DONOŠENJA ODLUKE</b>	
8.1. UVOD	98
8.2. O PRIRODI PROBLEMA I MODELA	100
8.3. OSNOVE VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE PROBLEMA	102
8.4. VIŠEKRITERIJUMSKI MODELI IZBORA	106
8.4.1. STRUKTURA MODELA	106
8.4.2. SELEKCIJA ALTERNATIVNIH REŠENJA	112
8.4.3. PROBLEM KONFLIKTA U PROCESU ODLUČIVANJA	115
8.4.4. UTICAJ PREFERENCE NA PROCES ODLUČIVANJA	117
8.5. MOGUĆI ALTERNATIVNI PRISTUPI	118
8.5.1. TEORIJA KORISNOSTI	118
8.5.2. INTERAKTIVNA METODA	123
8.5.3. VIŠEKRITERIJUMSKA SIMPLEKS METODA	124
8.6. "ELECTRE" METODA KAO INSTRUMENT SELEKCIJE	125
8.6.1. ANALIZA SAGLASNOSTI PAROVA ALTERNATIVA	125
8.6.2. KOREKCIJE METODE PREMA SPECIFIČNOSTIMA PROBLEMA	132
8.6.3. ODREĐIVANJE TEŽINSKIH KOEFICIJENATA	135
<b>9. PARAMETRI PRIMARNE SELEKCIJE METODA BETONIRANJA</b>	
9.1. PROBLEMATIKA PRIMARNE SELEKCIJE	139
9.2. RASPOLOŽIVA OPREMA, SREDSTVA I ZNANJE	141
9.3. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE LOKACIJE GRAĐENJA	143
9.4. VRSTA KONSTRUKCIJE	146



<b>10. KRITERIJUMI ZA OCENU I IZBOR OPTIMALNE METODE</b>	
10.1. PRIRODA KVANTITATIVNIH I KVALITATIVNIH KRITERIJA	149
10.2. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE	152
10.2.1. TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI ASPEKTI RAZVOJA	153
10.2.2. AFIRMISANOST METODE U DOMAĆOJ PRAKSI	155
10.3. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI	156
10.3.1. UNIVERZALNOST METODE	157
10.3.1. OBIM RADOVA I BRZINA UGRAĐIVANJA	160
10.4. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA	164
10.4.1. NEGOVANJE DO USVOJENOG STEPENA ČVRSTOĆE	164
10.4.1. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE NA PRITISAK U PROIZVOLJNOM TRENUTKU VREMENA	167
10.5. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANOJ RADNOJ SNAZI	169
10.6. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE	170
10.6.1. VREME POTREBNO ZA TERMIČKU OBRADU BETONA	171
10.6.2. ODREĐIVANJE SREDNJE TEMPERATURE BETONA U TOKU PROCESA OČVRŠĆAVANJA	175
10.7. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA	177
10.8. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE	177
10.9. SKALE ZA OCENU VREDNOSTI KRITERIJA	179
<b>11. ODREĐIVANJE VREDNOSTI KRITERIJUMSKIH FUNKCIJA</b>	
11.1. METODE RADA U ZIMSKIM USLOVIMA	190
11.1.1. METODA "HLADNOG BETONA"	191
11.1.2. "TERMOS" METODA	198
11.1.3. METODA ELEKTROTERMIJSKOG ZAGREVANJA BETONA	205
11.1.4. METODA ELEKTRO-DUBINSKOG ZAGREVANJA BETONA	218
11.1.5. METODA ZAGREVANJA INFRA-CRVENIM ZRAČENJEM	226
11.1.6. METODA INDUKCIONOG ZAGREVANJA BETONA	233
11.1.7. METODA PRIMENE TERMO-OPLATE	241
11.2. METODE RADA U LETNJIM USLOVIMA	252
<b>12. IZBOR OPTIMALNE METODE</b>	
12.1. ALGORITAM ZA SELEKCIJU METODA	261
12.2. ANALIZA NEKIH DOBIJENIH REZULTATA	267
<b>13. NAPOMENE I ZAKLJUČCI</b>	275
<b>14. LITERATURA</b>	286





Dug, višegodišnji rad na vrlo zahtevnoj materiji, kakva je i ova kojom se autor bavio, traži različite žrtve kako od istraživača tako i od njegovih bliskih saradnika. Nažalost, verovatno najveću žrtvu prinosi porodica lišavajući se onih brojnih, svakodnevnih zadovoljstava koja često izostaju zbog neočekivano dugog rada na sakupljanju i analizi nekih novih izvora znanja. Stoga najdublju zahvalnost izražavam svojoj supruzi i sinu koji su svojom tolerancijom moj "greh" učinili iskupljivijim.

Svoj veliki doprinos su dale i moje kolege sa Katedre za menadžment i tehnologiju građenja koje su me pomagale materijalno i stvaranjem kreativne atmosfere u kojoj je naporan rad bio lakši a rezultati vredniji. Povremeni pad entuzijazma u takvom okruženju nije mogao dugo trajati pa im zahvaljujem na tako dragocenoj kolegijalnosti.

Relativno duga lista referentnih radova skromna je slika količine stručnih radova koja je, na ovaj ili onaj način, bila korišćena u toku istraživanja. Mnoge od tih radova su mi nesebično stavili na raspolaganje moje poštovane kolege dr Slobodan Otović, dr Sekula Živković, dr Milutin Čupić i mr Zoran Jančićević pa se i njima i ostalim, nepomenutim "izvorima" literature i korisnih saveta, još jednom iskreno zahvaljujem.

Da bi ovaj rad dobio svoj sadašnji sadržaj i formu pomogli su i moje brojne kolege i radnici Građevinskog fakulteta u Beogradu a posebno članovi IRC-a, biblioteke i kopirnice.

Autor

London, Sept. 19 1772

Dear Sir, In the affair of so much importance to you, wherein you ask my advice, I cannot, for want of sufficient premises, advise you what to determine, but if you please I will tell you how. When those difficult cases occur, they are difficult, chiefly because while we have them under consideration, all the reasons pro and con are not present to the mind at the same time; but sometimes one set present themselves, and at other times another, the first being out of sight. Hence the various purposes or inclinations that alternately prevail, and the uncertainty that perplexes us. To get over this, my way is to divide half a sheet of paper by a line into two columns, writing over the one Pro, and over the other Con. Then, during three or four days consideration, I put down under the different heads short hints of the different motives, that at different times occur to me, for or against the measure. Then I have thus got them all together in one view, I endeavor to estimate their respective weights; and where I find two, one on each side, that seem equal, I strike them both out. If I find a reason Pro equal to some two reasons Con, I strike out the three. If I judge some two reasons Con, equal to some three reasons Pro, I strike out the five; and thus proceeding I find at length the balance lies, and if, after a day or two of further consideration, nothing new that is of importance occurs on either side, I come to determination accordingly. And, though the weight of reasons cannot be taken with the precision of algebraic quantities, yet when each is thus considered, separately and comparatively, and the whole lies before me, I think I can judge better, and am less liable to make a rash step, and in fact I have found great advantage from this kind of equation, in what may be called moral or prudential algebra. Wishing sincerely that you may determine for the best, I am ever, my dear friend, yours most affectionately.

B. Franklin





## UVOD

Jedna od definicija betona je ona koja kaže da je beton "heterogeni višefazni materijal koji se dobija povezivanjem različitih tipova agregata, pomoću cementne paste, u veštačku stenu". Heterogenost materijala podrazumeva i da se njegove komponente ponašaju u mehaničkom smislu različito što dovodi do različitog stepena uticaja agregata i veziva na osobine dobijene "veštačke stene". Mineraloški sastav agregata značajno varira ali se može smatrati, imajući u vidu najrasprostranjenije vrste agregata, da se on ponaša kao linearno-elastična komponenta za razliku od cementne paste koja je visko-elastična. I dok je agregat uglavnom prirodan materijal, manje ili više mehanički obrađen, cementna pasta je veštačka komponenta izuzetno osetljiva na uticaje promena vlažnosti i temperature okruženja. Poroznija od agregata ona promenom sadržaja absorbovane vode dovodi do "disanja betona", tj. skupljanja ili bubrenja materijala. Osim toga, pod uticajem temperaturnih varijacija sredine, agregat i pasta manifestuju drugu bitnu razliku - različite koeficijente linearnog termičkog širenja, koji superponirani sa dejstvom različitih modula elastičnosti iniciraju složeno naponsko stanje u masi očvrstlog betona. Pomenuta absorbovana voda i uvučeni vazduh predstavljaju, aproksimativno uzevši, inertne sastojke koji svojom nepravilnom distribucijom unutar betona samo multipliciraju složenost odnosa čestica betona. Promene temperature i vlažnosti, u okviru uobičajenih klimatskih režima ne utiču značajnije na agregat ali je njihov odraz na promenama osobina cementne paste značajan kako na niskim tako i na visokim temperaturama.

Savremeni tokovi razvoja proizvodnih procesa vode i u građevinarstvu ka sve većoj industrijalizaciji radova čime se skoro 80-90% rada iz oblasti visokogradnje može izvršiti u proizvodnim pogonima daleko od štetnog dejstva klimatskih promena. Ovim se podiže produktivnost rada, a uz određena investiciona





ulaganja u objekte i opremu, utiče na rentabilnije i ekonomičnije poslovanje preduzeća - izvođača i animira mlada radna snaga koja sve više traži industrijske uslove rada.

Beton je vrlo jeftin materijal, zahvalan kako za projektante tako i za izvođače radova, pa se uz određenu kvalifikovanost radnika može proizvesti dobar, kvalitetan beton. Nažalost stepen industrijalizacije betonskih radova nije adekvatan potrebama pa se zbog brojnih razloga (unikatnost objekata, udaljenost lokacije od proizvodnih pogona...) velike količine betona moraju proizvesti, ugraditi i negovati u uslovima bitno drugačijim od onih gde se mikro-klima može kontrolisati. Tako se, polazeći od saznanja da promena prilika zahteva promenu tehnologije rada, javio niz postupaka koje karakteriše ista osobina - *rad u posebnim uslovima*.

"Zimski rad", ili rad pod niskim temperaturama, nema za cilj dokazivanje mogućnosti rada u otežanim uslovima već je posledica napora da se održi kontinuitet rada tokom cele godine. Ako se poslu pristupa sistemski a objekti pravilno projektuju i precizno izvode stambena izgradnja u zimskim uslovima poskupljuje najviše za 5% u odnosu na standardne uslove rada. "Letnji rad" koji se odvija pod, za izvršioce, daleko povoljnijim uslovima i sa značajno podnošljivijim fiziološkim posledicama, biva neopravdano zapostavljen u okviru planiranja i pripreme za rad, pa nije bez osnova tvrdnja da je *"više betona izgorelo nego što se smrзло"*.

Izvođačima radova stoji na raspolaganju mnoštvo različitih metoda čija primena u različitim oblastima istog klimatskog režima daje rezultate koji favorizuju čas jednu, čas drugu od njih. Zato je opravdano pitanje koja je od njih *"najbolja"*, ali se mora imati u vidu da nabavka i instaliranje opreme, deponovanje pomoćnih materijala i povećanje energetske i drugih proizvodnih kapaciteta standardne tehnološke konfiguracije poskupljuje rad i do 50%. Pritom odluku i pripremne radove treba izvršiti u periodu kada o

klimatskom režimu u vreme izvođenja radova, i pored višegodišnjih opažanja, ne možemo dovoljno znati a posebno o dnevnim kolebanjima uslova rada i promenama temperature koje su za negu betona od izuzetne važnosti.

## STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE

Polazeći od poznate činjenice da se kao jedna od najbitnijih karakteristika proizvodnih procesa u građevinarstvu javlja njihova izloženost klimatskim uticajima u Poglavlju 1 su date definicije i objašnjenja specifičnih termina koji karakterišu rad u posebnim uslovima. Ovi uslovi se odnose prevashodno na određena klimatska područja pa je pored njihovih osnovnih odlika data i analiza psiholoških i fizioloških uticaja na rezultate rada angažovane radne snage. U skladu sa tim saznavima usvojene su donja i gornja granica temperaturnog intervala koji striktno ograničava oblast istraživanja u okviru ovog rada.

U Poglavlju 2 se analizira ponašanje komponenata betonske mešavine u uslovima ekstremnih karakteristika proizvodnog procesa (visoka temperatura sa niskom relativnom vlažnošću vazduha ili niska temperatura sa povišenom količinom vlage) i daju osnovne preporuke za pripremu i obradu takvog materijala. Poseban akcenat stavlja se na tumačenja ACI i ASTM dokumenata koji tretiraju ovu problematiku i daje se kritički osvrt na u njima date preporuke. Obzirom da one utiču na "stav prakse" ukazano je na načine prevazilaženja dilema.

Kompleksni uticaj okruženja na hemizam procesa očvršćavanja izložen je u Poglavlju 3 u kome se analiziraju poremećaji brzine očvršćavanja, uzroci promena konsistencije mešavine i nastale posledice po osobine betona u fazi narastanja njegovih mehaničkih karakteristika. Tehnološke osobine materijala definišu i pristup rešavanju problema izbora metode rada pa je analiza tome primerena.

Poglavlje 4 je posvećeno tehnološkom aspektu proizvodnih procesa u posebnim uslovima. Kritički osvrt na važeća normativna akta iz ove oblasti dopunjen je analizom postupaka regulacije ulaznih temperatura sastojaka betonske mešavine. Obimno prikupljeni materijal je dozvolio formulisanje niza preporuka za praktičnu primenu, važnih upravo stoga što ova oblast domaćim propisima nije dovoljno obrađena.

Nega betona je, kao posebno važan deo tehnološkog procesa, dosta detaljnije obrađena u okviru Poglavlja 5 mada su specifičnosti, karakteristične za same metode rada, obrađene u drugoj polovini rada. Konstatovano je da se aspektu nege betona u određenim klimatskim uslovima do sada nije poklonila adekvatna pažnja pa je dat akcenat na uticajima rapidne evaporacije. Uticaj promene temperature betona na dužinu potrebne nege analiziran je kao funkcija vrste cementa, temperature okruženja, početne temperature ugrađenog betona, odlika oplata i oblika (Mp) betoniranog nosača. Brzina obrta oplata zavisi od razvoja procesa očvršćavanja pa se kontrola očekivanih vrednosti u uslovima smanjene kontrolabilnosti ovog procesa nameće kao ključna aktivnost. U radu su analizirani standardni postupci i metode uvećanja pouzdanosti nekih merenih vrednosti. Na kraju Poglavlja su izložene mogućnosti delovanja na trajnost betona putem korekcije sastava komponenata mešavine.

Poglavlje 6 daje pregled metoda rada na niskim temperaturama, njihove tehničke i tehnološke karakteristike, varijanta rešenja u okviru iste metode kao i procenu efikasnosti njihove primene za različite tipove konstrukcija i različite temperaturne režime. Kod metoda sa zagrevanjem betona poseban naglasak je dat na ograničenjima brzine podizanja temperature i problemima kontrole režima zagrevanja u uslovima naglih promena hemijskih i fizičkih osobina betona. Kako su "zimске" metode rada zahtevnije u pogledu tehničkih mera zaštite od "letnjih" tome je data adekvatna pažnja.



Metodama rada u uslovima visokih temperatura i niske relativne vlažnosti je posvećeno Poglavlje 7 koje prikupljena saznanja deli na profilaktičke postupke i postupke aktivne regulacije sadržaja vlage u svežoj betonskoj masi. Naglašena je važnost preciznog rada u slučaju "retempering-a" mešavine, kao i osetljivost betona na uticaje postupka hlađenja komponenata betona.

U Poglavlju 8 je dat pregled alternativnih metodoloških pristupa u procesu vrednovanja opisanih metoda rada sa posebno detaljnom analizom metoda višekriterijumske optimizacije i tehno-ekonomske analize i ocene selekcijom izdvojenih tehnoloških postupaka. Razmatrane su mogućnosti primene metoda operacionih istraživanja (linearnog programiranja, heurističkih metoda...) i korišćenja ostalih srodnih postupaka kod praktične selekcije metoda rada. Kao najpogodnije "orude" za rangiranje alternativnih metoda je usvojen postupak koji bazira na "ELECTRE" metodi ali joj pridodaje "blok" u kome se preferenca donosioca odluke kvantifikuje u vidu "težina" usvojenih kriterija. Da bi se u proces donošenja odluke mogao lako uključiti veći broj merodavnih lica metoda je osposobljena da vodi računa o hijerarhijskim odnosima unutar tima za odlučivanje.

Parametrima primarne selekcije metoda betoniranja u posebnim uslovima bavi se Poglavlje 9 u kome su upoređeni uticaji eksternih faktora izbora (uticaj opreme, karakteristika lokacije i tipa konstrukcije) i internih, tehnoloških odlika određene metode rada (njen dopustivi praktični učinak, očekivano trajanje tehnološkog postupka...). Primarna selekcija kao priručan postupak služi da se fokusira pažnja analitičara na one metode o čijoj efikasnosti ne treba diskutovati a u ovom radu predstavlja polazište za razvitak daleko složenije metodologije za analizu, vrednovanje i rangiranje različitih tehnoloških postupaka.

Poglavljem 10 dati su kriterijumi za ocenu i izbor optimalne metode. Kriterijumi su podeljeni u šest grupa u skladu sa prirodom

aspekta problema koji se vrednuju. Kriterijumi opšte ocene i ocene tzv. pratećih efekata primenjene metode su u određenoj meri podložni subjektivnosti procene donosioca odluke pa je posebno mesto dato analizi strukture pomenutih kriterija i njihovom normiranju. Pored tehno-ekonomskih kriterija (angažovanje radne snage, utrošak energije i materijala) od izuzetne su važnosti kriterijumi ocene ostvarenih mehaničkih karakteristika betona jer utiču na odluku o trajanju proizvodnog ciklusa. Njihovo direktno vrednovanje zasnovano je i na najnovijim saznanjima iz te oblasti. Za niz ovde tretiranih kriterija utvrđene su i predložene u vidu "skala" (a na osnovu prethodno izloženih saznanja i dostupnih a relevantnih podataka) vrednosti kriterijumskih funkcija.

Poglavlje 11 daje metodološki pristup određivanju ovih vrednosti (ocena metode rada u svetlu prirode kriterija) što je omogućilo i formiranje pogodnog programa za automatsku selekciju metoda rada. Samo vrednovanje metoda je detaljno prikazano za metode rada koje se primenjuju u zimskim uslovima a za metode letnjeg betoniranja su izloženi principi korigovanja prikazane metodologije u skladu sa specifičnim razlikama koji proizilaze iz primenjene tehnologije rada. Vrlo obimnim sadržajem ovog poglavlja date su osnove budućeg savetodavnog sistema za vrednovanje i izbor metode betoniranja pod posebnim uslovima. Veliki broj tabela, nomograma, dijagrama kao i višestrana analiza puta za formiranje ocene metode po bilo kom kriterijumu daje mogućnost i samostalnog rada budućih korisnika prezentiranih saznanja.

U okviru Poglavlja 12 izvršena je kako višestrana selekcija tako i vrednovanje grupe tretiranih metoda i to kako po pitanju njihove podobnosti za primenu kod različitih tipova konstrukcija (masivne, skeletne...) tako i po pitanju različitih a mogućih klimatskih režima rada. Konačna odluka se u savremenoj praksi obično donosi, kao i kod većine tehnoloških dilema, na bazi tehno-ekonomske ocene par "favorizovanih" varijanti. Na početku poglavlja je izložen nov

---

algoritam za selekciju i rangiranje alternativnih rešenja u kome je metoda ELECTRE prilagodena praktičnim zahtevima korisnika. Ovde izložen algoritam je poslužio i za formiranje programa kojim je na efikasan način testirana osetljivost usvojenog modela.

Napomene i zaključci, dati u Poglavlju 13, predstavljaju rezime doktorske disertacije i donose kratke preporuke za jedan novi, "inženjerski" pristup problemima izvođenja betonskih radova u ekstremnim klimatskim uslovima.

\* \* \*

Autor je svoj rad prikazao na 285 strana teksta koji je grupisan u 12 poglavlja, ilustrovan sa 38 tabela i 38 dijagrama i nomograma a poziva se na 114 referentnih stručnih radova koji su publikovani na engleskom, ruskom i srpskom jeziku.





# 1. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE

## 1.1. OPŠTI POJMOVI I DEFINICIJE

Klimatski uticaji predstavljaju proizvod međusobnog delovanja atmosfere i tla pri čemu se kao osnovni generator brojnih manifestacija klime javlja temperatura. Nastala kao posledica sunčevog zračenja ona varira sa promenama osunčanosti tla i karakteristikama lokalne vegetacije. Pored nje interesantni za praćenje, a vrlo uticajni na efekte rada su sledeći parametri: vlažnost vazduha, brzina i pravac vetra, oblačnost, atmosferske padavine i donekle vazdušni pritisak.

Prilikom razmatranja klimatskih uticaja koji utiču na izbor metode rada u zimskim uslovima posebna pažnja se mora obraditi kako najnižim temperaturama tako i njihovom trajanju i brzini promena i to naročito ako su u kombinaciji sa vetrom. Mora se imati u vidu činjenica da uticaj tla na mikroklimu dopire do visine od samo par metara ali se u toj zoni značajno oseća uticaj i privremenih i stalnih objekata koji smanjuju udare vetra ali i svojom senkom utiču na pad temperature vazduha i tla.

Intenzivna investiciona ulaganja u Africi i na Srednjem Istoku uslovlila su angažovanje evropskih pa i naših izvodača kojima je nedostajalo iskustvo za rad u takvom klimatskom području pa su betonski radovi, zbog poremećaja u kvalitetu, postali predmetom brojnih sporova. Slična ali dosta blaža situacija je i na gradilištima u sub-polarnom području koje se pogrešno generalizuje na čitav bivši SSSR a u kome postoje i oblasti (Centralna Azija, Južna Ukrajina i Transkavkazija) gde se dnevna temperatura penje i do 50°C a relativna vlažnost vazduha pada na 20%.

U inženjerskoj upotrebi termini "cold weather" i "hot weather" su dobijali različita značenja u kontekstu dozvoljenih klimatskih

parametara pa je uputno prihvatiti stav po kome je: "hot weather svaka kombinacija visoke temperature vazduha, niske relativne vlažnosti i vetra sposobna da utiče na kvalitet svežeg ili očvrslog betona ili na drugi način izaziva nenormalne osobine" (67).

Pod "cold weather"-om se podrazumeva period kada se "u najmanje tri uzastopna dana prosečna temperatura vazduha spušta ispod  $5^{\circ}\text{C}$ ", pri čemu je prosečna temperatura aritmetička sredina najviše i najniže vrednosti zabeležene u toku dana. Ukoliko se temperature, više od  $10^{\circ}\text{C}$  jave u periodu dužem od 12 sati (bez obzira kojih 24 sati posmatramo) možemo smatrati da više ne postoje zimski uslovi rada objedinjeni pod pojmom "cold weather" (52).

Ovako široke granice iziskuju povećani oprez izvođača radova koji utvrđuje tehničke uslove za izvođenje radova jer nedovoljno poznavanje tehnoloških problema i njihovih mogućih rešenja, kao i neadekvatna organizaciona pripremljenost projektanta i izvođača (njihova inertnost) uzrokuju, u našim klimatskim uslovima, retku ili nesistematičnu primenu odgovarajućih metoda za rad u posebnim uslovima.

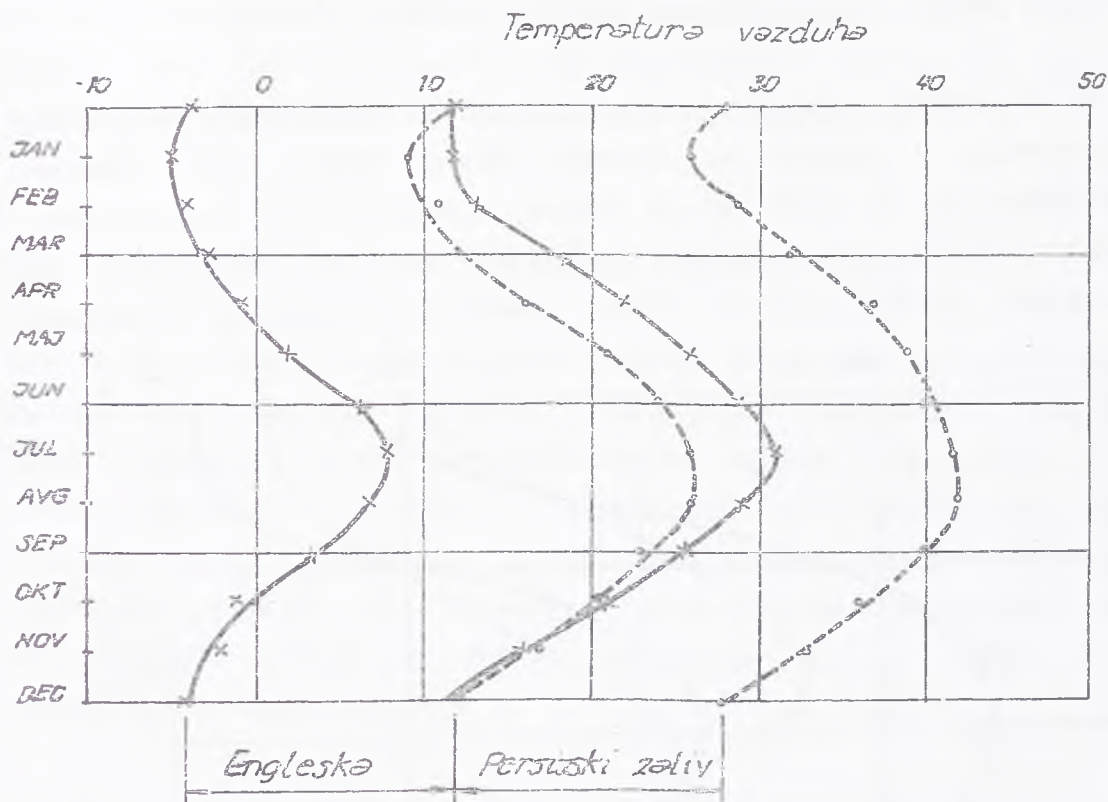
## 1.2. KARAKTERISTIKE NEKIH KLIMATSKIH PODRUČJA

Područje Persijskog zaliva karakteriše srednja godišnja temperatura od  $28^{\circ}\text{C}$  koja inače ide i preko  $50^{\circ}\text{C}$  (u hladu) a pada tokom zimskog perioda na oko  $5^{\circ}\text{C}$ . Relativna vlažnost takode pokazuje drastične promene uzimajući vrednosti u intervalu 5-90%. Da bi se mogli, makar površno, uporediti uslovi rada kod nas i u Zalivu treba reći da je u letnjim mesecima vazduh ( $t_a = 50^{\circ}\text{C}$ , r.v. = 50%) tamo osam puta sposobniji da upija novu količinu vlage nego što je to u našem podneblju ( $t_a = 30^{\circ}\text{C}$ , r.v. = 60%).

Ukoliko se posmatra samo promena relativne vlažnosti kao uticajni



faktor za utvrđivanje adekvatnog proizvodnog procesa treba znati da pad vlažnosti sa 90% na 50%, pri čemu svi ostali parametri ostaju isti (temperatura, brzina vetra) izaziva petostruko povećanje evaporacije. Da ovakve promene evaporacije nisu ništa izuzetno govori podatak da usled povećanja brzine vetra do gotovo

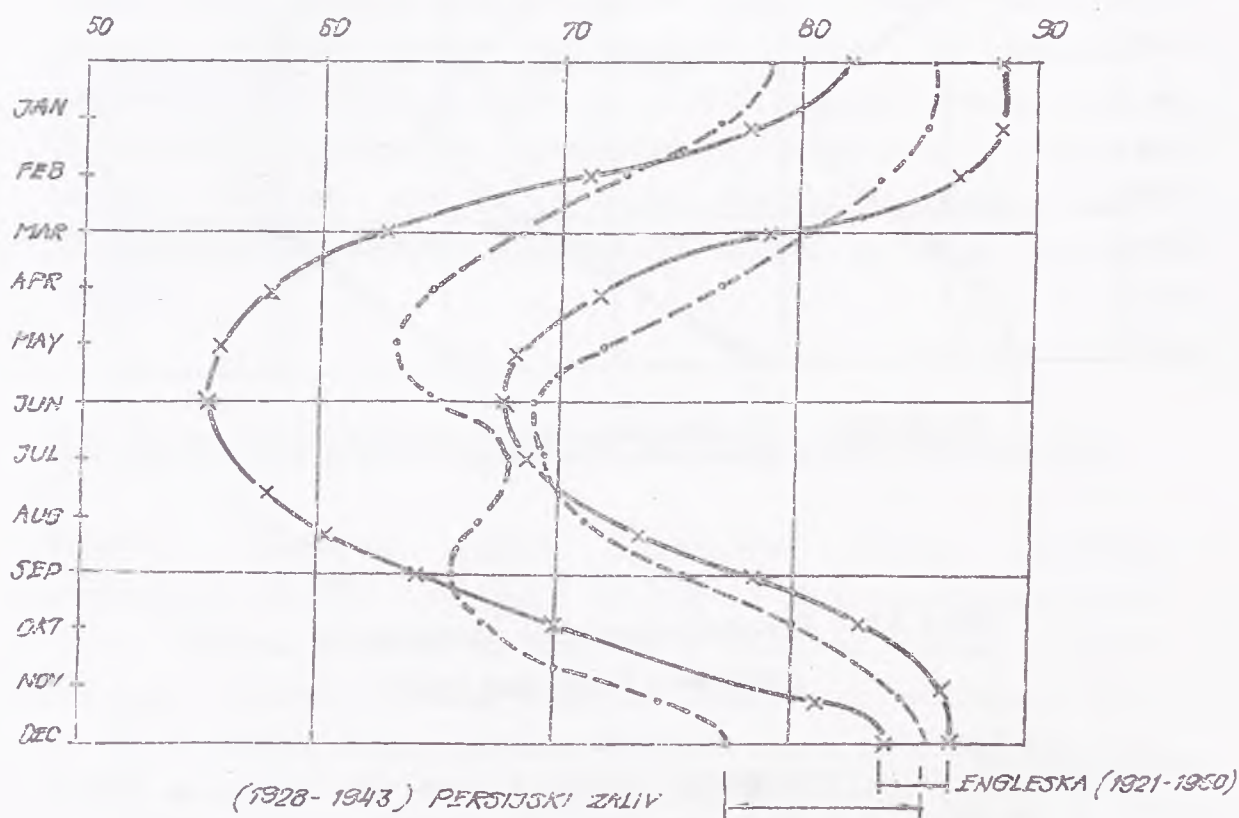


Slika 1.1 - Poređenje prosečnih temperatura  
Engleske i Persijskog zaliva

uobičajenih 15 km/h evaporacija odnosi 4 puta više vlage, a pri brzini od 40 km/h i 9 puta više nego pri mirnom vremenu. Niska vlažnost i česti vetrovi neka su od bitnih obeležja pustinjske klime. *Jaegermann* daje kao karakteristike suve i vruće pustinjske klime sledeće veličine: dnevna temperatura u toku leta oko 50°C dok noću pada na 15-25°C, a nisu retke temperaturne razlike i od

oko 50°C. U skladu sa bojom podloge, brzinom vetra i stepenom radijacije, sunčevo zračenje podiže temperaturu podloge za 20-30°C više nego što je u hladu, tako da se otkrivene, tamno-sive betonske površine zagrevaju do temperature od preko 80°C. Pad temperature betona je toliki da je  $t_b$  toku noći 5-10°C niže od ambientalne, što je praćeno i značajnom promenom vlažnosti (10-30% danju, ide do 25-50% noću, a nisu retki slučajevi da morski vetrovi podižu relativnu vlažnost vazduha do skoro 100%).

Da bi ispitali dejstvo ovakvog klimata na sveže ugrađeni beton *Jaegermann* i *Traubici* su simulirali dejstvo vrućeg vetra dejstvom kalorifera ( $t_a = 90^\circ\text{C}$ ) pa je betonu, nezaštićenom i nenegovanom, pala čvrstoća na pritisak za 35-45% što nije bio slučaj sa uzorcima kojima je, u istim uslovima, evaporacija smanjena



Slika 1.2 - Poređenje prosečne vlažnosti vazduha Engleske i Persijskog zaliva

permanentnim kvašenjem površine. Osetljivost betona na povišenu

evaporaciju ne treba komentarisati ali je isušivanje kod betona, u sredini čija je  $t_a = 20^{\circ}\text{C}$ , dvostruko veća od evaporacije betona na temperaturi od  $10^{\circ}\text{C}$ .

Štetno dejstvo intenzivnog sunčevog zračenja manifestuje se povećanjem temperature armature i oplate (tamne površine) koje, u kontaktu sa svežom ugrađenom masom, deluju kao grejači izazivajući ubrzano očvršćavanje kontaktne zone, mikroprsrline i sl. Takvo dejstvo ima i tlo koje apsorbuje ogromnu toplotu i zrači je u masu fundamenta upijajući pritom nevezanu vodu iz svežeg betona.

### 1.3. UTICAJ KLIME NA PRODUKTIVNOST RADA

Dobro je poznato da dinamične promene klimatskih karakteristika (temperatura, vazdušni pritisak, atmosferske padavine...) mogu imati značajnog uticaja na produktivnost radnika. Taj uticaj je dvojak, *psihološki* i *fiziološki*, i manifestuje se u potrebi da se prekidom rada i odlaskom u zaštićeni prostor izbegne dejstvo klimatskih promena koje izazivaju relativno burne poremećaje u radu vitalnih organa a dužim delovanjem direktno utiču na zdravlje angažovanih radnika.

Da se klimatski uticaji ne mogu posmatrati pojedinačno već kao kompleksan faktor poremećaja produktivnosti pokazuju istraživanja izvršena pre desetak godina. Ona jasno prikazuje promenu fiziološkog osećaja hladnoće/toplote koju radnik oseća pod uticajem promene brzine vetra. Uobičajeni postupak pripreme organizma za duži boravak u izmenjenim uslovima odvija se kroz aklimatizaciju koja za srednju temperaturu vazduha od  $sr t_a = 30^{\circ}\text{C}$  traje oko 20 dana, uz rad sa čestim pauzama i povećanu potrošnju vode po radniku (obično oko 1 l/h pri srednje teškom fizičkom radu). Da niske temperature takode poskupljuju ljudski rad pokazuju podaci (SSSR) prema kojima rad pri ambijentalnoj temperaturi  $0^{\circ}\text{C} < t_a < -20^{\circ}\text{C}$  zahteva oko 10% više novca a prosečni



dopunski radovi idu do 30% i iznose nešto manje od 5 čovek \* sat/m<sup>3</sup>.

Naredna tabela daje pregledno promenu produktivnosti rada za razne kombinacije temperature vazduha i njegove relativne vlažnosti. Ona ukazuje na činjenicu da se pri visokim temperaturama (43 °C) i nešto višim stepenom vlažnosti efekti rada prepolovljuju, a to se dešava i na ne tako niskim temperaturama (-23 °C). Ovakvi podaci u velikoj meri utiču na oblast istraživanja metoda rada.

Tabela 1.1

R.V.	%													T
90	56	71	82	89	93	96	98	98	96	93	84	57	0	
80	57	73	84	91	95	98	100	100	98	95	87	68	15	
70	59	75	86	93	97	99	100	100	99	97	90	76	50	
60	60	76	87	94	98	100	100	100	100	98	93	80	57	
50	61	77	88	94	98	100	100	100	100	99	94	82	60	
40	62	78	88	94	98	100	100	100	100	99	94	84	63	
30	62	78	88	94	98	100	100	100	100	99	93	83	62	
20	62	78	88	94	98	100	100	100	100	99	93	82	61	
≈	-23	-18	-12	-7	-1	4	10	16	21	27	32	38	43	(°C)

Polazeći od činjenice da se svega 2% vremena radi na temperaturama nižim od -30°C to je oblast istraživanja tehničko-tehnoloških mogućnosti izvođenja radova, u okviru disertacije, ograničena na interval od -30°C do 60°C pri čemu je donja granica limitirana mogućnostima radnika da podnese rad u takvim uslovima, a gornja je, prema Samarai-u, u vezi sa granicom tehničke obradljivosti sveže betonske mase.

## 2. KARAKTERISTIKE KOMPONENTI BETONSKE MEŠAVINE

### 2.1. OPŠTE ODLIKE

Beton kao heterogena mešavina manje ili više aktivnih sastojaka pokazuje značajnu osetljivost kako na fizičke parametre komponenti (oblik, veličinu, količinu, temperaturu...), tako i na njihove hemijske osobine (rastvorljivost, hemijsku reaktivnost...), pri čemu izuzetni uticaj na ostvarenje projektovanih mehaničkih karakteristika ima tehnologija rada što pokazuje i lista faktora koji utiču na čvrstoću betona, to su:

#### 1. KONSTITUENTNI MATERIJALI

- 1.1. Voda: kvalitet, w/c odnos.
- 1.2. Cement: finoća mliva, hemijski sastav.
- 1.3. Agregat (krupan, sitan): a/c odnos, čvrstoća, oblik, veličina, stanje površine zrna, granulacija, hemijska reaktivnost, termičke osobine.
- 1.4. Aditivi: količina, hemijska reaktivnost.

#### 2. METODOLOGIJA IZRADE BETONA

- 2.1. Doziranje konstituenata.
- 2.2. Mešanje sveže mase.
- 2.3. Transportovanje.
- 2.4. Ugrađivanje betona.
- 2.5. Negovanje betona: vlažnost, temperatura, trajanje.

a na pouzdanost eksperimentima dobijenih rezultata utiču još i:

- a.) oblik i veličina probnog tela,
- b.) količina vlage u uzorku,
- c.) temperatura probnog tela,
- d.) stanje površine uzorka preko koje se aplicira sila, i
- e.) postupak nanošenja opterećenja.



## 2.2. CEMENT

Bez obzira u kojoj se količini dozira cement, kao najaktivniji deo vezivne paste, on je taj koji daje osnovni pečat mehaničkim karakteristikama očvrste betonske mase pri čemu mu uticaj u zavisnosti od vrste konstrukcije i primenjene tehnologije varira. Recimo, kod betonskih hidrotehničkih objekata cement (nezavisno od tipa i dozaže) nema značaj veći od izbora agregata, vrste i količine aditiva, primenjenog postupka hlađenja betona, veličine radnih lamela ili debljine i dinamike ugrađivanja sukcesivnih slojeva. Ipak, bilo posebno bilo kroz w/c odnos cement ostaje moćan tehnološki instrument kod realizacije betonskih radova u posebnim uslovima jer je njegoa bitna karakteristika *toplota hidratacije*.

Obzirom da se u bilansu toplote javlja i kao "pasivni član" (unosi vlastitu toplotu mase u betonsku mešavinu) i kao generator toplote, cement i tim putem utiče na čvrstoću na pritisak. Ima specifikacija koje ograničavaju temperaturu cementa na 65-80°C i time utiču na toplotni bilans ali je puno korektnije pratiti temperaturu sveže mešavine nego samih ingredijenata. Ako se temperatura mešavine od 20°C (pasivnim dejstvom cement neznatno utiče na nju) održava tokom prvih 24 sati očvršćavanja imaćemo odnos  $\beta_{k28}/\beta_{k1} = 6$ , dok je pri temperaturi svežeg betona od 50°C taj isti odnos samo oko 2.

Mada nam visoke rane čvrstoće mogu povoljno uticati na skraćenje roka za skidanje oplata ipak je cilj dobijanje projektovane čvrstoće, a nju opisane visoke i niske temperature svežeg betona nesumnjivo smanjuju. Smanjenjem temperature mešavine za samo 1°C vršne temperature betona (nastale u vreme egzotermije) se tokom prvih dana očvršćavanja snižavaju za oko 1,5°C, što i nije zanemarljivo, posebno kod konstrukcija čiji je moduo površine poprečnog preseka (Mp) mali.



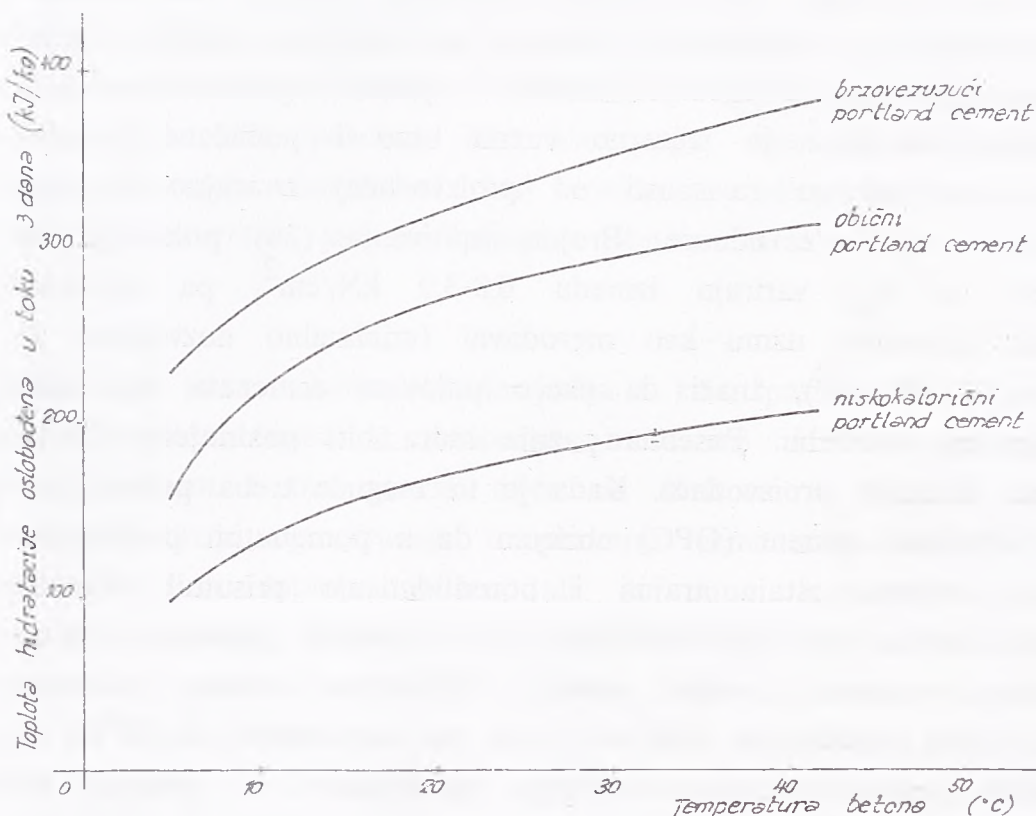
Povratno dejstvo mešavine na cement ogleda se u činjenici da se sa svakih  $10^{\circ}\text{C}$  rasta temperature betona udvostručuje hemijska reakcija cementa i vode. Zbog pomenutih a i drugih, ekonomskih razloga teži se minimiziranju količine ugrađenog cementa, ali to treba vezivati za uslove u kojima se betonski element nalazi u toku eksploatacije.

Kada je u pitanju vrsta cementa mora se naglasiti da izvođači radova nekad ne sagledavaju precizno svu veličinu njenog uticaja. Recimo, gradilišta na Srednjem Istoku raspolažu uglavnom uvoznim cementima za koje je izuzetno važno brzo i pouzdano utvrditi svojstva, a ona (u zavisnosti od proizvođača) značajno variraju čak i za iste w/c odnose. Brojna ispitivanja (26) pokazuju da rezultati za  $\beta_{k7}$  variraju između  $0,8-3,0 \text{ kN/cm}^2$ , pa ako se britanski standardi uzmu kao merodavni (minimalno dozvoljeno je  $\beta_{k1} = 2 \text{ kN/cm}^2$ ), znači da skoro polovina cemenata nije bila podobna za upotrebu. Posebna pažnja mora biti poklonjena izboru cementa domaćih proizvođača. Kada je to moguće treba primenjivati obični Portland cement (OPC) obzirom da u pomenutim područjima njegova svojstva ostaju trajna i pored uticaja prisutnih hlorida međutim treba biti oprezan kada je u pitanju promena brzine početnog vezivanja (*initial setting*). Standardno vreme, okvirno uzevši, može malteru sa OPC-om (1:3) na temperaturi od  $30^{\circ}\text{C}$  da prepolovi vreme početnog vezivanja uobičajeno za procese na temperaturi od  $15^{\circ}\text{C}$ .

Za zimske uslove izvođenja radova treba, po pravilu, birati OPC ili brzovezujuće cemente jer je, kao što je rečeno, brzina očvršćavanja cemenata sa malom toplotom hidratacije vrlo usporena na nižim temperaturama.

Blendirane cemente treba primenjivati kod primene metoda sa zagrevanjem betona ili kod konstrukcija manjeg modula površine (Mp) negovanih Termos-postupkom. Laboratorijsko utvrđivanje

toplote hidratacije predstavlja nužan preduslov rada sa kliznom oplatom, jer u zimskim temperaturnim uslovima, brzina klizanja ne sme preći brzinu očvršćavanja betona. Različite vrste cementa imaju različite toplote hidratacije a dijagram 2.1 daje uporedni pregled uticaja temperature betona na količinu oslobodene toplote hidratacije u toku prvih tri dana sazrevanja ugrađenog materijala.



Slika 2.1 - Uticaja temperature betona na količinu oslobodene toplote hidratacije

Primena cementa izuzetno niske toplote hidratacije (*Extra Low Heat*) je, u laboratorijskim uslovima, pokazala da ELH - cementi imaju u odnosu na standardne "nisko kalorične" cimente mnogo veću finoću mliva koja garantuje lakše transportovanje pumpanog betona kao i značajno bolju obradljivost ali i sklonost brzom gubljenju povoljne konsistencije što nalaže povećane mere opreza.

Temperaturni ekstremi betonske mase u proseku su 5-6°C niži nego kod LH -cemenata što gotovo u potpunosti oslobada izvođača brige oko pojave *thermal cracking*-a mada u nešto umerenijim klimatskim područjima u zimskim mesecima ELH - cementi izazivaju probleme jer sporijim dostizanjem kritične čvrstoće angažuju skupu oplatu uz betonski blok i redukuju njen planirani obrt.

Imajući na umu hemijski sastav cementa treba naglasiti da je glavna hemijska komponenta Portland cementa *trikalciumaluminat* ( $C_3A$ ) koji daje 525 cal/gr i u toku prvih 6 dana ostvaruje oko 80% ukupne toplote hidratacije dok ostale komponente daju 280 cal/gr uz mnogo sporiju hidrataciju. Zato se betonima sa ubrzanim očvršćavanjem preporučuju cementi sledećeg sastava (58):

po <i>Boot</i> -u:	$C_3S$	50-55%	po <i>Keiser</i> -u	$C_3S$	< 60%
	$C_3A$	8-12%		$C_3A$	6-8%
	$C_4AF$	12-14%			

a *Mironov* i *Krilov* (41) betonima za zimske uslove rada namenjuju Portland cement sličnog sastava visoke marke (najmanje marka 40).

Iako predstavlja ključnu kariku optimizacije sastava mešavine sastav cementa (njegova hemijska kompozicija) nije dovoljno istražena kada je u pitanju minimiziranje uticaja *hot weather*-a na pad čvrstoće i trajnosti betona kao baznih funkcionalnih karakteristika očvrste mase. *Shalon* (67) ipak preporučuje Portland cement Tip V uzimajući količinu  $C_3A$  kao ključni kriterijum.

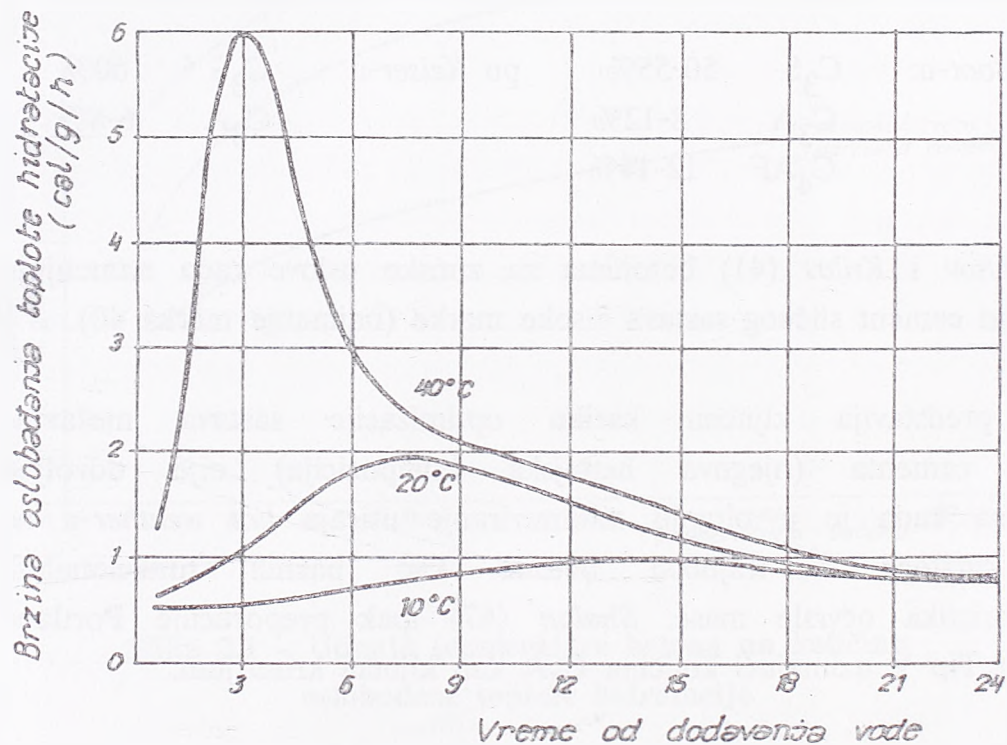
Pored tipa cementa i njegovog sastava na razvoj i ukupnu količinu toplote oslobodene u toku procesa hidratacije utiče i finoća mliva o čemu treba posebno voditi računa prilikom tumačenja rezultata laboratorijskih provera brzine očvršćavanja probnih tela. Merenjema toplote hidratacije, termosnim ili adiabatским kalorimetrima, dobija se da u prosečnim uslovima (20°C) obični Portland cementi





oslobadaju oko 335 kJ/kg u toku prvih 7 dana procesa, dok oni sa niskom toplotom hidratacije daju oko 250 kJ/kg odnosno samo oko 70% OPC-ove *doze*. Za uspešno rešavanje inženjerskih problema od izuzetne je važnosti postupak kontrole temperature betona u prvih nekoliko sati procesa hidratacije obzirom da se na visokim početnim temperaturama javlja "temperaturna spirala" koju najbolje opisuje dijagram na slici 2.2.

Visoke početne temperature izazivaju rapidan skok u brzini oslobađanja toplote hidratacije a ona, zarobljena u masi i bez dodatnih instrumenata veštačkog hlađenja, uvećava temperaturu betona a temperaturni "pik" donosi kao neminovnu posledicu i pad krajnje čvrstoće materijala.



Slika 2.2 - Brzina oslobađanja hidratacione toplote

Za pouzdano planiranje radova od izuzetne je važnosti praćenje ponašanja nabavljenih i deponovanih količina cementa. Nažalost, za većinu projekata nemoguće je obezbediti i deponovati svu potrebnu količinu pre početka rada - a sa stanovišta većine izvođača i

neracionalno je. Ipak, pre upotrebe cement deponovan u džakovima treba prosejati radi eliminisanja eventualnih grudvica većih od 5 mm (nastalih presovanjem pod težinom viših slojeva džakova) jer takva zrna mogu ostati nerastvorena u masi mešavine.

### 2.3. AGREGAT

Agregat utiče kako na trajnost betona tako i na njegovu, u makro smislu, zapreminsku nepromenljivost ali, mada nije inertan materijal, treba težiti eksploataciji nalazišta čiji materijal neće pokazivati hemijsku aktivnost (alkalno-silikatna reakcija i sl.). Pored toga treba voditi računa i o fizičkim odlikama agregata jer je njegova prerada i proizvodnja betona, u Evropskim okvirima, dostigla visok nivo, pa gotovo besprekoran rad drobilana, separacija i fabrika betona dovodi do toga da naši inženjeri, na gradilištima Srednjeg Istoka i u Aziji, ne vode dovoljno računa o poreklu i osobinama kamenog materijala. Kako on, posebno u Africi, može imati i povećane količine sulfata ili hlorida to se tehničke specifikacije za beton mogu poštovati samo uz povećane mere opreza. Posebnu pažnju treba pokloniti prisustvu glinovito-prašinstih sastojaka koji se u srednjeistočnim uslovima po pravilu otprašivanjem eliminišu ili dovode na nivo:

a.- krupan agregat	šljunak	max 1%
	drobina	max 3%
b.- sitan agregat	šljunak	max 3%
	drobina	max 5%

Problemi sa agregatom nastaju tokom čitavog tehnološkog procesa obzirom da neki od njih, deponovani na tlu stupaju u reakciju sa rastvorima njegovog vlažnog površinskog sloja i razgrađujući se menjaju svoje mehaničke osobine. Da bi se zaštitili od prekomerne

količine prašinih sastojaka izvođači radova pribegavaju odprašivanju (ventilatorima) čime se izbegava neugodnost da se varira bilans vode zbog higroskopnosti prašinih čestica. Pored toga, u situaciji kada se raspolaže dovoljnim količinama tehničke vode, agregat se može prati od prašine (pritom se i hladi) ali tada treba strogo voditi računa o granulometriji materijala. Naime, kao posledica loše mehaničke obrade lomljeni agregat, sa kojim se u pomenutim područjima najčešće raspolaže, ukoliko je dosta porozan upija značajne količine vode koje variraju u zavisnosti od specifične površine materijala. Ovo direktno utiče na variranje vrlo bitnog w/c odnosa ali izaziva i zapreminske promene (skupljanje) usled kvašenja.

Vlažnost agregata donosi još više problema u uslovima *cold weather*-a jer za samo 10 tona peska (sa prosečnih i uobičajenih 6% vlage) treba preko 200.000 KJ za odmrzavanje vode (335 KJ/kg leda) koju tek tada treba zagrevati sa "dostignutih" 0°C do željenog nivoa.

Širenje agregata je prevashodno posledica termičkih uticaja pa se, u zavisnosti od osetljivosti agregata, i beton odlikuje različitim *koefficientima linearnog širenja*, što pokazuje i tabela :

Tabela 2.3

VRSTA MATERIJALA	TIPIČNE VREDNOSTI KOEFICIJENATA TERMIČKOG ŠIRENJA * 10 <sup>-6</sup> /°C	
	AGREGAT	BETON
KVARCITI	10,3	12,1
PEŠČARI	9,3	11,4
GRANITI	6,8	9,6
BAZALTI	6,4	9,3
LAKI AGREGATI	4,5	7,0



Novi propisi za beton i armirani beton specificiraju samo granulometrijske zahteve, a termičke uslove ne komentarišu, što dovodi i do zanemarivanja uticaja ove odlike agregata na mehanička svojstva betona.

U zimskim uslovima rada ne retko dolazi do pojave grudvica ledom povezanih čestica, koje se teško razbijaju i pri prinudnom mešanju, pa se agregat mora zagrevati. U cilju postizanja što je moguće ravnomernije distribucije vlage i toplote agregat za mešavinu treba odmrznuti najkasnije 24 sata pre upotrebe. Iako je deponovanje materijala u silosima duplih, termoizolovanih zidova sa ugrađenim grejnim telima vrlo skupo treba ga primenjivati pri većem obimu radova gde neće značajnije uticati na jediničnu cenu ugrađenog betona.

Za radove obimnije od  $20 \text{ m}^3$ /dan pogodno je primeniti zagrevanje parom (proizvodi se u tehničkim bojlerima, kotlovima) tako što se u masu, prekrivenu i zaštićenu, kroz sistem cevi uduvava para. Kondenz, otopljeni led i sneg skupljaju se u drenažama na dnu deponije. Ovaj postupak utiče na varijaciju količine vlage koju agregat unosi u mešavinu pa je za kontinuirani proizvodni proces preporučljiviji "grejač" od neperforiranih cevi. U svim tim varijantama je nužna stroga kontrola temperature agregata koja se može ujednačavati ručnim mešanjem ili prebacivanjem materijala. Zagrevanje površinskih slojeva može vršiti baterija infra-crvenih grejača postavljenih na proračunskoj udaljenosti iznad agregata.

Rad na visokim temperaturama iziskuje upotrebu i aditiva koji sadrže sodu ili potašu što u slučaju pojave "aktivnih" zrna opala ili kaļcedona može dovesti do alkalno-silikatne reakcije a primena lokalnog agregata u područjima sa visokim temperaturama (Persijski zaliv) često remeti ravnotežu neutralnih i hemijski štetnih materijala pa CIRIA (75) daje posebna ograničenja, kada je u pitanju prisustvo soli, u odnosu na težinu agregata:

- hloridi (kao Cl): u krupnom agregatu max. 0,03%  
u sitnom agregatu max. 0,06%
  
- sulfati (kao SO<sub>3</sub>): u krupnom agregatu max. 0,40%  
u sitnom agregatu max. 0,40%

Kako ove preporuke nisu uvek u skladu sa BS ili ASTM dokumentima to o tome treba voditi računa pri projektovanju betona.

## 2.4. VODA.

Kvalitet vode, njen hemijski sastav, značajno utiče na kvalitet betona (nezavisno od temperature betona i sredine u kojoj se on proizvodi) ali je ta oblast postojećim propisima i tehničkom regulativom precizno definisana pa ovde neće biti komentarisana. Valja napomenuti da i minimalne količine soli, rastvorenih u vodi, zbog velike osetljivosti betona mogu biti štetne ukoliko u sadejstvu sa solima iz agregata i aditiva prelaze dozvoljene količine. Zato je nužna kompleksna kontrola hemijskog sastava svih komponenti mešavine pre definisanja proizvodne recepture.

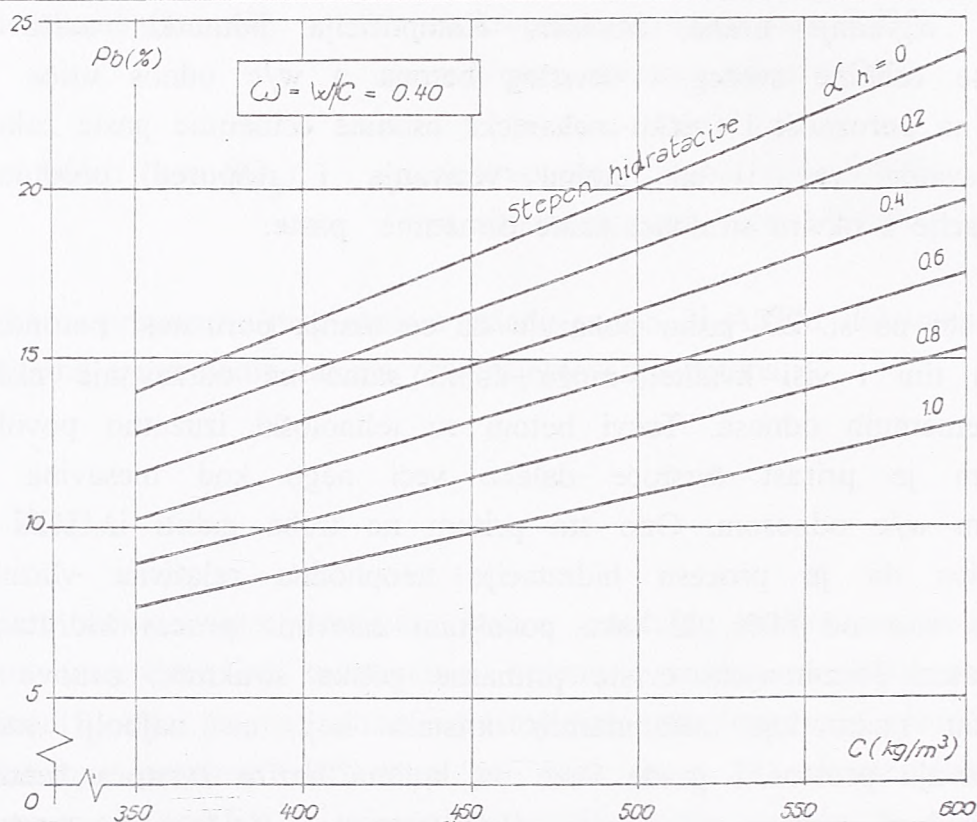
Voda je vrlo osetljiva na temperaturne promene sredine a absorbovanu toplotu unosi u proces kao fizički akcelerator. Vreme vezivanja, koje u mnogome određuje tehnologiju rada, je na 30°C tek 75% vremena vezivanja na temperaturi od 20°C. Zato se kod izrade toplog betona (metodama zagrevanja komponenata) kao maksimalna dozvoljena temperatura zagrejane vode određuje  $t_w = 60^\circ\text{C}$  ali kako se, u slučaju mešanja hladnog agregata i vode, toplota brzo predaje dozvoljeno je max  $t_w = 70^\circ\text{C}$ . Da bi voda bila ujednačene temperature u toku proizvodnje tehnološki je opravdano zagrevati količine za bar 20 mešungu. Pomenute preporuke važe za obične cemente dok je u radu sa cementima niskih toplota hidratacije moguće ići i do temperatura vode od 90°C kako je bilo

i pri izgradnji brane *Boulder*. Kompozicija betonske mešavine definiše osobine svežeg i očvrstlog betona a w/c odnos utiče ne samo na poroznost i fizičko-mehaničke osobine cementne paste tokom očvršćavanja već i na brzinu vezivanja i raspored produkata hidratacije u okviru strukture same cementne paste.

Dijagram na sl. 2.3 jasno pokazuje da se manja poroznost betona, a samim tim i viši kvalitet mogu dobiti samo uz održavanje niskih vodocementnih odnosa. Takvi betoni su tehnološki izuzetno povoljni jer im je prirast čvrstoće daleko veći nego kod mešavina sa visokim w/c odnosom. Ono što pritom ne treba gubiti iz vida je činjenica da je procesu hidratacije neophodna relativna vlažnost betona viša od 80%. U tako povoljnim uslovima proces hidratacije je praćen formiranjem čvrste primarne gelske strukture, osnove za pravilnu nadgradnju sekundarnih kristala koji na najbolji način ispunjavaju prostor i grade veze na kojima bazira čvrstoća betona. Smanjenjem poroznosti betona delotvorno se utiče na čvrstoću materijala ali je i tu korisnije profilaktikom smanjiti poroznost koja nastaje tokom hidratacije nego je snižavati manjim w/c odnosom koji donosi i dodatnu teškoće u pogledu obradljivosti.

Brzina skidanja oplata, kao važan tehno-ekonomski parametar, utvrđuje se na osnovu stepena očvršćavanja ugrađenog betona koji se kontroliše ispitivanjem uzoraka spravljenih na "standardni" način. Kako se w/c odnos različito normira (po BS-u je 0,40 za malter a 0,60 za beton; dok je po ASTM-u usvojeno  $w/c = 0,485$ ) to pre početka radova treba ujednačiti parametre procesa sa metodologijom praćenja i kontrolom kvaliteta. Ovo je utoliko važnije jer smanjenje odnosa cementa i vode ubrzava hidrataciju cementa u ranoj fazi. Tako se formira vezivna komponenta koja, zbog manje količine vode u pasti, ima manju specifičnu površinu produkata hidratacije ali su ti produkti relativno jačeg vezivnog svojstva i ukupno manje poroznosti čime utiču na rast čvrstoće betona.





Slika 2.3 - Poroznost betona kao funkcija količine cementa i stepena hidratacije  $\alpha_h$  (83)

Kada je u pitanju ukupna količina vode u mešavini treba imati na umu da zasićeni agregat, sa maksimalno 2,5% vode u svojoj masi, može uneti do 1/3 potrebne količine vode pa precizna kontrola vlažnosti agregata predstavlja nezaobilazni uslov za dobijanje kvalitetnih mešavina. Ponašanje vode u betonu, izloženom dejstvu niskih temperatura, zavisi od sastava betona a naročito od prisustva i količine zamešanih dodataka. U betonima bez dodataka zamrzavanje vode teče do temperature od  $-15^{\circ}\text{C}$ , kada možemo smatrati da je sva prešla u led, a u betonima sa potašom led se obrazuje sve do  $-35^{\circ}\text{C}$  da bi se na još nižim temperaturama beton skupljao - kao kruto telo. Intenzitet zaledivanja nije ravnomeran i srazmeran brzini pada temperature pa betoni (sa dodatkom potašom) zamrzavaju u najvećoj meri do temperature od  $-15^{\circ}\text{C}$ . Ovom oblašću se bavi *kriologija betona*, ali zbog usvojenog intervala temperature betona, o njoj neće biti posebno reči.

## 2.5. ADITIVI

Primena aditiva je danas u takvoj meri da više od polovine svetske produkcije svežeg betona uključuje i upotrebu nekog od hemijskih dodataka. Aditiv je, prema jednoj od definicija, "svaki materijal osim šljunka, vode i cementa koji se dodaje betonskoj mešavini u toku ili odmah posle mešanja da bi promenio jednu ili više osobina betona" (60). Nema betona, projektovanog za specijalne uslove izvođenja radova da nisu uključeni hemijski dodaci i to pre ostalih akceleratori i antifrizni dodaci za rad na niskim a superplastifikatori i retarderi za rad na visokim temperaturama.

Pre upotrebe aditivi moraju u laboratorijskim uslovima, a poželjno je i "in situ", dokazati deklarisanu performanse i to posebno za maksimalne količine koje trebaju biti dozirane. Posebno važni su: kratkotrajni i dugotrajni efekti primene, kompatibilnost sa alternativnim vrstama cementa (u slučaju nemogućnosti nabavke projektovane vrste cementa), osetljivost na nepreciznost doziranja (kontekst veličine greške/odstupanja instaliranih dozatora), vrsta interakcije sa primenjenim cementima, uticaj načina deponovanja na kvalitet reakcije, sadržaj štetnih sastojaka (soli hlorida,...)...

Analiza postojećih a važećih preporuka za rad u žarkim uslovima (to su pre ostalih ACI 305R-77 i ASTM C-494) pokazuje da nema komentara koji tretira primenu aditiva na temperaturama iznad 40°C (57). Većina proizvođača deklarise osobine dodatka na osnovu ispitivanja koje se u laboratorijskim uslovima vrši pri  $t_a = 20^{\circ}\text{C}$ , a primećeno je da neki uobičajeni usporivači vezivanja već na temperaturi od 33°C počinju da deluju kao akceleratori. Problem je utoliko komplikovaniji što ne postoji dovoljno precizan metod laboratorijske simulacije lokalnih klimatskih karakteristika pa kao jedino pouzdano sredstvo ostaje opit na samom gradilištu uz upotrebu materijala koji će biti zaista unošeni u mešavinu. Jer kompleksnost procesa hidratacije paste (kojoj su dodati veštački

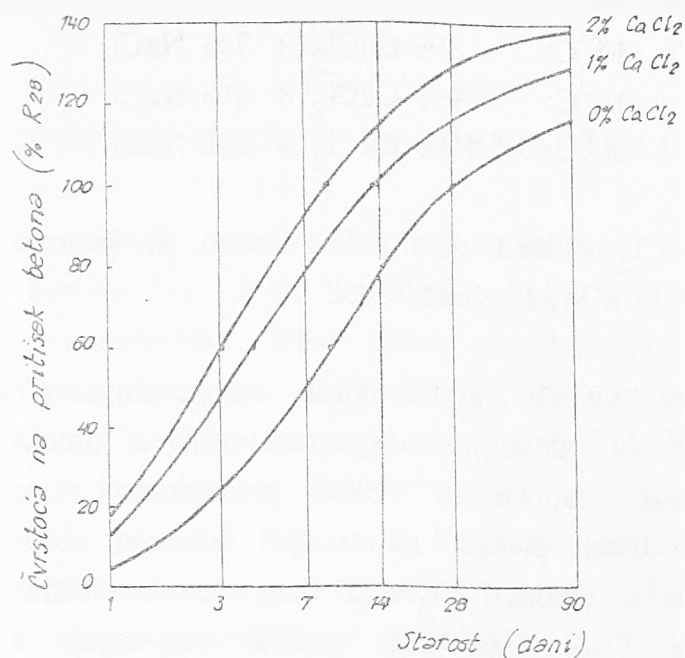
katalizatori) ne dozvoljava improvizacije.

Zimski rad ("cold weather concreting") zahteva gotovo obaveznu primenu akceleratora čije dejstvo kompenzira sporiju hidrataciju i time redukuje vreme neophodno za dostizanje minimalnih čvrstoća. Kraći upotrebnii ciklus za komplet oplata i brži ulazak objekta u eksploataciju su značajne beneficije upotrebe akceleratora a alternative su: povećanje količine cementa i/ili primena cementa veće finoće mliva, kao i zagrevanje konstituenata i/ili same betonske mase. Najpoznatiji akceleratori su:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$  i  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  a uobičajene dozaže ne prelaze 2% težine cementa, dok se u poslednje vreme afirmiše i *kalcijum format* ( $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ ) kao zamena za dosta agresivni  $\text{CaCl}_2$ . Gotovo 70% poznatih akceleratora sadrži  $\text{CaCl}_2$  kao osnovnu aktivnu supstancu a on u rastvore cementne paste unosi jone koji izazivaju koroziju položene armature ometajući stvaranje veze beton-gvožđe. Kao takav, kalcijum-hlorid nije pogodan za prednapregnute nosače ali se kod ostalih objekata dobrom kompozicijom mešavine, nižim w/c faktorom i vrlo kvalitetnim ugrađivanjem može dobiti beton niske vodopropustljivosti. Ukoliko se spreči kvašenje opisanom betonu neće u toku eksploatacije pretiti opasnost od povećanja količine hlornih jona u rastvoru i progresivne korozije.

Zbog navedenih razloga doziranje kalcijum-hlorida se maksimizira na oko 1,5% u odnosu na težinu cementa jer i u tako maloj količini aditiv izaziva rast skupljanja od 10%. Američki autori su stroži i dozvoljavaju do 1% kalcijum-hlorida preferirajući "super brze" cemente (nažalost, i oni sadrže  $\text{CaCl}_2$  u mešavini). Grafik pokazuje uticaj  $\text{CaCl}_2$  na prirast čvrstoće betona:

Kalcijum-format  $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$  nema hlora te ne izaziva koroziju armature ali je neuporedivo skuplji od  $\text{CaCl}_2$  pa time i u redjoj upotrebi. Ovo ima za posledicu manje pouzdane iskustvene podatke ali se zna da je slabo rastvorljiv u vodi pa se dozira u vidu

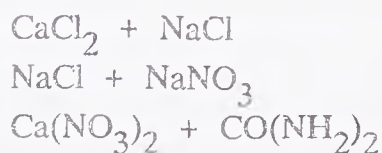




Slika 2.4 - Prirast čvrstoće betona kao funkcija količine dodatog kalcijum hlorida

praha i to u količini 1-2% od težine cementa. Pregled efekata dejstva kalcijum-formata pokazuje da je u početku proces vezivanja nešto sporiji od onog koji daje  $\text{CaCl}_2$  ali se nakon 12 sati dobija isti intenzitet procesa za oba primenjena aditiva.

Zato što ne utiču na pad tačke mržnjenja (maksimalna doza kalcijum-hlorida spušta tačku mržnjenja samo  $1^{\circ}\text{C}$ ) akceleratori ne rade kao protivmrazni dodaci, osim kod primene "ruske recepture" kada se  $\text{CaCl}_2$  kao vrlo jeftin dozira i do 20% u odnosu na količinu vode. Kao protivmrazna sredstva služe  $\text{NaNO}_2$  i  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (potaša) ili kombinacije aditiva:



u dozama većim od 10% u odnosu na masu cementa a za različite stepene hladnoće *Sizov* preporučuje sledeće kombinacije:

do - 5 <sup>0</sup> C:	5% NaCl
do -10 <sup>0</sup> C:	3% CaCl <sub>2</sub> + 7% NaCl
do -15 <sup>0</sup> C:	9% CaCl <sub>2</sub> + 6% NaCl
do -20 <sup>0</sup> C:	15% CaCl <sub>2</sub> + 5% NaCl

pri čemu se CaCl<sub>2</sub> obično dozira kao tečan, u koncentraciji većoj od 30%, a NaCl je u vidu tehničke soli.

Rad u uslovima visokih ambientalnih temperatura (*"hot weather concreting"*) zahteva dovoljno dugu obradljivost mešavine. Ovaj zahtev se može ispoštovati bilo primenom retardera, koji usporavaju tj. odlažu proces hidratacije cementa, bilo primenom adekvatnog cementa (sadržaj C<sub>3</sub>A u masi cementa utiče na vreme vezivanja; manje C<sub>3</sub>A daje duže vreme vezivanja). Pored toga, postoje postupci "retemperiranja" o kojima su detaljniji podaci dati u odeljku 7.2.

### 3. KARAKTERISTIKE SVEŽE BETONSKE MASE

#### 3.1. SPECIFIČNOSTI RADA U POSEBNIM USLOVIMA

Jedan od najuticajnijih faktora za stepen/brzinu očvršćavanja je temperatura betona u toku procesa hidratacije ali njegovo delovanje nije autonomno. Stiče se i pored toga utisak da je uticaju temperature, na opšte stanje betona, data puno veća pažnja nego kompleksnom dejstvu temperature, vlažnosti i brzine vazduha (vetra). A ovo kompleksno dejstvo stvara na gradilištu daleko složenije probleme od onih koji se u laboratorijskim uslovima mogu kontrolisati. Izrada betona u uslovima niske vlažnosti, visokih temperatura i vetra promenljivog intenziteta i pravca je praćena sledećim poremećajima:

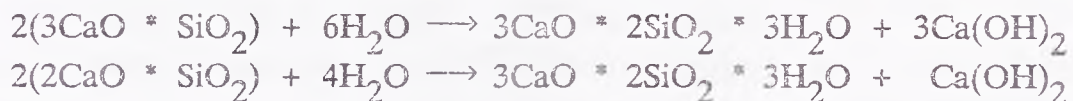
1. - usled povećanja količine vode u mešavini (kompenzacija visoke evaporacije, primene poroznog agregata...) dolazi do pada krajnje čvrstoće materijala;
2. - rapidno gubljenje vlage izaziva brzi pad obradljivosti a to iziskuje *retemperovanje* mešavine (često se izvodi laički pa dovodi do teških posledica);
3. - ubrzana evaporacija utiče na rast tendencije ka plastičnom skupljanju;
4. - nepravilna distribucija toplote nastale usled kratkotalasnog sunčevog zračenja vodi ka pojavi prslina kao posledici različitih termičkih deformacija;
5. - mešavine sa aerantima na povišenim temperaturama teško zadržavaju ravnomernu distribuciju uvučenog vazduha;
6. - mnogobrojni faktori poremećaja utiču na pravilnost kompozicije mešavine tj. na balans sitnih i krupnih čestica, i dovode do jačeg znojenja sveže ugrađenog betona ("*bleeding*") koje sprečava nanošenje *curing compoud*-a u toku prvih 4-8 sati vezivanja i inicira niz drugih štetnih posledica.



### 3.2. BRZINA VEZIVANJA I HEMIZAM OČVRŠĆAVANJA

Navedeni problemi su potakli istraživače da za određene mešavine (tip cementa, w/c faktor) potraže optimalnu temperaturu betona u ranoj fazi koja bi uslovlila ostvarenje vrhunskih karakteristika materijala. *Kleiger*-ovi rezultati pokazuju da je za Portland cimente Tip I i II to  $t_{bp} = 13^{\circ}\text{C}$  a za PC Tip III to  $t_{bp} = 5^{\circ}\text{C}$  (1). Način kako visoke radne temperature žarkog podneblja utiču na postizanje željenog kvaliteta pokazuju i radovi *Verbeck*-a i *Helmuth*-a koji potvrđuju da u prvih par sati, na normalnoj temperaturi, hidratizira oko 20% cementa a na  $40^{\circ}\text{C}$  čak 30-40%.

Ovakvo, rano formirane "skrame" na površini primarno hidratiziranog zrna cementa sprečava normalan razvoj procesa usled čega se ostali produkti hidratacije grupišu oko skrame stvarajući, u okviru cementne paste, nepravilnu distribuciju produkata koju ne može popraviti nijedan postupak nege betona. Najvažnije komponente Portland cementa su  $\text{C}_3\text{S}$  i  $\text{C}_2\text{S}$  a njihova hidratacija daje:



medutim, pouzdanija istraživanja hemizma i krajnjih produkata procesa zahtevaju kompleksan rad i bave se procesima koji, na ovde usvojenom makroplanu, nisu značajni. Kada su u pitanju promene čvrstoće betona u zavisnosti od temperature negovanja treba pomenuti stav do koga su došli *Samarai*, *Popovich* i *Malhotra* (72). Naime, ukoliko je temperatura negovanja viša od temperature betonske mešavine u toku spravljanja i ugrađivanja tada će  $R_{28}$  biti veća u odnosu na kontrolnu grupu uzoraka spravljanu i negovanu na istoj temperaturi. Ovaj rast čvrstoće, inače vrlo povoljan sa stanovišta izvođača, može se ostvariti primenom *water reducing* dodataka ali je i tada efekat primene izraženiji za uslove "toplijih" mešavina.

Uticaj temperature na vreme vezivanja daje tabela 3.1.:

Tabela 3.1

TEMPERATURA	APROKSIMATIVNO VREME VEZIVANJA
21 °C	6 SATI
16 °C	8 SATI
10 °C	10,5 SATI
4 °C	14,5 SATI
- 1 °C	19 SATI
- 7 °C	BETON ZAMRZAVA

### 3.3. OBRADLJIVOST MEŠAVINE

Uslov za dobijanje kvalitetnog betona je da se u toku proizvodnog procesa održi njegova fluidnost onoliko dugo koliko nam je potrebno da ga kvalitetno ugradimo. Narušavanje projektovane konzistencije mešavine treba vezivati prevashodno uz "hot weather concreting" obzirom da među parametrima koji utiču na promenu visine sleganja konusa ("slump"):

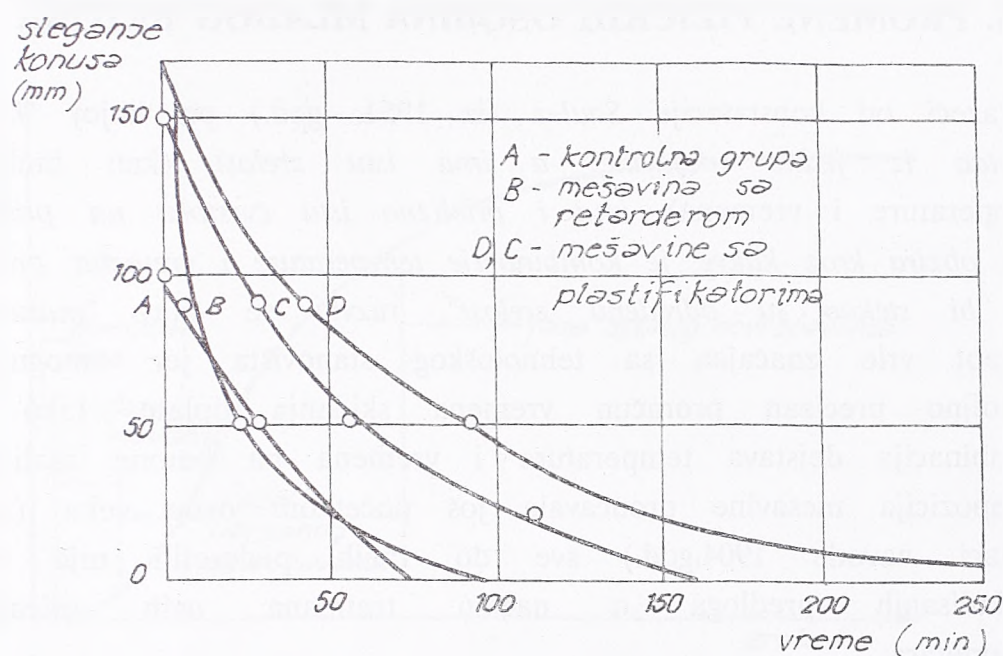
1. - vreme proteklo od završetka mešanja;
2. - visina temperature betona i vazduha (i njegova relativna vlažnost);
3. - poroznost (apsorpciona moć) zamešanog agregata;
4. - vrsta cementa (sastav, finoća mliva);
5. - vrsta i dozaža hemijskih dodataka (aeranti, plastifikatori, retarderi).

Druga grupa, prema svemu do sada rečenom, ima dominantan uticaj ali dejstvo vetra ne treba zanemarivati pokazuju i sledeći podaci: ako se pri r.v.=90% temperatura vazduha podigne sa 30°C na 40°C evaporacija će porasti za 45% a ako pritom duva i vetar ( $v = 15$

km/h) rast evaporacije je nešto niži - samo 30%. Nagla evaporacija ima i pozitivnih efekata, izaziva pad temperature ali je globalno uzevši vrlo štetna. Zato i pri projektovanju sastava mešavine treba voditi računa o njenoj osetljivosti na gubitke vlage jer beton sa standardnim cementom (PC tip I) ima na r.v. = 35% sedam i po puta veću ukupnu evaporaciju nego na r.v. = 95% (mereno u prvih 4 sata procesa vezivanja) što samo pogoršava stanje ionako osetljivih suvljih mešavina. Takve mešavine, često i usled neplanirano dugog transporta, gube obradljivost što ometa fazu razastiranja i ugrađivanja a praćeno je i segregacijom na mestima gušće ugrađene armature. Produženo mešanje u toku prvih 45 minuta nakon izrade betona izaziva procentualno najveći gubitak "slump"-a a dalje mešanje ima umerenije dejstvo što je i logično ako se imaju u vidu mehanizmi procesa vezivanja.

Veličina evaporacije značajno utiče i na pojavu plastičnog skupljanja betona ali se, na osnovu istraživanja izvršenih od strane *Portland Cement Association* (49), može smatrati da se ovo javlja kod evaporacija većih od  $1 \text{ kg/m}^2$  a da postoji mala verovatnoća pojave ukoliko su gubici vode manji od  $0,5 \text{ kg/m}^2$ . Često je pad "slump"-a posledica naglašene poroznosti agregata (5-6%) jer suv agregat u toku mešanja apsorbuje deo unete vode i oduzima mešavini neophodnu obradljivost. Kako se 90% apsorpcione sposobnosti agregata zadovolji u toku samo nekoliko minuta, a mešanje često traje kraće od toga, pa ne ostavlja mogućnost korekcije količine unete vode, to krupan agregat na deponiji treba sistematski kvasiti ili, ekstremno porozan, i ne koristiti. Da bi se, u uslovima povišene evaporacije, omogućila maksimalna hidratacija betona spravljenih sa W/C odnosom manjim od 0,50-0,53 površinu elementa treba permanentno kvasiti. Količina evaporacijom izgubljene vode je posebno bitna kod "membranski" negovanih betona pa ovu količinu treba ukalkulisati prilikom projektovanja mešavine betona prema usvojenom *curing compound*-u t.j. stepenu njegove vodopropustljivosti.





Slika 3.1 - Pad obradljivosti betonske mase na temperaturi od 50°C (40)

Ambientalna temperatura utiče na evaporaciju ali i početna temperatura betona ima značajan uticaj na količinu potrebne vode posebno imajući u vidu one gubitke koji nastaju u toku transporta sveže mase. Tako, po *L'Hermite*-u, za istu projektovanu konzistenciju koju imaju betoni na temperaturi od:

$$t_b = 20^{\circ}\text{C} \text{ potreban je odnos } w/c = 1,00 \text{ K}$$

$$t_b = 40^{\circ}\text{C} \text{ potreban je odnos } w/c = 1,10 \text{ K}$$

$$t_b = 60^{\circ}\text{C} \text{ potreban je odnos } w/c = 1,20 \text{ K}$$

(K - etalonska konstanta)

Proces naglog vezivanja ("*flash set*") može biti neugodan pratilac tehnološkog postupka ali se primenom aditiva može uticati na odnos rastvorljivih sulfata i tri-kalcijum-aluminata iz Portland cementa. Sve ovo utiče i na veličinu sleganja konusa a uz to, ukoliko se dodaje i gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), može izazvati dugotrajnu ekspanziju betona. Ispitivanja pokazuju da se, dodavanjem vode i energičnim mešanjem svežoj mešavini, vraća neophodni nivo obradljivosti.

### 3.4. PROMENE FIZIČKIH OSOBINA MLADOG BETONA

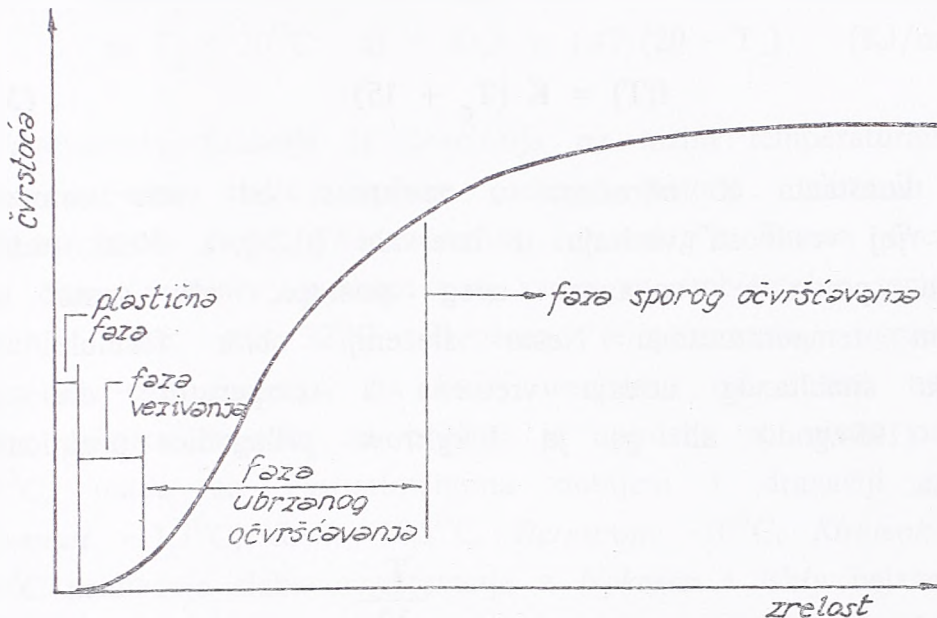
Polazeći od konstatacije *Saul*-a (iz 1951. god.) po kojoj "beton nastao iz jedne mešavine, a ima istu zrelost (kao funkciju temperature i vremena), ima i približno istu čvrstoću na pritisak bez obzira kroz kakve je kombinacije temperature i vremena prošao da bi stekao tu određenu zrelost", razvio se čitav "maturity" kocept vrlo značajan sa tehnološkog stanovišta jer omogućuje dovoljno precizan proračun vremena skidanja oplate. Iako se kombinacija dejstava temperature i vremena na betone različitih kompozicija mešavine proučavala još početkom ovog veka (neki podaci navode 1904.god.) sve do ranih pedesetih nije bilo artikuliranih predloga o načinu tretmana ovih uticajnih parametara.

Pre nego što se iznesu detaljnija objašnjenja ovog pristupa treba reći da mu *Malhotra* priznaje valjanost samo za temperaturni uslov  $t_b = 15,5 - 26,5^{\circ}\text{C}$  jer betoni u ovakvim uslovima nemaju značajnije gubitke vlage tokom negovanja (62). Jasno je da ovakve radne parametre procesa starenja betona gradilište vrlo teško može obezbediti bez preduzimanja posebnih mera zaštite i nege. Funkcija koja prikazuje odnos čvrstoće betona i njegove zrelosti ima četiri karakteristične faze a može se aproksimirati hiperbolom, adekvatnom procesu očvršćavanja.

U toku poslednjih četrdeset godina izvedeno je nekoliko matematičkih oblika funkcije zrelosti pa bi se gotovo moglo govoriti o "familiji funkcija" ali se ovde pominju samo one koje su značajnije doprinele razvoju *maturity* koncepta.

*Nurse-Saul*-ova funkcija je izvedena iz oblika:

$$f(T) = K T_c \quad (3.1)$$



Slika 3.2 - Približni oblik odnosa čvrstoće betona na pritisak i njegove zrelosti (49)

koji je Nurse dao 1949.god. da bi ga dve godine kasnije nakon obimnih istraživanja Saul dao u danas poznatom obliku:

$$f(T) = K (T_c + 10) \quad (3.2)$$

Istraživanja vršena u švajcarskim laboratorijama potvrđuju relevantnost ovog oblika i za visoke temperature (do 60°C) ali joj Lys, Danyel, Wely i Timz overavaju pouzdanost samo za interval od 5°C do 46°C. Treba reći da noviji radovi na tu temu (Byfors, 1980) ne daju potvrdu prethodnih stavova pa razliku treba potražiti u uslovima eksperimentalnih istraživanja. Ono što je od svih istraživača opšte prihvaćeno je valjanost formule isključivo za pozitivne temperature očvršćavanja.

Kvalitativni skok u procesu očvršćavanja, koji se na narednom grafiku može uočiti u zoni "prolaska" kroz nultu temperaturu, je dao motiv Nykenen-u da 1958. godine prethodnu formulu izrazi u



obliku:

$$f(T) = K (T_c + 15) \quad (3.3)$$

gde je konstanta  $K$  određena u zavisnosti od vrste cementa tako da joj vrednosti variraju u intervalu (0,2-0,4). Neki radovi *Mironov*-a potvrđuju valjanost ovog pristupa, ali samo na negativnim temperaturama. Nešto složeniji oblik formule za integraciju simultanog uticaja vremena i temperature dao je *Rastrup* (1954.god.) ali ga je *Bergstrom* prilagodio praktičnim potrebama:

$$f(T) = \sum \Delta t * 2^{\frac{T_c}{10}} \quad (3.4)$$

Sam pristup *Rastrup*-a bazira na poznatom principu da se sa povećanjem temperature za  $10^{\circ}\text{C}$  udvostručuje brzina hemijskog procesa hidratacije. Kao reporna veličina poslužila je 28-dnevna zrelost betona očvrslóg na  $t_v = 18,5^{\circ}\text{C}$ . Treba naglasiti da brzina hidratacije nije za svaki temperaturni režim ista (u cementnoj pasti sa stepenom rasta temperature hidratacija raste za 1-3%) pa ni navedena formula nije mogla izdržati kompleksnije provere ali je *Arrhenijus*-ova funkcija (poznata i kao *Hansen-Pedersen*-ova) danas u širokoj primeni i ima vrlo pogodan oblik:

$$f(T) = K * \exp \left( - \frac{E}{R T_k} \right) \quad (3.5)$$

pri čemu su:

$K$  - konstanta proporcionalnosti,

$T_c, T_k$  - temperature betona u  $^{\circ}\text{C}$  i  $^{\circ}\text{K}$  ( $T_k = 273 + T_c$ )

$E$  - aktivaciona energija (KJ/mol), i

$R$  - univerzalna gasna konstanta ( $8,31 \text{ J}/^{\circ}\text{K mol}$ )

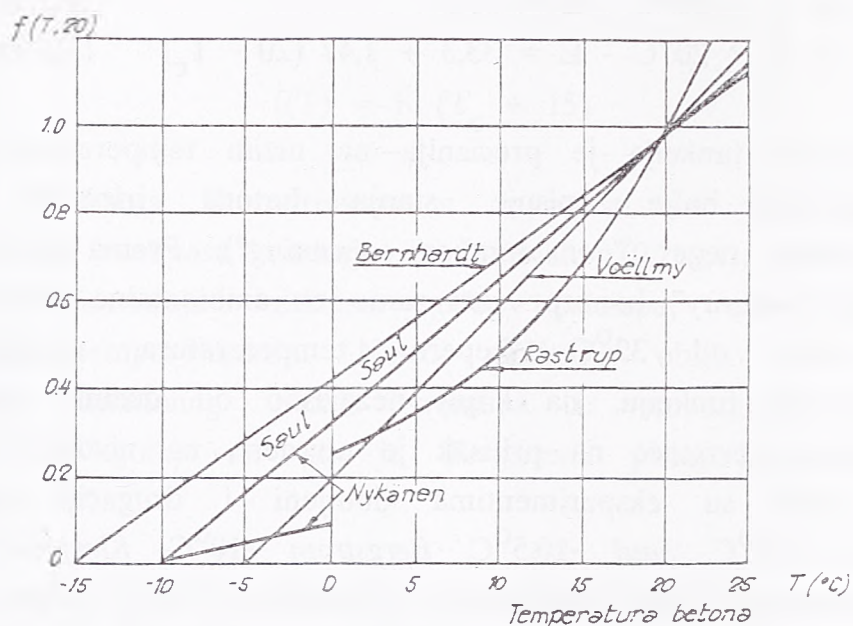
a shodno različitim temperaturnim režimima i aktivaciona energija je, prema predlogu *Freisleben-Hansen*-a i *Pedersen*-a (74):

$$\begin{aligned} \text{za } T_c < 20^{\circ}\text{C} \quad E &= 33,3 && \text{(KJ/mol)} \\ \text{za } T_c > 20^{\circ}\text{C} \quad E &= 33,3 + 1,47 (20 - T_c) && \text{(KJ/mol)} \end{aligned}$$

*Arrhenijus*-ova funkcija je preciznija na nižim temperaturama dok *Nurse-Saul*-ova bolje opisuje stanja betona izloženih višim temperaturama nege ("*hot weather concreting*"). Prema *Orchard*-u (49) čitav "*maturity*" koncept važi samo za ambientalne temperature starenja niže od  $32^{\circ}\text{C}$ . Reperna tempereratura, ugrađena u *Nurse-Saul*-ovu funkciju, na kojoj nezavisno od dužine negovanja nema prirasta čvrstoće na pritisak je utvrđena na nivou od  $T = -10^{\circ}\text{C}$ , mada su eksperimentima dobijeni i drugačiji rezultati: *Plowman*  $-11,7^{\circ}\text{C}$ , *Saul*  $-10,5^{\circ}\text{C}$ , *Bergstrom*  $-10^{\circ}\text{C}$ , *Kirejenko* i na  $-14^{\circ}\text{C}$  primećuje slabo očvršćavanje a *Nykenen* i *Wely* beleže  $-15^{\circ}\text{C}$  kao temperaturu na kojoj se očvršćavanje praktično prekida. Ova razlika dolazi kao posledica inertnosti eksperimentalnog postupka pri čemu beton uspeva da promeni svoje fizičko stanje i delimično očvrstne pre nego što mu temperatura padne do opisanog nivoa.

Procese koji zahvataju cementni gel na niskim temperaturama najbolje je opisao *Kirienko* koji niske temperature stavlja u kontekst opšte dehidratizacije cementne paste. Tanka opna koju zamrznuta voda formira oko nereagovanog dela čestice cementa ne zamrzava u potpunosti sve do temperature od  $-30^{\circ}\text{C}$  (opna koja obuhvata ceo gel zamrzava naravno puno ranije) pa je po *Kirienku* moguća određena hemijska reakcija i između takve opne, kao izvora vlage, i nehidratisanog zrna cementa. Podaci iz literature (1955.god.) govore da sva voda zamrzava tek na temperaturi  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Produkti procesa hidratacije se ne razlikuju u zavisnosti od toga pri kojoj su temperaturi nastali ali na višim temperaturama ( $40-50^{\circ}\text{C}$ ) je nešto drugačija njihova morfologija. Pad čvrstoće tako negovanih betona posledica je naglog razvoja hemijskih procesa u cementnoj pasti usled čega su geli porozniji pa i podložniji pojavi mikroprslina. Visoke ambientalne temperature se



Slika 3.3 - Usporedni pregled različitih verzija oblika odnosa temperature očvršćavanja i  $R_{T=20^\circ\text{C}}$  (31)

moraju posmatrati ne samo kao posledica dejstva kratkotalsnog sunčevog zračenja već i kao rezultat napora da se beton veštački postavi u okruženje koje će stvoriti uslove ubrzanog očvršćavanja. Takvim postupcima betonu se mogu zadati i temperature iznad  $50^\circ\text{C}$  pa je neophodno odrediti mehanizme za ocenu starosti termički tretiranih betona. Prethodni stavovi pokazuju da se ne možemo osloniti na opisane funkcije starenja pa se kao jedan od najargumentovanijih javlja predlog Mironov-a koji kao repernu čvrstoću uzima onu koju daje temperatura očvršćavanja od  $18^\circ\text{C}$ , ali pritom čini i napor da obuhvati izuzetno važan uticaj vrste primenjenog cementa. Polazeći od izraza:

$$\frac{a_{18}}{a_t} = \left( \frac{30 + t}{-30 + 18} \right)^n \quad (3.6)$$

u kome je  $t$  - temperatura očvršćavanja, može se vrlo lako doći do bilo koje dužine negovanja betona ( $a_t$ ) ukoliko se kao vrednosti parametra  $n$  (eksponenta) usvoje za:



a. brzoočvršćavajući portland cement	n = 1,98
b. visokoaktivni čist klinkerni portland cement	n = 2,10
c. portland cement sa 4-5% pucolana	n = 2,35
d. portland cement sa 10-14% pucolana	n = 2,80
e. šljako portland cement	n = 3,35
f. pucolanski portland cement	n = 3,52

Valjanost ovih parametara je verifikovana za režime do 100°C obzirom da u tom intervalu nema kvalitativnih promena procesa narastanja mehaničkih karakteristika izazvanih promenom temperature. Na niskim, negativnim temperaturama može se primeniti *Nykenen*-ova formula u obliku:

$$\frac{a}{a_t} = \frac{K (t + 18)}{28} \quad (3.7)$$

u koju temperaturu ( $t$ ) nižu od nule treba unositi sa negativnim predznakom a konstanta  $K$  ima vrednost 0,4 za visokoaktivni čisti klinkerni portland-cement. Da bi se tokom izvođenja mogao pratiti razvoj zrelosti mogu se ugraditi na karakterističnim delovima objekta posebni termo-elementi čije podatke beleže automatski pisači. Ovo je posebno korisno u početku izvođenja radova u uslovima, za izvođača, nepoznatih varijacija ambientalnih temperatura jer dozvoljava korigovanje tehničkih specifikacija i dužine nege, a omogućava kontrolu od strane službe za nadzor.

### 3.5. ŠTETNE POSLEDICE RADA U POSEBNIM USLOVIMA

Problemi rada u uslovima visoke temperature iziskuju studiozno proučavanje a da su problemi nedovoljno proučeni govore i neki noviji radovi (1, 5, 62). Slične probleme izazivaju i priliv toplote iz okruženja i nedovoljno brzo odavanje toplote iz mase

betonskog bloka koji očvršćava. Naime, kod visokih brana se uočava pojava prslina, formiranih u telu bloka, kao posledica sprečenih deformacija nastalih bilo zbog neujednačenih temperaturnih gradijenata unutar mase bilo usled skupljanja betona nastalog gubljenjem slobodne vode. Da bi se predupredila ovakva dejstva procesa egzotermije pravilnije je preferirati cemente niske toplote hidratacije ili metode hlađenja betona (već ugrađenog ili preko komponenti mešavine).

Cementi izuzetno niske toplote hidratacije sa znatno većom finoćom mliva gotovo eliminišu termičke prsline ali je obradljivost takvih betona (izražena kroz veličinu sleganja konusa i vreme očuvanja te veličine) dosta kraća u odnosu na normalne cemente. Temperaturni "pik" ( $\max t_p$ ) je niži i za  $5-6^{\circ}\text{C}$  nego kod standardnih cemenata niske toplote hidratacije što je sa stanovišta nege izuzetno povoljno - ali pritom i skupo jer su cementi ovog tipa znatno skuplji od običnih pa je oblast primene svedena na izuzetne slučajeve i preciznu tehnologiju rada.

"Hot weather" ambientalni uslovi pokazuju sledeća štetna dejstva:

- a. - pad krajnje čvrstoće ugrađenog betona;
- b. - povećana je opasnost od pojave prslina (temperatura, skupljanje);
- c. - raste količina vode potrebne za očuvanje željene konzistencije što daje porozniji beton, manje otporan na agresivna dejstva sredine;
- d. - vodopropustljivost raste kao funkcija potrebne količine vode;
- e. - estetski parametri (spoljni izgled betona) su često narušeni.

Problematiku pojave prslina *Abu-Tair* (1) analizira na bazi podele prslina na "pre-setting cracks", koje nastaju kao posledica procesa očvršćavanja, i "plastic shrinkage cracks", čija pojava zavisi od

karakteristika evaporacije. Obične prsline nastale usled procesa skupljanja materijala treba posmatrati van konteksta ovih "ranih" procesa. Naime, "*plastic shrinkage cracks*" nastaju kao posledica evaporacije izazvane razlikom parnih pritisaka između mladog betona i okoline a proces skupljanja koji se pritom javlja, može biti i 10 puta veći od ukupnog, dugotrajnog skupljanja betona. Štetnost ovih prslina proističe iz mogućnosti da se kroz nastale mikro-puteve stvori prostor agresivnom, korozionom dejstvu rastvorenih soli. Kvašenjem betona se smanjuje gradijent pritiska pare, a pojava prslina u ranoj fazi očvršćavanja može se kompenzirati *revibriranjem* još sveže (obradljive) mase čime se zatvara deo nastalih prslina.

Da evaporacija i kod hlađenih mešavina ili ugrađenog betona može biti značajna, govori podatak (1) da u takvim slučajevima za 24 sata može ispariti i preko  $20 \text{ kg/m}^3$ . Korisno dejstvo retardera i plastifikatora na količinu vode unete u mešavinu i intenzitet procesa hidratacije povoljno utiče i na pojavu "*plastic shrinkage cracks*". Bez obzira što postoje mnogi podaci o ispitivanju pojave prslina još uvek se sa sigurnošću ne zna kakva mešavina treba da bude da, u određenim klimatskim uslovima, ne bi došlo do pojave "plastičnih" prslina. *Shalon* (67) nije tako siguran da opisani postupak revibriranja (2-3 sata posle ugrađivanja) može biti pouzdan instrument, pa za obaranje gradijenta pare - generatora evaporacije preporučuje obilno kvašenje površine betona. Kako nega betona, kao deo proizvodnog procesa, u žarkim podnebljima raspolaže ograničenom količinom vode to primena aditiva ostaje neizbežna.



## 4. PROIZVODNJA, TRANSPORT I UGRADIVANJE BETONA

### 4.1. KONTROLA TEMPERATURE MEŠAVINE

U cilju ostvarenja projektovanih karakteristika betona nužno je tokom klasične proizvodnje betonskih nosača održavati temperaturu materijala unutar tehnološki povoljnog područja. Puna kontrola temperature komponenata mešavine je uslov da neki od aditiva uopšte ostvare svoj učinak, obzirom da im je dejstvo ograničeno na temperaturno područje uže od za proizvodni proces pomenutog, pa se i zbog toga u skladu sa očekivanim ambientalnim parametrima utvrduju najniže i najviše temperature ingredienata.

Cement, deponovan u silosima, se štiti od prekomernog zagrevanja farbanjem zidova silosa u belo ili cirkulacijom hladne vode kroz specijalne duple zidove silosa jer maksimalna dozvoljena temperatura  $t_c = 77^{\circ}\text{C}$  (*ACI Report 305R-77*) može pod intenzivnim kratkotalasnim zračenjem biti brzo premašena. Bojenjem silosa i cele fabrike betona u belo može se u najkritičnijem periodu dana redukovati krajnja temperatura betonske smese za skoro  $10^{\circ}\text{C}$ .

Agregat je, zbog svog značajnog težinskog učešća u masi mešavine, racionalno hladiti (ili grejati - u zimskom periodu) obzirom da je za pad temperature mešavine od  $1^{\circ}\text{C}$  neophodna promena kod komponenti od:

a. - krupan agregat	2,5 $^{\circ}\text{C}$
b. - voda	4,0 $^{\circ}\text{C}$
c. - sitan agregat	5,0 $^{\circ}\text{C}$
d. - cement	10,0 $^{\circ}\text{C}$

Zaštita agregata, u vidu natkrivenih deponija, elementarni je korak u kontroli temperature mešavine a kombinuje se i sa drugim

postupcima. Iskustvo pokazuje da se fenomen brze evaporacije može racionalno iskoristiti samo ako je  $t_a > 25^{\circ}\text{C}$  pa u toku noći treba prskati vodom samo onaj deo deponije agregata namenjenog upotrebi u narednih nekoliko sati. Za značajnije obaranje temperature (recimo kod hidrotehničkih objekata) koriste se rezervoari (silosi agregata) u koje se upumpava hladna voda ili se agregat putem konvejera ili trakastih transportera usporeno provlači kroz "kadu" sa ledenom vodom (voda može biti pomešana sa drobljenim ledom).

Postupci zagrevanja agregata (osim uobičajenog zagrevanja vode) su u primeni u situacijama kada se u dužem periodu vremena očekuje temperatura vazduha niža od  $-5^{\circ}\text{C}$ . Tada se krupan agregat greje do  $15^{\circ}\text{C}$  a najviša temperatura zagrevanja sitnog agregata je oko  $40^{\circ}\text{C}$ .

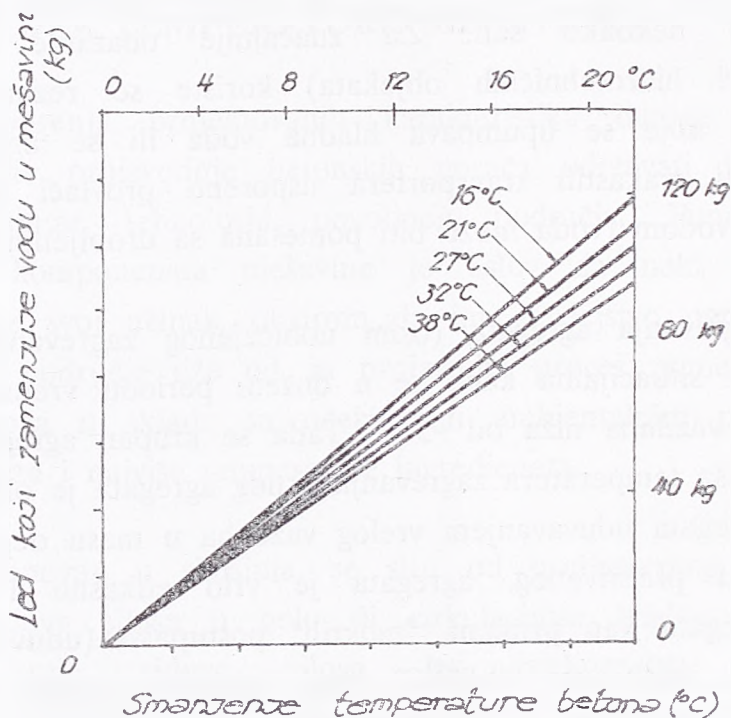
Grejanje agregata uduvavanjem vrelog vazduha u masu deponovanog, i PVC folijom prekrivenog, agregata je vrlo efikasno i ne menja vlažnost agregata kao primena "mokrih" postupaka (uduvavanje pare, potapanje u vodu na  $60-80^{\circ}\text{C}$ ) koji iziskuju znatno viši stepen kontrole.

Na temperaturu mešavine je najekonomičnije uticati preko vode koja se greje u bojlerima a kada treba hladi na jedan od tri načina:

1. - dodavanjem leda (drobljen, u obliku "čipsa" ili ljusti);
2. - primenom čvrstog karbon-dioksida;
3. - primenom tečnog nitroгена.

*Tečni nitrogen* je vrlo pogodan jer olakšava kontrolu tehnološkog procesa i praćenje temperaturne promene u vodi za razliku od leda koji, u zavisnosti od veličine zrna, brzine dodavanja novih količina, kretanja vode... čini proces mnogo manje kontrolabilnim. Dijagram na slici 4.1 pokazuje koliko se, supstitucijom vode ledom, može spustiti temperatura svežeg betona. Dijagram daje vrednosti za dve temperature supstituirane vode ali *Tipler* (77) navodi da se u gradilišnim uslovima postiže najviše 70% očekivane redukcije. *Nunez* tvrdi da se betonu ( $t_{bp} = 26^{\circ}\text{C}$ ) za pad

temperature od  $1^{\circ}\text{C}$  mora dodati 9 kg leda a to, primenjeno kao konstanta, definiše utrošak leda za željenu promenu temperature betona  $\Delta t_b$ .



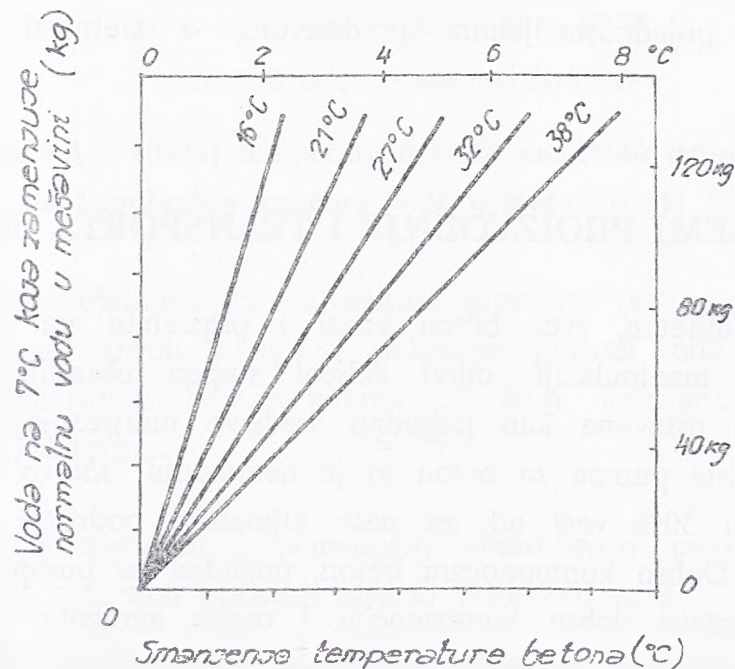
Slika 4.1 - Uticaj količine unetog leda na temperaturu svežeg betona (1)

Na reci *Parana* (Brazil) je u branu *Ilha Solteira* ugrađeno oko 3,5 miliona kubnih metara betona kome je skoro sva potrebna količina vode za mešanje supstituisana ledom. Kao dopunska mera krupan agregat je držan pod nadstrešnicama da bi u fazi pripreme za proces mešanja bio i sprinklerovan ohlađenom vodom. Iako su ambientalne temperature prelazile  $35^{\circ}\text{C}$  beton je ugrađivan sa početnom temperaturom od najviše  $10^{\circ}\text{C}$ . Treba naglasiti da je na ovom projektu kao vezivna komponenta primenjen cement blendiran sa  $120\text{-}150\text{ kg/m}^3$  pucolanskih dodataka.

Kontrola temperature svežeg, ugrađenog betona zasniva se na dozvoljenim limitima koji se javljaju u normativnim aktima. Tako *U.S. Bureau of Reclamation* dozvoljava  $\max t_{bp} = 32^{\circ}\text{C}$  a za hidrotehničke objekte samo  $10^{\circ}\text{C}$ , dok *ACI Report 305-72* masivnim



konstrukcijama dozvoljava najviše  $t_{bp} = 16^{\circ}\text{C}$ . Da bi opisao svu raznovrsnost lokalnih, ambientalnih uslova i dozvolio izvođaču radova veću slobodu ovaj drugi dokument, u svojoj revidovanoj verziji (iz 1977. god.) za uobičajene konstrukcije usvaja maksimalnu vrednost kao deo intervala:  $t_{bp} = 24-38^{\circ}\text{C}$ . Engleski stručnjaci (*Ministry of transport, Institution of Civil Engineers*) definišu opisani maksimum kao  $32^{\circ}\text{C}$  što je usvojeno i na indijskom podkontinentu za razliku od američkih institucija koje nemaju jedinstven stav pa tako uticajni *U.S. Corps of Engineers* zahteva značajno nižih  $29^{\circ}\text{C}$ . Naši propisi preciziraju da početna temperatura ne sme biti niža od  $5^{\circ}\text{C}$  niti viša od  $30^{\circ}\text{C}$ , u protivnom je nužna primena posebnih mera.



Slika 4.2 - Uticaj količine ohladene vode ( $7^{\circ}\text{C}$ ) na temperaturu svežeg betona (1)

Opsežne profilaktičke mere nalaze opravdanje ne samo u potrebi da se u toku ugradivanja betonu zadrži kvalitetna ugradljivost (na višim temperaturama beton zgušnjava pri čemu to nije posledica samo direktnog gubitka vlage već i hemizma procesa hidratacije i osobina cementne paste) već i da se time obezbedi projektovana

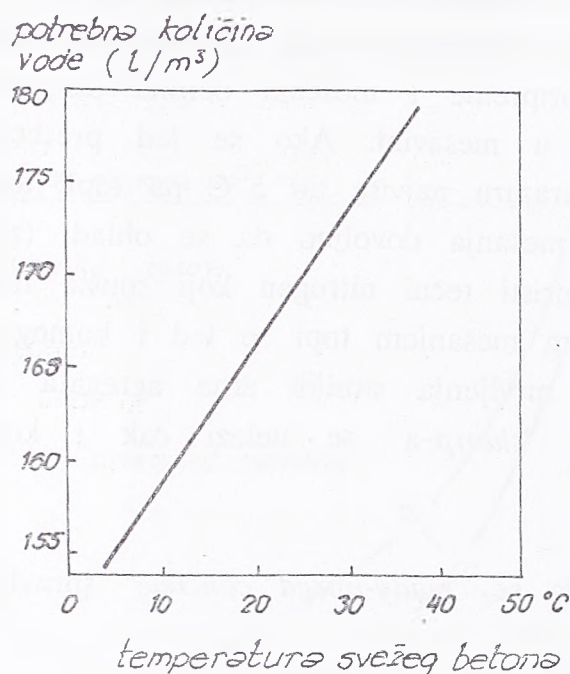
čvrstoća očvrstlog materijala. Ovo stoga što beton spravljen sa  $t_{bp} = 38^{\circ}\text{C}$  ima velike izgleda, ukoliko se ne preduzmu posebne mere, da za 28 dana ostvari i 15% manju čvrstoću od onog kome je bazni parametar bio  $t_{bp} = 18^{\circ}\text{C}$ . Na osnovu dostupnih radova *Evans-a*, *Hughes-a* i *Miller-a* (7) može se zaključiti da je idealna temperatura za ugrađivanje betona u intervalu  $5-10^{\circ}\text{C}$  (a sami preporučuju da se  $20^{\circ}\text{C}$  ne prelazi) pri čemu se u toku leta, 12-15 sati posle ugrađivanja, može očekivati temperaturni pik kao posledica akumulirane toplote hidratacije.

Sva ova raznolikost preporučenih tehnoloških postupaka i njihovih karakterističnih veličina još jedan je dokaz da se kompleksnom problemu izrade betona u posebnim uslovima ne sme prići sa uobičajenom pojednostavljenom predstavom, o štetnosti klimatskih uticaja.

## 4.2. PROBLEMI PROIZVODNJE I TRANSPORTA BETONA

Proizvesti kvalitetan, svež beton znači i pripremiti ga da u toku transporta i manipulacije održi željeni stepen obradljivosti. Kako se u žarkim uslovima kao pogodno sredstvo unutrašnjeg transporta masovno koriste pumpe za beton to je neophodni "slump" za ovakav postupak oko 30% veći od, za naše klimatsko područje normalnih, 75-100 mm. Dobro komponovani beton, pogodan za pumpanje u tom području, održava dobru konsistenciju i preko agregata; povećanjem učešća sitne frakcije agregata, dobijenog drobljenjem, na najmanje 15-20%. Time se smanjuju i segregacija i kasnije "znojenje" betona.

Da bi se konsistencija održala na željenom nivou među izvođačima je uobičajeno da se reaguje dodavanjem vode neposredno pre ugrađivanja. Dijagram na slici 4.3.(levo) pokazuje tendenciju da sa rastom  $t_{bp}$  sveže mase ubrzano raste procentualno povećanje



Slika 4.3 - Uticaj temperature sveže mešavine betona  
na neophodnu količinu vode u mešavini (1)

sadržaja vode neophodne za konstantnu promenu (za  $\Delta = 25$  mm) sleganja konusa. Desni dijagram pokazuje poznati odnos sleganja konusa i temperature svežeg betona pri istoj, konstantnoj količini vode unete u mešavinu.

Problemi sa ostvarenjem i očuvanjem obradljivosti materijala nisu jedini koje rad u žarkim uslovima stvara. Vrlo česti su i:

- problemi sa prašinom akumuliranom na deponijama,
- problemi sa topljenjem i ravnomernom distribucijom leda unetog u cilju spuštanja temperature betona, a
- čak i iskusnim operaterima u fabrici betona treba dosta vremena da steknu adekvatno iskustvo radi brze procene stanja svežeg betona u mešalici i efikasnog reagovanja (agregat apsorbuje vodu, voda ubrzano isparava, tropske kiše drastično remete vlažnost agregata na otvorenim deponijama...).



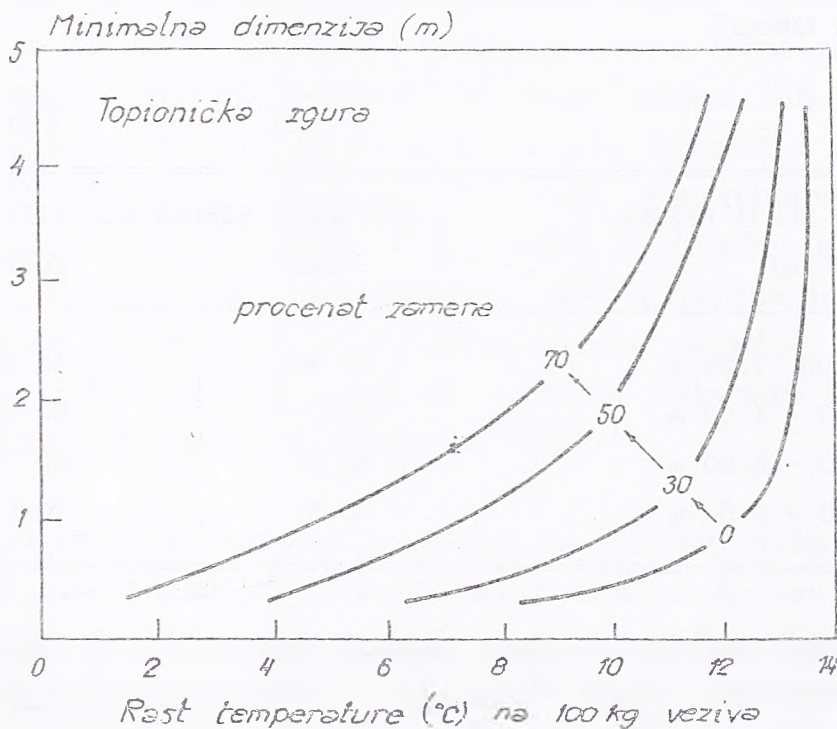
Primena leda kao supstituenta vode stvara tehnološke probleme jer se krupnija zrna drobljenog leda (ili krupniji "čips") ne stižu istopiti u toku pripreme i mešanja betona pa nema ni pravilne distribucije vlage u mešavini. Ako se led prethodno doda vodi spustiće joj temperaturu najviše do  $5^{\circ}\text{C}$  pa topli agregat ( $40-50^{\circ}\text{C}$ ) ne može tokom mešanja dovoljno da se ohladi (zato se za suvi, krupan agregat koristi tečni nitrogen koji spušta temperaturu i do  $-18^{\circ}\text{C}$ ). Produženim mešanjem topi se led i homogenizuje mešavina ali dolazi i do mrvljenja sitnijih zrna agregata pa i smanjenja obradljivosti (pad "slump-a" se beleži čak i kod mešavina sa plastifikatorima).

Imajući u vidu da se "ready-mixed concrete" spravlja na jedan od ovih načina:

- a. - u fabrikama betona a transportuje se sa ili bez izvršenog mešanja;
- b. - doziranjem i delimičnim mešanjem u fabrici betona sa "doradom" u auto-mešalici tokom transporta do mesta ugradnje;
- c. - doziranje je u fabrici betona a kompletno mešanje je u auto-mešalici posle izvršenog transporta a pre ugradivanja;

to treba naglasiti da nema dovoljno istraživanja uticaja samog redosleda unošenja komponenata u proces mešanja. Neki od publikovanih stavova zagovaraju izradu maltera (sa sitnim frakcijama agregata) kome se, u mešalici, dodaje i krupan agregat sposoban da u kratkom roku po celoj površini primi "fil" cementne paste i peska. Neka *L'Hermite*-ova istraživanja (40) problema projektovanja betonske mešavine pokazuju da bi kvalitetniji beton dala mešavina maltera (prethodno homogenizovana u mešalici) i krupnog agregata, koja se formira u posebnoj mešalici sa prinudnim mešanjem. Ovaj pristup bi mogao rešiti problem neadekvatne konsistencije betona na mestu ugradnje uz uslov da se precizno

doziranim retarderima zadrži početak vezivanja a plastifikatorima održi žitkost smese do potpunog obavijanja svih zrna krupnog agregata cementnom pastom.



Slika 4.4 - Uticaj delimične zamene portland cementa zgurom (3)

Nakon ugradivanja betona u masivne konstrukcije nekad dolazi do problema usled neravnog odavanja toplote (javljaju se i prsline usled termičkih napreznja) pa su poželjniji cementi sa malim sadržajem  $C_3A$  ili neki drugi blendirani zgurom. Dijagram na slici 4.4. pokazuje uticaj supstitucije dela OPC-a, ekspaniranom zgurom ili letećim pepelom, na rast temperature ugrađene betonske mase. Da bi se smanjila verovatnoća pojave "termičkih" prslina a zadržao dinamizam očvršćavanja preporučuje se minimalna doza supstituenta (tabela 4.1).

Problemi izrade kvalitetne mase kao osnove za dobijanje željenih vrednosti karakterističnih osobina betona, su naveli T.J. Tipler-a (77) da konstatuje da su mnoge postojeće tehničke specifikacije

verovatno nepotrebno "krute", jer ako na visokim temperaturama zaista treba više vode zašto se limitira veličina sleganja konusa. Ako je to, kaže on, zbog opasnosti od povećanog skupljanja, šta to smeta "konstruktivnom" betonu koji će u toku eksploatacije "podupirati tapete".

Tabela 4.1.

DEBLJINA SLOJA BETONA (m)	MINIMALNI STEPEN SUPSTITUCIJE	
	PEPEO	ZGURA
VIŠE OD 1,00 m	20 %	40 %
1,00 - 1,50 m	25 %	50 %
1,50, - 2,00 m	30 %	60 %
2,00 - 2,50 m	35 %	70 %

Očito je da ove dileme imaju logičku osnovu ali se do većeg "slump-a" ne sme dolaziti dodavanjem "očekivanog gubitka vode" (što zagovara i *Orchard* (49)) još u fazi primarnog doziranja ingredijenata jer tada u toku mešanja dolazi do izražene segregacije. Mogući putevi pre leže u oblasti "retempering-a" a svi slični naporu moraju kao cilj imati inženjersko razlikovanje tehničkih specifikacija za različite tipove konstrukcija, kako bi se preko "elastičnijih" propisa došlo do adekvatnijeg tehnološkog postupka i jeftinijeg betona.

Jedan od danas široko praktikovanih postupaka je primena aditiva *water reducer-a* koji se, u slučaju lignosulfonata uglavnom doziraju u sledećim količinama (u odnosu na težinu cementa):

za temperature betona 22-24°C	3,5%
25-27°C	4,5%
28-30°C	5,5%
za temperature betona 30°C	preko 5,5%

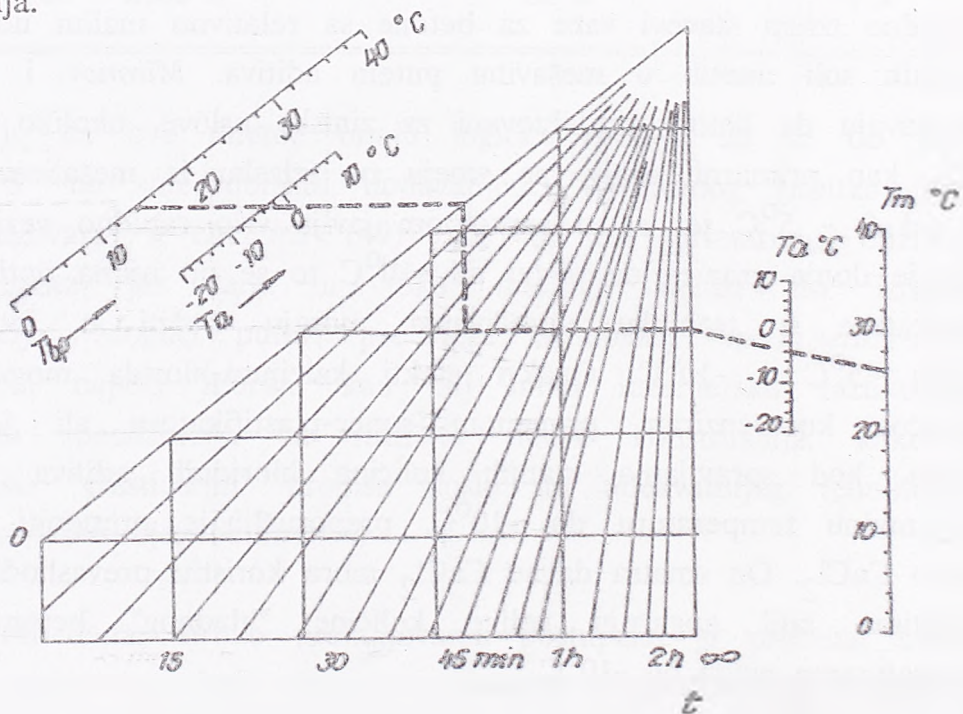


Mešavine za rad u zimskim uslovima traže manju količinu vode ali se obradljivost betona omogućava primenom aditiva a u određenim slučajevima, za blaže temperaturne režime, valja smanjiti i w/c odnos uvećanjem količine cementa (pri  $w = \text{const.}$ ). Na ovaj način, povećanom toplotom egzotermije, mogu se izbeći skupi zahvati na organizovanju i primeni posebnih mera nege betona. Istraživanja su u ovoj oblasti brojna i raznovrsna pa su tako *Murdock* i *Blackledge* su analizirali *winter concreting* u svetlu temperaturnih uslova koje sveža betonska mešavina mora ispuniti u trenutku ugrađivanja. Obzirom da se u toku transporta gubi deo neophodne toplote oni smatraju da minimalnih  $t_{bp} = 10^{\circ}\text{C}$  treba merama veštačkog zagrevanja podići za  $3-8^{\circ}\text{C}$  čime je tehnološki opravdani maksimum zagrevanja ingredijenata limitiran temperaturom od  $20^{\circ}\text{C}$ .

Prethodno izneti stavovi važe za betone sa relativno malim učešćem hloridnih soli unetih u mešavinu putem aditiva. *Mironov* i *Krilov* upozoravaju da betoni projektovani za zimske uslove, ukoliko imaju  $\text{CaCl}_2$  kao primarni aditiv, ne smeju na izlasku iz mešalice imati više od  $3 - 5^{\circ}\text{C}$  jer se u suprotnom javlja vrlo rapidno vezivanje. Kako je donja granica na nivou od  $-10^{\circ}\text{C}$  to se po njima optimalne temperature u trenutku ugrađivanja moraju tražiti u intervalu između  $-5^{\circ}\text{C}$  i  $-10^{\circ}\text{C}$ . Ovakvi efekti kalcijum-hlorida mogu biti delimično kompenzirani primenom super-plastifikatora ali je po *Sizov-u*, kod spravljanja manjih količina hloridnih aditiva a za ambijentalnu temperaturu do  $-10^{\circ}\text{C}$ , preporučljivije primeniti  $\text{NaCl}$  umesto  $\text{CaCl}_2$ . On smatra da se  $\text{CaCl}_2$  mora koristiti prevashodno na projektima koji angažuju velike količine "hladnog" betona na temperaturama nižim od  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Opisane mešavine obezbeđuju da betoni sa većim učešćem hloridnih soli dostižu za 7 dana  $25-30\% R_{28}$  dok na kraju 28 dana njihova čvrstoća ne prelazi  $50-60\% R_{28}$ . "Hladni" betoni dakle traže celih 100 dana da bi se u pogledu mehaničkih karakteristika izjednačili sa "toplim" betonima.

U tehnološkom smislu je problem donekle olakšan činjenicom da ingredijenti, koji ne smeju imati ledena sočiva ili smrznute grudve (sitan agregat), u opisanim uslovima ne moraju biti zagevani obzirom da takav beton zadržava obradljivost i na  $-8^{\circ}\text{C}$ . Sizov za ovakve projekte preporučuje lomljeni agregat, u najgorem slučaju bar za najkrupniju frakciju, obzirom ovaj da povećanim trenjem povoljnije utiče na homogenizaciju vlage u mešavini. Izuzetnu važnost "hladnih" betona za rešavanje problema koji prate *winter concreting* naglašava podatak da se samo za zagrevanje 10 tona peska, sa uobičajenim sadržajem vlage od 6%, mora utrošiti bar 200 000 KJ na pretvaranju sledene vlage u vodu, a tek tada može početi napor da se ta voda zagreje do neophodnog tehnološkog minimuma. Zato deponije agregata moraju biti tako organizovane i projektovane da na efikasan način štite sve frakcije od dejstva okruženja.



Slika 4.5 - Nomogram za ocenu stepena hlađenja betona u toku njegovog transporta (41)

Bez obzira u kakvim se uslovima radi temperaturu mešavine treba tako projektovati da beton bude ugrađen sa optimalnom temperaturom za usvojenu vrstu nege. Polazeći od činjenice da za 10 minuta

transporta, i za svaki stepen razlike ( $t_b - t_v$ ), beton gubi između 0,007 - 0,05°C (10), nomogram na slici 4.6 može da se koristi i u vidu nešto jednostavnije formule:

$$\Delta t = m \cdot (t_{bu} - t_a) \cdot T \quad (4.1)$$

u kojoj je:

- m - konstanta transportnog sredstva (za auto-mešalicu je vrednost konstante  $m = 0,25$ )
- $t_{bu}$  - temperatura betona neposredno pre ugradivanja (°C)
- $t_a$  - ambientalna temperatura (°C)
- T - vreme transporta betona (h).

Vodeći računa o činjenici da konsistencija zavisi i od temperature betona, to za beton zagrejan do 40°C (radi kompenzacije očekivanih toplotnih gubitaka) treba projektovati mešavinu sa 10% više vode u odnosu na standardnu specifikaciju, a za više  $t_{bp} = 60^\circ\text{C}$  istoj betonskoj mešavini treba i 20% više vode.

### 4.3. UGRADIVANJE BETONA U POSEBNIM USLOVIMA

Upravo zato što se javlja veliki pad obradljivosti (u normalnim uslovima 3-4 sata posle spravljanja) u žarkim uslovima treba biti posebno oprezan i obezbediti nešto više oplatnih i pervibratora kao i odgovarajuću "hladnu" rezervu koja će pouzdanost ostvarenja projektovanih učinaka zadržati na željenom nivou.

Specifikacija ASTM C94 (29) propisuje da sam istovar i ugradivanje betona budu izvršeni najkasnije za 90 minuta nakon izrade betonske mešavine ili za vreme u toku koga bubanj auto-mešalice ostvari 300 rotacija (merodavno je kraće od ovih vremena). U letnjim režimima iz tehnoloških razloga limit se može spustiti na 60 ili čak 45 minuta. Ipak, za "time of handling" je najčešća preporučena granica 30 minuta. Vreme transporta utiče ne samo na gubljenje



toplote već i na ubrzano isparavanje vode iz zagrejane betonske mase pa ga treba maksimalno skratiti. Ali i ugrađivanje remeti standardne procedure pa je tako uticaj dužine vibriranja na čvrstoću betonskih uzoraka (15/15/15) *Kayyali* (34) ispitivao za sledeće uslove:

- $t_b = 32^{\circ}\text{C}$  a to je maksimalna dozvoljena temperatura koju dopušta *Institution of Civil Engineers, Ministry of Transport*;
- prosečna relativna vlažnost u toku negovanja je 20%

i došao do zaključka da "time of handling" u takvim uslovima ne sme nikako biti duže od 40 minuta jer usled rane i neravnomerne pojave očvršćavanja betona dolazi do drastičnog pada  $R_{28}$ . Za temperature spravljanja i negovanja betona više od pomenutih nažalost nema relevantnih eksperimentalnih rezultata.

*Orchard* ipak daje nešto praktičnija uputstva. On konstatuje (49) da se sa svakim satom odloženog ugrađivanja gubi oko 4 cm *slump*-a pa u slučaju očekivanih zastoja upućuje na dodavanje one količine vode koja će omogućiti projektovanu konsistenciju u trenutku ugrađivanja. Ovo uputstvo se ipak mora primiti sa izvesnom dozom rezerve i povećane kontrole (u slučaju primene) jer višak vode u trenutku početka mešanja izaziva opisanu segregaciju sadržaja mešavine.

## 5. PROBLEMI U VEZI SA NEGOVANJEM BETONA

### 5.1. METODE I TEHNOLOŠKI RAZLOZI NEGE BETONA

Ističući važnost nege betona *Birt* (7) navodi da je samo u periodu od 1925 - 1960. godine objavljeno preko 800 radova na tu temu pri čemu je redosled, dat po hijerarhiji važnosti i broju članaka posvećenih razlozima nege betona, vrlo interesantan. Uticaj ambientalnih uslova nije najatraktivnija tema, što je i logično obzirom da prirodni procesi nisu kontrolabilni i teško se modeliraju, ali mu nije ni pridat adekvatan značaj. Redosled aspekata istraživanja (prema broju posvećenih radova) je sledeći:

1. - očuvanje betona u uslovima takve vlažnosti u kojoj će hidratacija cementa biti izvršena u najvećem stepenu;
2. - uticaj na razvoj mehaničkih karakteristika;
3. - kontrola posledica promene temperature u betonu;
4. - kontrola sadržaja vlage u betonskoj masi; i
5. - negovanje betona u određenim klimatskim uslovima.

Obzirom da je nega betona proces stvaranja i održavanja neophodnog nivoa vlažnosti i temperature u fazi kada mlad beton razvija svoje mehaničke karakteristike to negu betona u posebnim uslovima treba posmatrati u svetlu činjenice da do hidratacije "aktivnog" materijala može doći samo u kapilarima bogatim vodom a ona u pomenutim uslovima, ili rapidno nestaje (evaporira) ili menja svoje fizičko stanje, pa time i prelazi u inertno stanje. Zato se optimalna nega mora organizovati u oba tehnološka pravca:

- a. - radi sprečavanja gubitka aktivne komponente vode unete u mešavinu; i
- b. - radi uravnoteženja w/c - odnosa u toku očvršćavanja kompenziranjem nastalih gubitaka vrlo brzo posle njihove pojave.

Profilaktički pristup (a) je svojstven i zimskim i letnjim uslovima rada dok se problemi sa gradijentom pritiska pare javljaju prevashodno u uslovima visokih ambientalnih temperatura i niske relativne vlažnosti vazduha. Podatak da u takvim uslovima, posle 6 meseci starenja, beton (bez nege) ostvaruje samo 42% čvrstoće pravilno negovanog betona (63) zahteva studiozan i selektivan pristup raspoloživim postupcima nege jer oni pored efikasnosti dejstva moraju biti, sa stanovišta utroška materijala i ljudskog rada, krajnje ekonomični.

Pored pomenutih razloga kvalitetna nega betona dovodi do povećane otpornosti na abraziju i spoljne uticaje obzirom da smanjuje permeabilnost očvrste mase, ali i štiti površinu sveže mase od mehaničkih oštećenja.

Nega betona doprinosi svodenju temperaturnog gradijenta (unutar mase izlivenog bloka) ispod granice pojave velikih "termalnih" prslina na taj način što reguliše odavanje toplote u vreme intenzivnog razvoja hidratacije pa time utiče i na pad vodopropustljivosti očvrste mase. Vrlo važan uticajni parametar je moduo površine betonskog elementa ( $M_p$ ) koji je svojevrsan "instrument" za obaranje temperaturnog gradijenta, pa u zimskim uslovima visoki  $M_p$  mora biti praćen kvalitetnom oplatom sposobnom da zaštiti razučeni betonski presek od temperaturnih promena.

Nosači sa velikim modulom površine ( $M_p$ ) su leti naročito osetljivi na evaporaciju a po *Birt*-u se (pri r.v. = 70%,  $t_a = 21^{\circ}\text{C}$  i vetru od 9 m/s) gubi oko 0,5 l/čas i to po svakom kvadratnom metru izložene površine. To znači da betonska ploča  $d = 15$  cm može, nezaštićena od klimatskih uticaja, za samo 5-6 sati izgubiti i 10% ukupne vlage čime se umnogome usporava hidratacija, koja kod pada relativne vlažnosti cementne paste ispod 85% prestaje da funkcioniše i "reanimira" se tek naknadnim, obilnim kvašenjem ugroženog nosača.



*Dransfield* (19) smatra da taj gubitak može biti i duplo veći ali "prekidač" hidratacije vezuje za nižu relativnu vlažnost paste (80%). On u ovakvom rapidnom gubljenju mase vidi korene rapidnog skupljanja koje, u fazi narastanja čvrstoće, izaziva plastične prsline. Opisani uslovi evaporacije, nimalo ekstremni (videti Poglavlje 1), mogu zaštitnom sloju betona od 20 mm za samo nedelju dana delovanja mogu definitivno onemogućiti hidrataciju i time dezavuisati sve pretpostavke o pouzdanosti, trajnosti nosača. Agresivno podneblje Srednjeg Istoka bogato solima rastvorenim u vodi pospešuje koroziju armature a u sub-polarnim uslovima pod dejstvom mraza se u poroznoj strukturi zaštitnog sloja razornim dejstvom leda eliminiše deo pritisnute zone preseka i time umanjuje njegova nosivost.

Metode nege mogu se podeliti, shodno pristupu istraživača, na više načina pa je tako za grupu "letnjih" metoda pogodna *Orchard-ova* (49) podela:

1. - na one koje uključuju korišćenje vode u vidu taloga ili vlažnih zaštitnih materijala; i
2. - na one koje minimiziraju potrebu za vodom primenom vodonepropustljivih medija ili korišćenjem drugih sredstava sličnih efekata.

Sam autor prvu grupu smatra neracionalnom, jer iako omogućava dobijanje projektovanih kvaliteta u najvećoj meri, zahteva veliki ljudski rad kako na praćenju promena u betonu tako i na očuvanju ravnomerne distribucije vlage.

Gruba podela "zimskih" metoda svela bi ih na:

1. - metode koje ne obuhvataju direktno zagrevanje betonske mase;
2. - metode koje vrše zagrevanje betonske mase; i
3. - metode kombinovanih dejstava na betonsku masu;

a detaljniji pregled i analiza postojećih metoda dati su u Poglavlju 6. U kontekstu navedenih osobina tehnološkog postupka jasno je da troškovi nege betona zavise od niza parametara među kojima su najuticajni:

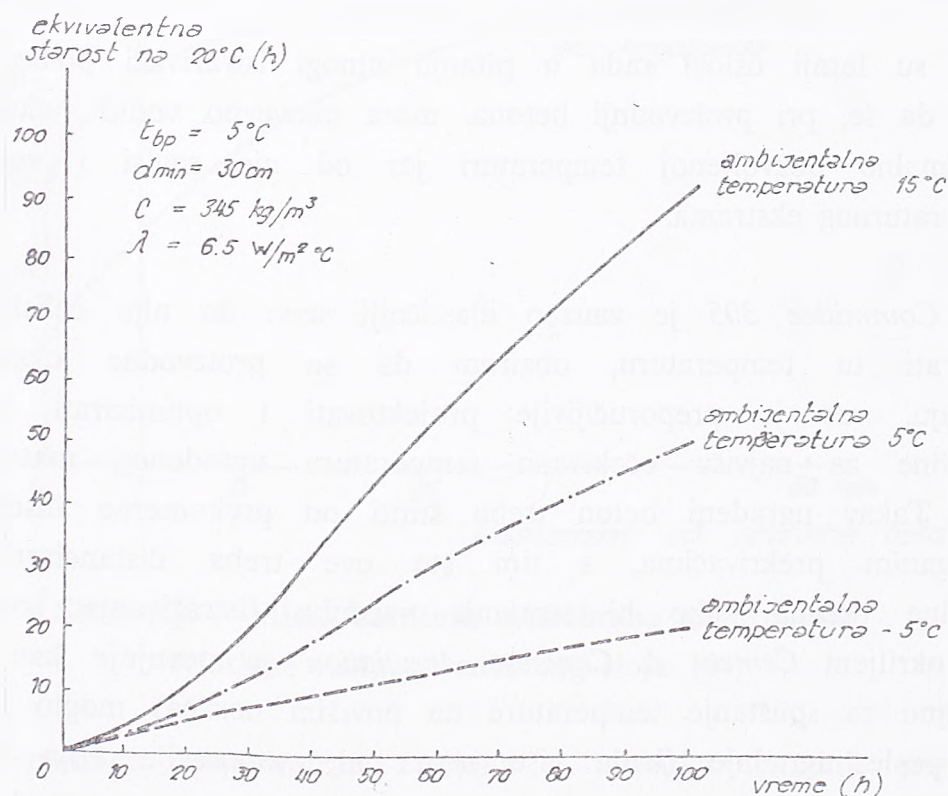
- 1.- specifikacije precizirane ugovorom,
- 2.- geografski položaj gradilišta,
- 3.- odlike konstrukcije (tip, veličina, način izvođenja),
- 4.- stepen izloženosti betona,
- 5.- lokalni mikro-klimatski uslovi, i
- 6.- usvojeno sredstvo ("medijum") za negovanje.

Kada su u pitanju sredstva za promenu temperature betonske mešavine, odnosno ugrađenog betona, *Scanlon*-ova istraživanja govore da se za 1<sup>0</sup>F pada temperature 1m<sup>3</sup> troši 1\$ ukoliko je hlađenje tečnim nitrogenom a 40 centi ako je primenjen drobljeni led kao supstituent dela potrebne količine vode. Hlađenje vodom pripremljenom toplotnim pumpama je daleko jeftinije. Iako su pomenute veličine irelevantne za donošenje definitivnog zaključka o efikasnosti pojedinih postupaka dovoljno su ilustrativne za odnose u pogledu pratećih troškova.

## 5.2. DUŽINA NEGOVANJA KAO FUNKCIJA PROMENE TEMPERATURE UGRADENOG BETONA

Ukupna količina toplote koju oslobada ugrađeni beton ne zavisi od oblika nosača (njegovog modula površine) ali obzirom da se beton ponaša kao vrlo loš provodnik to usled otežanog emitovanja toplote raste temperatura u jezgru bloka sa malim  $M_p$ , srazmerno se ubrzava hidratacija... i u tim uslovima nosač brže ostvaruje očekivani stepen čvrstoće omogućavajući početak skidanja oplata. Inertnost betona kao provodnika ipak ima i svoje pozitivno dejstvo jer ne dopušta adekvatnu reakciju mase na skokovite promene ambientalne

temperature. Neka domaća istraživanja (32) pokazuju da starost betona, u trenutku kada se uzorak izloži dejstvu niskih temperatura, nema uticaja na brzinu hlađenja a da početna temperatura betona vrlo malo utiče na dužinu hlađenja do kritične temperature. Međutim, Scanlon (66) naglašava da je početna temperatura betona izuzetno važna jer što je viša to je i pad ( $\Delta T$ ) u toku noći veći, pa preporučuje mere kako bi  $\Delta T$  bilo manje od  $22^{\circ}\text{C}$ , jer u protivnom temperaturni gradijent inicira stvaranje prslina. Ovu temu dotiče i rad (94) koji u toku prvih 24 sati nakon skidanja oplata, u nosačima sa većim  $M_p$  dozvoljava pad od  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$  do  $25^{\circ}\text{C}$  dok blokovi sa malim modulom površine traže  $\max \Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ . Veliku važnost oblika preseka na izbor metode negovanja pokazuje i sam podatak (32) da se beton ( $t_{bp} = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{va} = -20^{\circ}\text{C}$ ) hladi 2,5 puta brže ako ima razuden presek ( $M_p = 12$ ) nego ako je nosač kompaktan i ima minimalan moduo površine ( $M_p = 3$ ).



Slika 5.1 - Uticaj ambijentalne temperature na sazrevanje betona i emitovanje hidratacione toplote veziva (27)



Za pravilno emitovanje toplote hidratacije, pojavu vrlo važnu za samu negu, nužan je pravilan izbor vrste oplata, koja je regulator kondukcije betonske mase, a to znači i materijala od koga se izrađuje i njegove debljine a posebno vlažnosti (slika 5.1).

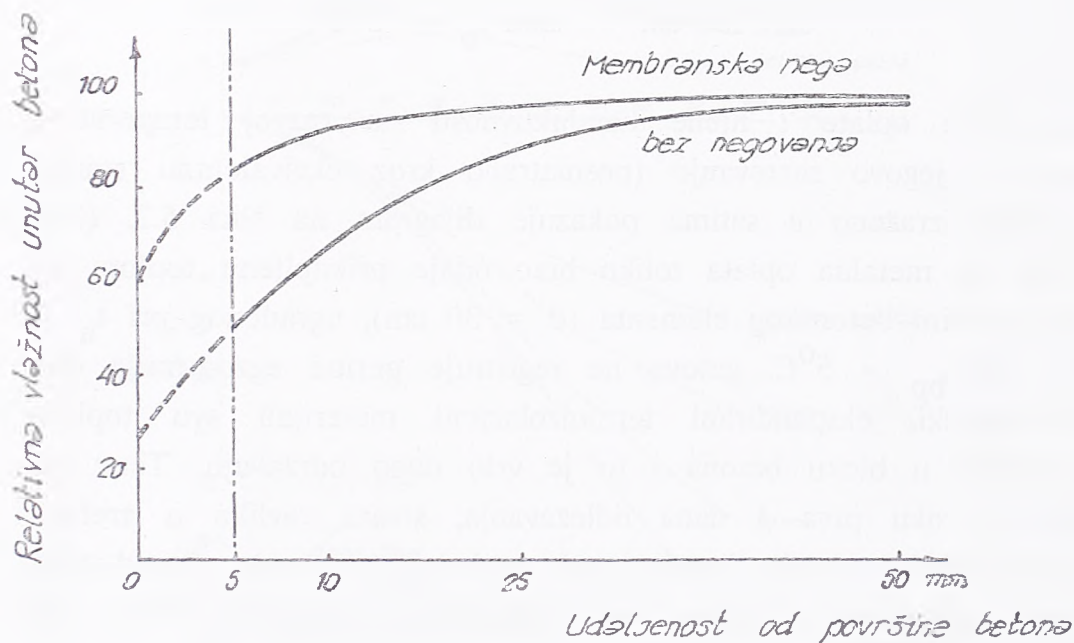
Eliminacija vršne temperature vrši se ranijim skidanjem oplata čime se, povećanom kondukcijom, obezbeđuje bolje hlađenje - ali i beton izlaže dejstvu termalnog šoka. Na dužinu perioda u kome će biti pod zaštitom oplata utiču pre svega:

1. - vrsta cementa i njegov kvalitet (klasa);
2. - srednja temperatura vazduha u toku odležavanja;
3. - temperatura betona pri ugrađivanju;
4. - vrsta i karakteristike oplata, i
5. - oblik preseka ( $M_p$ ) a naročito minimalna dimenzija nosača.

Kada su letnji uslovi rada u pitanju mnogi istraživači polaze od stava da se, pri proizvodnji betona, mora obavezno voditi računa o maksimalno dozvoljenoj temperaturi jer od nje zavisi i veličina temperaturnog ekstrema.

*ACI Committee 305* je zauzeo elastičniji stav: da nije celishodno limitirati tu temperaturu, obzirom da se proizvodne okolnosti menjaju, već je preporučljivije projektovati i optimizirati sastav mešavine za najvišu očekivanu temperaturu ugrađenog materijala (74). Takav ugrađeni beton treba štiti od prekomerne insolacije i laganim prekrivačima, s tim što ove treba distancirati od površine betona kako bi strujanje vazduha (istraživanje izvršeno pod okriljem *Cement & Concrete Assotiation* ga ocenjuje kao vrlo povoljno za spuštanje temperature na površini nosača) moglo i 5-6 sati posle ugradnje (kada više nema ni evaporacije koja iznosi toplotu) da usporava rast temperature. U suprotnom, prekrivači stvaraju efekte "staklene bašte" dižući temperaturu za novih 5-6<sup>0</sup>C o čemu ima i precizno merenih rezultata u referentnim radovima (10).

Jedan od izuzetno jednostavnih a jeftinih postupaka redukovanja temperature ugrađenog betona je *sprinklerovanje* magle od sitnih vodenih kapljica iznad površine betonskog nosača. Veštačkim podizanjem vlažnosti sloja vazduha iznad površine betona (u uslovima visokih temperatura) obezbeđuju se neophodni uslovi za povoljno dejstvo intenzivne evaporacije koja, u datom slučaju, apsorbuje deo toplote betonske mase ali ne redukuje vlažnost osetljivost površinskog sloja. Postupak ima tehnološki nedostatak u meri da je osetljiv čak i na sporo kretanje vazduha jer zbog nastale neravnomernosti raspodele "taloga" mogu nastati neravnomernosti gradijenta pada temperature koji u kombinaciji sa unutrašnjim naponima može dati i prsline.



Slika 5.2. - Uticaj zaštitnih membrana na promenu relativne vlažnosti zaštitnog sloja (64)

O minimalnim temperaturama betona u trenutku ugradnje postoje različita mišljenja a ona u mnogome zavise od usvojene metode rada (videti Poglavlje 6) ali je sa stanovišta praktične primene posebno interesantan stav nekih britanskih specifikacija, izdatih

od zvaničnih institucija kao što su *Ministry of Public Building and Works, Institution of Civil Engineers, Ministry of Transport*. One zahtevaju za beton minimum temperature sazrevanja od  $5^{\circ}\text{C}$  i to tokom 3 dana nakon ugradnje, odnosno minimum  $15^{\circ}\text{C}$  ako pravilna nega traje 2 dana, čime se garantuje formiranje kvalitetnih uslova za dalji razvoj mehaničkih karakteristika. ovo je dakle praktična primena "maturity" koncepta. Za rad u zimskim uslovima ekvivalentne ACI preporuke se vezuju za debljinu betona izgrađenog elementa, pa je za debljinu:

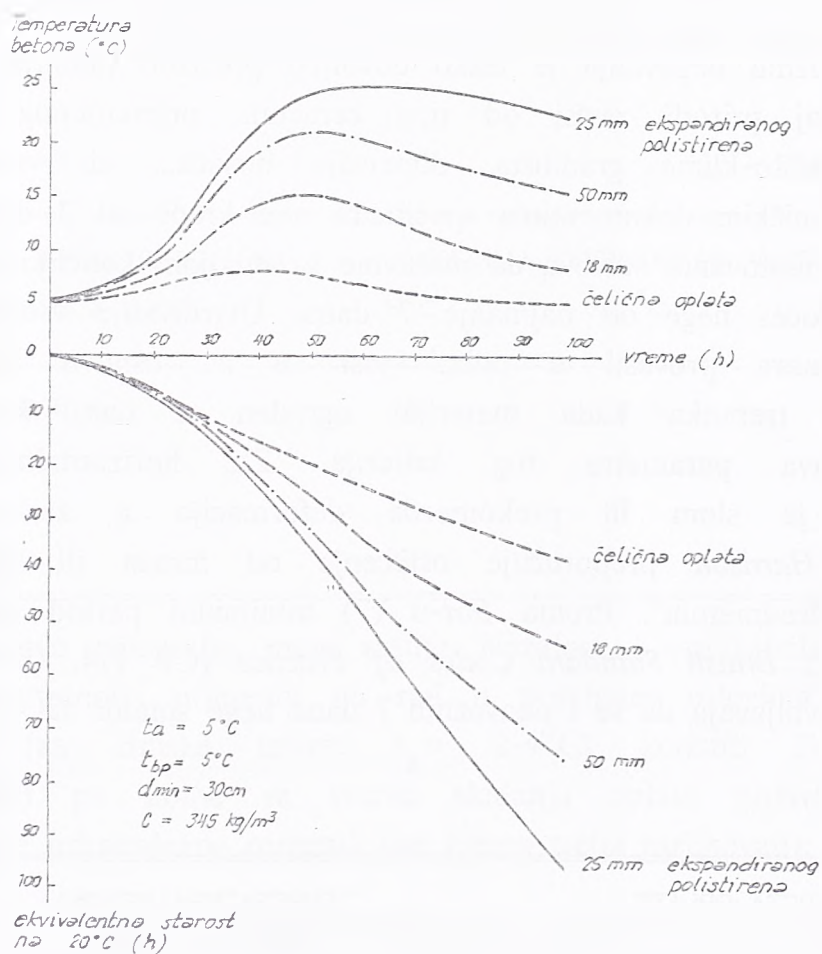
$d < 30 \text{ cm}$	$\min t_b = 13^{\circ}\text{C}$
$30 - 90 \text{ cm}$	$\min t_b = 10^{\circ}\text{C}$
$90 - 180 \text{ cm}$	$\min t_b = 7^{\circ}\text{C}$
$d > 180 \text{ cm}$	$\min t_b = 3^{\circ}\text{C}$

Uticaj vrste oplata i njene konduktivnosti na razvoj temperature betona i njegovo sazrevanje (posmatrano kroz ekvivalentnu starost na  $20^{\circ}\text{C}$ ) izraženo u satima pokazuje dijagram na slici 5.2. (27). Vidi se da metalna oplata toliko brzo odaje prikupljenu toplotu da se na površini betonskog elementa ( $d = 30 \text{ cm}$ ), ugrađenog pri  $t_a = 5^{\circ}\text{C}$  i sa  $t_{bp} = 5^{\circ}\text{C}$ , gotovo ne registruje period egzotermije dok neki veštački, ekspanzirani termoizolacioni materijali svu toplotu akumuliraju u bloku betona i tu je vrlo dugo održavaju. Time se, recimo u toku prva 4 dana odležavanja, stvara razlika u zrelosti od oko 150% u korist betona pod zaštitom polistirena. Pored toga dijagram pokazuje i značajan rast temperature betona (sa  $5^{\circ}\text{C}$  i do  $25^{\circ}\text{C}$ ) u kvalitetnoj oplati pa u skladu sa *Saul*-ovim rezultatima istraživanja (49) ne treba dozvoliti da temperatura u sveže ugrađenoj masi, u prvih par sati tretmana, bude viša od  $50^{\circ}\text{C}$  jer može inicirati razaranje primarne strukture cementne paste. Uravnoteženi bilans toplote se postiže izborom vrste cementa i doziranim zagrevanjem betonske mešavine.

U slučaju potrebe za frekventnom upotrebom kompleta skupe oplata (ritam skidanja posle 3-4 dana) na vrlo niskim temperaturama u



bivšem SSSR-u u primeni je čest postupak tretmana betona naizmeničnom strujom. On podrazumeva mali gradijent zagrevanja mladog betona od 5-6°C, pri čemu u prvih 24 sati vršna temperatura tretirane mase ne sme preći  $t_D = 50^\circ\text{C}$ . Ovaj limit se mora strogo poštovati sve do trenutka kada beton, nakupivši neophodnu čvrstoću na zatezanje, ne postane otporan na neravnomernosti temperaturnih dejstava a zatim se temperatura može, za fazu izotermije, podići i na 70°C.



Slika 5.3 - Uticaj kvaliteta termoizolacije na sazrevanje betona i promenu srednje temperature ugrađenog betona (7)

Osetljivost betona na temperaturne promene nalazi adekvatan odgovor u obaveznom uslovu da ni pad temperature prilikom hladenja ne sme biti brz - do nivoa ambijentalne temperature dolazi se kroz

24 sata hladenja betona. Za sitnozrne betone ( $\max D = 20 \text{ mm}$ ) gradijent pada temperature je oko  $28^{\circ}\text{C}$  a za one sa standardnom granulometrijom agregata ne više od  $22^{\circ}\text{C}$ . *Taylor* navodi (83) da se primenom čistog Portland cementa za samo 3 dana može realizovati blizu  $70\% R_{28}$  što ima ekvivalent u zrelosti od 2500 do  $2800^{\circ}\text{Ch}$ . Autor metodu ipak ne preporučuje obzirom da njegovi podaci pokazuju da je postupak skup jer nosi 25-30% od ukupne cene betona.

Samu dužinu negovanja je teško dovoljno precizno planirati jer ona po svojoj prirodi zavisi od tipa cementa, primenjenog postupka nege, mikro-klime gradilišta, dimenzija nosača... ali vreme koje se u tehničkim dokumentima specificira nije kraće od 3 dana, mada ima argumentovanih stavova da mešavine sa manjom količinom cementa traže proces nege od najmanje 7 dana. Utvrđivanje vremena koje beton mora provesti u oplati vrši se na osnovu kriterijuma, odnosno trenutka kada materijal ugrađen u datu konstrukciju zadovoljava parametre tog kriterija. Za horizontalne nosače kriterij je slom ili prekomerna deformacija a za vertikalne nosače *Harrison* preporučuje oštećenje od mraza ili od "udara tvrdim predmetom". Prema *Birt-u* (7) minimalni period nege je 4 dana dok *British Standard Codes of Practice* (CP 114, CP 115, CP 116) dozvoljavaju da se i obaveznih 7 dana nege smanji na 4 dana,

Tabela 5.1

VRSTA OPLATE	TEMPERATURA BETONA			
	$16^{\circ}\text{C}$	$7^{\circ}\text{C}$	$2^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C}$
OPLATA ISPOD PLOČA	3,5	4,0	4,0	5,0
PODUPIRAČI ZA PLOČE	9,5	8,0	8,5	10,5
OPLATA ISPOD GREDA	7,0	8,0	8,5	10,5
PODUPIRAČI ZA GREDE	13,0	12,0	12,5	15,5

odnosno neki manji period u kome se ostvaruje ekvivalentna vrednost maturity funkcije. Vođen istom idejom *Harrison* daje preporuke (tabela 5.1) o vremenu rašalovanja dobijenom svodenjem na ekvivalentno vreme pri  $t_b = 20^{\circ}\text{C}$ .

Dosta preciznije uputstvo daje *CIRIA Report 67* koji za OPC i specificiranu, zahtevanu čvrstoću kocke i srednju dnevnu temperaturu vazduha daje vreme odležavanja u zavisnosti od marke betona. Za MB 30 je vreme za početak skidanja oplata (izraženo u danima):

Tabela 5.2

PROPISANA KARAKTERISTIČNA ČVRSTOĆA KOCKI	SREDNJA TEMPERATURA VAZDUHA		
	5 <sup>o</sup> C	10 <sup>o</sup> C	15 <sup>o</sup> C
5 N/mm <sup>2</sup>	4	2,5	2
10	4	4	3
15	9	7	5,5
20	17	13	10

a podrazumeva minimalne mere zaštite. Nažalost, i ova tabela se ne može u potpunosti primeniti na rad u posebnim uslovima pa je preciznije (za zimske uslove  $t_a = 2-4^{\circ}\text{C}$ ) koristiti *Taylor*-ov pristup (72) po kome se vreme skidanja oplata pojavljuje u funkciji vrste primenjenog cementa (po njemu treba razlikovati):

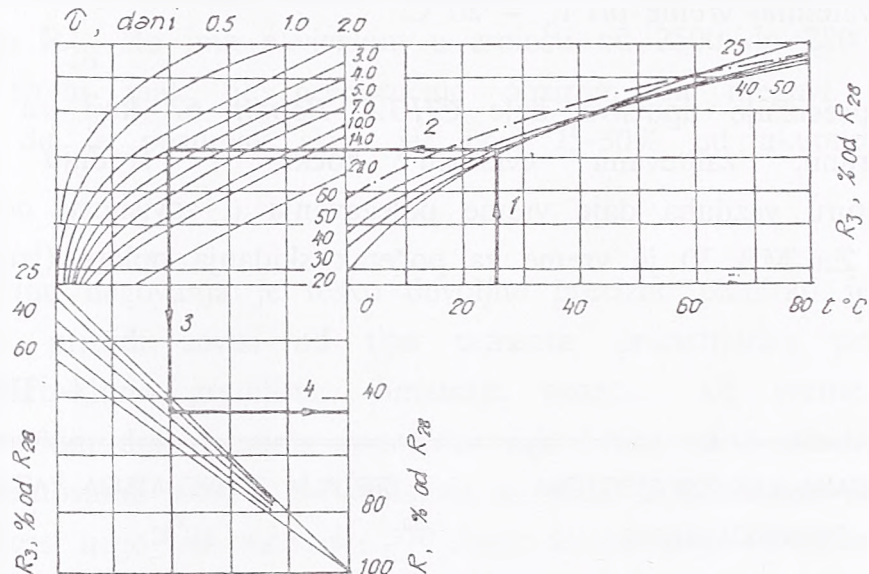
- običan portland cement,
- brzovezujući portland cement,
- visokoaluminatni cement,

i vrste nosača sa koga se oplata uklanja.

Kako je *maturity*-funkcija pouzdan instrument za ocenu ispunjenja propisanih kriterija, u vezi sa čvrstoćom i kvalitetom betona, to *Taylor* procenjuje da je zrelost od 4200 <sup>o</sup>Ch minimalno potrebna za



betone na bazi OPC-a (on čak preporučuje 6000 °Ch) dok je za brzovezujuće cemente ta vrednost dosta niža; najmanje 1800 °Ch ali je sigurnije sa 2400°Ch.



Slika 5.4 - Nomogram za određivanje čvrstoće betona u zavisnosti od početne čvrstoće, vremena sazrevanja i temperature (95)

Drugi oblik veze temperature i vremena negovanja daje *Lawrence* (38), pri čemu je važnost preporučenih vrednosti ograničena na betone sa običnim Portland cementom ili sulfatno-otpornim cementom čija se (izmerena) površinska temperatura kreće u intervalu 0-25°C. Da podsetimo da je u našim propisima dat uslov za skidanje oplata (čl. 248):

- 30% MB - za stubove, zidove i bočne strane oplata greda,
- 70% MB - za ploče i donje delove oplata greda,

a čl. 267 utvrđuje da "negovanje betona mora trajati najmanje 7 dana ili ne manje od vremena koje je potrebno da beton dostigne 60% od predviđene marke betona", čime se iskazuje nešto konzervativniji pristup problemu (u odnosu na prethodno navedene) jer je zrelost očvrslog betona (iskazana kroz kumulativnu vrednost

"stepen-sati" ili sl.) mnogo precizniji instrument od pukog konstatovanja stepena njegovog očvršćavanja. Sličan pristup sreće se i u nekim stranim propisima. Moderniji pristup traži permanentno praćenje promena ambientalnih uslova i strožu kontrolu rada ali za uzvrat dopušta skraćenje neproaktivne tehnološke pauze za negu betona.

### 5.3. KONTROLA ČVRSTOĆE BETONA I SKIDANJE OPLATE

U skladu sa praćenjem dinamike odvijanja radova treba organizovati i kontrolu kvaliteta izvedenih radova. Na kontrolu kvaliteta betona, putem probnih tela, veoma utiče veličina uzorka obzirom da od nje zavisi stepen inertnosti prema promeni spoljnih uticaja. Ovo važi kako za promene temperature tako i za mehaničke karakteristike. Zato je pouzdanije ispitivanje samog elementa odnosno monolita betonske konstrukcije. Opšta preporuka je da se ide na primenu metoda bez razaranja, pri čemu za "cold weather concreting" treba rešiti dva osnovna zadatka:

1. - *Koja je minimalna čvrstoća betona u trenutku zamrzavanja.* Tu RILEM preporučuje kao probna tela uzorke negovane na površini konstrukcije ili u specijalno izvedenim nišama (primenljivo uglavnom kod hidrotehničkih objekata) ali i konstatuje da broj neophodnih uzoraka i nužna analogija uslova starenja tih tela i same konstrukcije predstavljaju problem za praktičnu primenu. Tako, ukoliko se radi opita uzorak vadi iz niše on u trenutku nekog od narednih ispitivanja sigurno nema istu vrednost *maturity*-funkcije kao beton posmatranog bloka.
2. - *Kako se menja čvrstoća, odnosno kada se dostiže njena projektovana vrednost.* Uobičajena je primena

sklerometra ili eventualno metodologija bazirana na izvađenim kernovima ali se za oba postavljena cilja najpouzdaniji rezultati brzo dobijaju ultrazvučnim ispitivanjima koja koriste ubetonirane akustičke sonde.

Na ovom polju ima značajnih radova i domaćih autora (82). U njima je konstatovano da, osim vrste agregata i w/c odnosa, temperatura negovanja ima značajnog uticaja na korelaciju brzine ultra-zvuka i čvrstoće na pritisak. Dalje se konstatuje da samo ultra-zvuk daje sigurne podatke o stanju u masi betona što, obzirom na uticaj evaporacije na površinski sloj (videti 5.1.), potvrđuje stav o nedovoljnoj pouzdanosti sklerometarskog postupka kontrole kvaliteta prilikom betoniranja u posebnim uslovima.

Da i način ugrađivanja utiče na tačnost predstave o stanju betona pokazuju i istraživanja koja je izvršio Kayyali (34). Razlika u čvrstoći na pritisak uzoraka ugrađenih u kalupe vibriranjem na vibro-stolu i betona ugrađenog pervibratorima je posle 3 dana 9% a posle 28 dana i celih 27%. Ako se tome doda uticaj površinskih fenomena uzorka, nastalih kao posledica nege, onda je zaista problem doći do relevantnih, pouzdanih podataka neophodnih za ocenu stanja materijala. Naime, ispitivanjem slojeva betona jednog nosača (d/b = 40/20) L'Hermite (40) je zaključio da površinski, zaštitni sloj (a = 3 cm) ima 20-30% manju čvrstoću od jezgra iako je negovan na 60%-tnoj relativnoj vlažnosti.

Čak i stanje vlažnosti uzorka utiče na rezultate ispitivanja. Grupa autora (51, 62) je došla do rezultata da uzorci negovani na vazduhu i testirani takvi kakvi jesu imaju 25-35% veću čvrstoću od uzoraka iz iste grupe koji su potapanjem u vodu zasićeni neposredno pre merenja. Popovics smatra da se usled razlike u količini vlage u pojedinim slojevima javlja različito skupljanje i shodno tome složeno naponsko stanje koje se superponira sa



horizontalnom komponentom napona, nastalog pri probnom opterećivanju, ali je logičnije objašnjenje koje logiku bazira na nestišljivosti vode. Po njemu, prilikom opterećivanja ona se gubi cedenjem iz uzorka, a ukoliko to nije u stanju, pritiskom na zidove pora propagira pojavu mikro-prslina.

Kao mera efikasnosti određene metode rada može se koristiti utvrđeni stepen gubitka vlage (u ovom radu je pokazana neophodnost njenog prisustva u određenoj meri za razvoj hidratacionih procesa) obzirom da se traženi stepen čvrstoće može dobiti brže bilo hemijskim bilo tehnološkim akceleratorima. *Orchard* (49) navodi da se kod zaštitnih premaza ("*curing compounds*") u prvih 7 dana gubi najmanje 1-3% vlage da bi za 28 dana to iznelo 3-35%, u zavisnosti od vrsta "*compound-a*". Laboratorijski postupak merenja ovog gubitka bazira na radovima *Myers-a*, *Jackson-a* i *Kellerman-a*.

Svi uticajni parametri, prethodno opisani, onemogućavaju da se vreme početka skidanja oplata odredi lako i precizno nekom od uobičajenih metoda sa probnim telom kao medijumom. Da bi pokrio brojne netačnosti i omogućio dovoljnu sigurnost zaključivanja *Harrison* (27) preporučuje da specifikacijama propisana srednja čvrstoća kocki bude 25% veća od propisane karakteristične čvrstoće kocki.

Uvođenjem *Teorije pouzdanosti* u vidu parcijalnog koeficijenta sigurnosti ( $\gamma = 1,50$ ), kao odnosa karakteristične čvrstoće probnih kocki (bilo koje zrelosti) i karakteristične čvrstoće probnih kocki (iste te zrelosti) dobijene *in-situ*, dolazi se do prilično poznatog odnosa. Naime zahtevana srednja čvrstoća betonskih kocki tada mora biti bar 1,88 puta ( $1,25 * 1,50 = 1,88$ ) veća od karakteristične *in-situ* dobijene čvrstoće kocki.

Kada je u pitanju analiza rezultata ispitivanja kernova izvađenih iz površinskih elemenata (ploče, zidovi) konstrukcija izvedenih u

uslovima niskih temperatura treba reći da ona ukazuje na znatno veću varijaciju čvrstoće betona u pločama nego u zidovima. To je navelo neke istraživače (52) da zaključe kako bi usvajanje betona, nominalne čvrstoće materijala za  $5 \text{ MN/m}^2$  veće od projektovane, omogućilo i praktično ostvarenje željenih mehaničkih karakteristika materijala. Kako to, samo po sebi, nije dovoljno dodatni uslov je i primena profilaktičkih mera zaštite od temperaturnog šoka u trenutku ugrađivanja (zagrevanje oplata...).

U svakom slučaju ako je to moguće, kontrolu eksploatacionih karakteristika betona izradenog u posebnim ambientalnim uslovima i prirast čvrstoće na pritisak (kao jedne od najvažnijih) treba pratiti preko *maturity*-funkcije, u protivnom će naše odlučivanje biti nužno konzervativno.

Pored navedenog skupa uticaja na karakteristike materijala ne treba gubiti iz vida i pozitivne efekte ranog opterećivanja ugrađenog betona. Još je *A.V.Satalkin* predlagao da se betonskim konstrukcijama izvedenim u letnjim ("standardnim") uslovima "dozvoli" da kroz prijem radnih opterećenja, u trenutku kada beton još nije dostigao projektovanu čvrstoću, ubrzaju proces poboljšavanja mehaničkih karakteristika. On je mišljenja da se brojni povoljni efekti mogu očekivati ukoliko takvo opterećenje ne pređe 40-60% nosivosti betona dobijene sazrevanjem do trenutka nanošenja opterećenja.

Osim u letnjim ove efekte možemo očekivati i u zimskim uslovima i to prevashodno kod izvođenja temelja. Njihovo opterećivanje odlikuju faze (svaki sprat je nova faza...) pa se iz veličine (stepena) ukupnog opterećenja, a na osnovu gornjeg uslova, lako mogu odrediti minimalne potrebne vrednosti čvrstoće na pritisak u trenutku apliciranja opterećenja nove faze.

#### 5.4. TRAJNOST KAO FUNKCIJA SASTAVA I NEGE BETONA

Trajnost betona, njegova sposobnost da na projektovani način određeno vreme u toku eksploatacionog perioda odoleva spoljašnjim uticajima i sopstvenim reakcijama na te uticaje, je funkcija ne samo negovanja već i niza parametara čije poreklo treba vezivati za karakteristike samog materijala, odnosno njegovih sastavnih delova. Promena sadržaja vlage u agregatu izaziva zapreminske promene samog agregata ali utiče i na eksploatacione karakteristike konstrukcije:

- a. - povećanjem ugiba nosača podvrgnutog opterećenju;
- b. - propagiranjem pojave prslina na površini betona;
- c. - iniciranjem pojave prslina na vezi armature i zrna agregata kao i pojačanom korozijom u toj oblasti.

*L'Hermite* (40) je ovakve odlike agregata registrovao u različitim klimatskim područjima (USA, Južna Afrika, SSSR, Gana...) pa problem treba shvatiti kao univerzalan za područja ekstremnih klimatskih karakteristika i staviti ga u red ostalih koji traže laboratorijsku proveru pre projektovanja betona.

Uobičajenu pretpostavku da se betonu, izrađenom u "hot weather" uslovima, usled njegove veće potrebe za vodom povećava skupljanje a samim tim javlja novi set prslina, osporava grupa autora koja je problematiku žarkih uslova posmatrala kroz prizmu uvećane evaporacije. *Jaegermann* i *Glucklich* su posmatrali uticaj "rane" evaporacije svežeg betona (kasnije normalno negovanog do starosti od 28 dana) i našli da je skupljanje u takvim uslovima 35% manje od očekivanog i dobijenog za kontrolnu grupu. Objašnjenje, da ova pojava dolazi usled prinudnog zgušnjavanja sveže mase iz koje je izvučen "višak" vode, potvrđuju *Shalon* i *Zawde* koji su proširili stav prethodnika tvrdnjom da niža vlažnost okoline i/ili viša temperatura u prvih 24 sati nege daje kasnije manje skupljanje prilikom sušenja i to nezavisno od primenjene vrste cementa (67).



Poseban problem u vezi sa trajnošću betona u žarkom podneblju je agresivno dejstvo korozije koja napada kako armaturu tako i sam beton. Jedan od prvih zajedničkih radova *Shalon*-a i *Raphael*-a ipak ukazuje da je formiranje rde najbrže pri temperaturi 20-30°C a nešto manje pri višim temperaturama (30-60°C). Značajnija opasnost dolazi kod betona sa povećanim sadržajem hlornih jona. Tada se razvija elektrohemijski proces pri kome se, zbog nehomogenosti samog čelika a i veze betona i armature, inicira kretanje elektrona u armaturi i uzrokuje strujanje jona u elektrolitnoj cementnoj pasti. Polarizovanje čestica u masi dovodi do odvajanja čeličnih čestica koje u prisustvu kiseonika ekspandiraju u rdu. Ovi produkti reaguju sa kalcijum-hidroksidovim jonima i talože se na ogoljenoj površini armature u vidu zaštitne opne. Balans jona u tečnoj fazi betonske mase remete uneti hlorni joni. Oni reaguju sa česticama zaštitne opne razarajući je i ostavljajući metal daljem, progresivnom dejstvu korozije. Prirast čvrstoće veze betona i armature raste na vrlo sličan način kao čvrstoća samog betona, tj. ako u toku prvih 24 sati padne temperatura betonu do tačke mržnjenja - pada i stepen athezije. Za razliku od betona, koji naknadnim negovanjem vraća najveći deo čvrstoće, athezija ostaje trajno niža pa hloridi koji služe kao lek protiv štetnih dejstava mraza ovde pokazuju i lošu stranu.

Domaća istraživanja pokazuju da se cementima koji sadrže 8-10%  $C_3A$  (videti tačku 2.2.) može još u toku očvršćavanja neutralisati dejstvo hlornih jona (vezuju se u kalcijum-hidrohlor-aluminat) a slične efekte daju sulfatne komponente vezivnih materijala, ili primena sodium-nitrita.

*Mironov* i *Krylov* naglašavaju važnost kvalitetnog ugrađivanja zaštitnog sloja (a samim tim i pravilnog negovanja) obzirom da se pokazalo da sloj debljine 25 - 30 mm može biti dobra zaštita - ako je bez prslina. Ovo stoga što rastvor hlorida ne stvara koroziju puno više od obične vode ali u situaciji kada ritmično

kvašenje-sušenje i prisustvo kiseonika doprinose koroziji pa ona postaje razarajuća. Da bi umanjili štetno dejstvo hlora oni preporučuju beton sa CaCl za konstrukcije masivnih elemenata ( $M_p \leq 6$ ), a za  $M_p > 6$  u takve mešavine bi isključivo trebao ići natrijum-hlorid. Ritmične promene temperature (do  $\pm 5^\circ\text{C/h}$ ) dovode do koncentracije aditiva u zonama oko čvorova konstrukcije pa ako je u pitanju  $\text{CaCl}_2$ , tada se na površini javlja *fluorescencija*, a ako su u beton ugrađeni antifrizni dodaci, tada kristalizacijom ovih soli može doći do ekspanzije i razaranja betona pri čemu ne treba gubiti iz vida ni opasnosti od alkalno-silikatne reakcije u prisustvu potaše i "aktivnih" zrna agregata (opal, kalcedon).

## 6. METODE RADA NA NISKIM TEMPERATURAMA

### 6.1. POLAZNI STAVOVI

Da bi se usvojio najekonomičniji način izvođenja betonskih radova na niskim temperaturama očito je da se mora voditi računa samo o najnužnijim potrebama materijala, i isključivo u kontekstu projektovanih eksploatacionih karakteristika, obzirom da se za različite objekte traže različite "performanse", a to isto važi i za pojedine delove konstrukcije. Tako, na primer, otpornost na mraz betona ugrađenog u fasadu i u unutrašnje pregradne (noseće) zidove objekta ne mora biti ista, itd. Pored toga, primena neke tehnologije i valjanost rezultata rada zavise od kvaliteta kontrole proizvodnje i nege betona, a sami eksperimenti i laboratorijski uslovi u kojima se oni izvode ne mogu verno "oponašati" kombinacije radnih parametara prirodnog okruženja. Naime, betonu temperatura nikada ne pada ispod  $0^{\circ}\text{C}$  odmah posle ugrađivanja, (za to je inače potrebno desetak sati a sve u zavisnosti od  $t_{bp}$ ), što omogućuje betonu da akumulira određenu zrelost i time menja vlastito ponašanje u fazi očvršćavanja.

O brzini zaleđivanja postoji više podataka, ali se *ACI Kommittee 306* (14) može prihvatiti kao izvor relevantnih informacija. Njegovi istraživači tvrde da se na  $-2^{\circ}\text{C}$  oko 80% vode u betonu pretvara u led za samo par sati, na  $-3^{\circ}\text{C}$  u led se pretvara skoro 90% vlage, a da bi 97% vode prešlo u čvrsto stanje temperatura se mora spustiti čak do  $-45^{\circ}\text{C}$ . Kako su relativno blagi zimski uslovi očito pogubni po stanje čvrstoće to organizaciona osposobljenost gradilišta mora biti na tom nivou da dovoljno brzo aktivira instaliranu tehnologiju.

Na izbor metode za "cold weather concreting" utiču brojni faktori. Oni su u sledećem nizu uređeni prema intenzitetu uticaja na taj način da je poslednji u nizu kontrolabilniji od prethodnih pa je



samim tim intenzitet posmatranog uticaja, kao kriterijum, shvaćen kao mera nezavisnosti od moći tehnologa, njegovog znanja i opreme:

1. - geografsko područje lokacije gradilišta,
2. - temperatura vazduha,
3. - vrsta konstrukcijskog sistema,
4. - moduo površine elemenata konstrukcije,
5. - sastav betonske mešavine,
6. - karakteristike upotrebljenog cementa,
7. - projektovana čvrstoća betona,
8. - karakteristike oplate, i
9. - projektovani praktični učinak tehnološkog sistema.

Većina savremenih metoda bazira na nekom obliku "toplotnog tretmana" koji, tokom neophodno dugog perioda nege, troši dosta inače skupe energije pa se kao kriterijum za selekciju i izbor (u primarnoj fazi) preporučuje stepen utroška energije po jedinici mere. Sa druge strane komitet RILEM-a (57) preporučuje da metoda koju preferiramo bude takva da deluje putem povećanja (očuvanja) površinske temperature betona čime se eliminiše temperaturni gradijent i pojava termo-prslina. Preporuka je korisna ali favorizuje kontrolabilne metode pa se može prihvatiti samo u blažim temperaturnim uslovima. Domaći autori često koriste sledeću podelu postojećih metoda:

1. - metode sa termosnim negovanjem betona,
2. - metode sa primenom hemijskih dodataka,
3. - metode sa zagrevanjem betona u fazi očvršćavanja, i
4. - kombinovane metode na bazi prethodno navedenih,

ali celovitiji pregled metoda daje sliku raznolikosti pristupa:

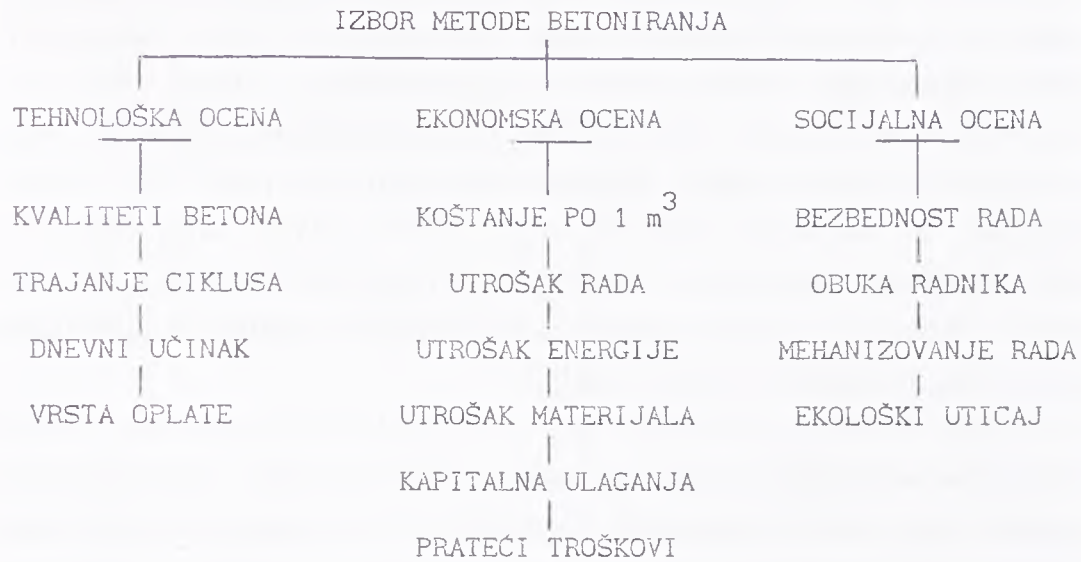
#### 1. Metode sa primenom hemijskih dodataka

- 1.1. - Za armirani beton
- 1.2. - Za zagrejani beton
- 1.3. - Za nezagrejani beton

2. Metode zagrevanja komponenti mešavine
3. Termos metoda
4. Metode zagrevanja gotovog betona
  - 4.1. - Primenom vodene pare i sličnih fluida
  - 4.2. - Primenom električne energije
5. Metode sa primenom zaštitnih objekata
  - 5.1. - Za ceo objekat
  - 5.2. - Za delove objekta
6. Kombinovane (hibridne) metode
7. Metode montažnog građenja

Metode koje baziraju na izradi posebnih dvo - il tro - dimenzionih zaštitnih objekata (specijalni šatori ili baloni stvaraju mikro-klimatske uslove povoljne za očvršćavanje) su u praksi uglavnom potisnute ostalim metodama (u navedenoj podeli 1 do 4) dok metode montažnog građenja obuhvataju, na gradilištu, obradu samo pripremljenih spojeva elemenata (termos metodom, indukcijom, elektro-zagrevanjem). Ova poslednja grupa metoda nije u potpunosti obuhvaćena pojmom, "rad u posebnim uslovima", pa kao takva nije ni usvojena za višekriterijumsku komparaciju.

Izuzetno važan podatak za "*cold weather concreting*" je kritična čvrstoća betona, odnosno minimalna čvrstoća koju materijal mora imati u trenutku zamrzavanja. Ova veličina u mnogome određuje "strategiju" izbora metode, a sama se u normativnim aktima javlja u širokom dijapazonu vrednosti: u USA je 3,5 MPa, u Japanu 3,5-5 MPa, u Engleskoj i Francuskoj 5 MPa, u Finskoj 4-8 MPa, u Poljskoj 5-7 MPa, u Norveškoj 6-8 MPa, u Kanadi 7-10 MPa, a u SSSR-u 7,5-15 MPa. Iako su vrednosti u pojedinim navedenim intervalima funkcija vrste cementa, ipak je neshvatljiva tolika šarolikost vrednosti jednog tehnološkog parametra koji bi, za slične klimatske uslove,



Slika 6.1 - Parametri za ocenu metode rada u zimskim uslovima

trebao biti ujednačeniji. U našim propisima o betonu uslov za kritičnu čvrstoću je 50% MB, ali se kao dovoljno sigurne mogu prihvatiti i RILEM-ove preporuke (5 MPa) koje je i *Krilov* (102), jedan od najpoznatijih istraživača u ovoj oblasti, verifikovao kao merodavne.

## 6.2. PRIMENA HEMIJSKIH DODATAKA

Po svojoj prirodi primena aditiva je vrlo pogodna kao "prateća" u gotovo svim postojećim metodama jer ne zahteva investiranje u opremu, a komplementarna je procesima ubrzanog očvršćavanja pod dejstvom povišenih temperatura. Kombinacije superplastifikatora i akceleratora mogu uštedeti 20-30% toplotne energije angažovane za zaparivanje sa izotermnim režimom na 80°C, jer snižavaju potrebnu temperaturu izotermije za 20-30°C. Hemijski uticaj aditiva se zasniva na interakciji klinkernih materijala i elektrolita ali je odavno konstatovano da uzajamno dejstvo hemijskih dodataka i vode još uvek nije u potpunosti rasvetljeno, iako se zna da se i voda



menja u rastvorima bogatim jonima. U zavisnosti od ambientalnih uslova, sazrevanja betona kao i karakteristika aditiva vrši se njihovo doziranje, mada je po RILEM-ovim preporukama optimalna ona koncentracija aditiva koja zamrznutom betonu, posle 28 dana sazrevanja u normalnim uslovima, daje 85-90% MB. Tako dobijena doza hemijskih dodataka ne sme pritom izazivati ni preterano brz proces vezivanja jer bi time nužno prouzrokovala modifikaciju tehnološkog postupka, što nije poželjno.

Kod primene aditiva kao "pratećih" činilaca nekih kompleksnih metoda valja istražiti ponašanje dodataka u, za njegovu standardnu primenu, neuobičajenim temperaturnim uslovima. Tako je i otkriveno da potašu ne valja unositi u betone koji će biti podvrgnuti zagrevanju električnom energijom, jer mogu izazvati pad krajnje čvrstoće za više od 30%; za ostale dodatke nisu zabeleženi efekti sličnog karaktera.

Kada je u pitanju optimiziranje količine aditiva interesantan je slučaj protivmraznih dodataka. Naime, jasno je da se većom količinom hemijski aktivnog materijala može garantovati puna sigurnost protiv zaleđivanja, ali se u tom slučaju javlja problem inertnosti vode (unete u mešavinu) koja više ne reaguje sa vezivnim materijalima na očekivani, uobičajeni način. Zato se, manjom dozazom, dozvoljava delimičan prelazak vode u led i to u meri koja betonu u toku narastanja njegovih čvrstoća neće naneti značajniju štetu. RILEM (57) daje formulu za količinu protivmraznog dodatka:

$$A_o = \frac{(100 - i) A_e}{100 - 0,01 A_e i} \quad (6.1)$$

gde su, u procentima dati:

$A_o$  - koncentracija aditiva u odnosu na ukupnu unetu količinu vode,

$A_c$  - maksimalna koncentracija aditiva pri kojoj, na određenoj temperaturi, rastvor ipak počinje da zamrzava, i

i - dozvoljena količina leda u betonu (40-60%).

Obzirom da su aditivi vrlo skupi treba, variranjem vrednosti "i", treba utvrditi optimalnu količinu ispitivanog dodatka.

Primena hemijskih dodataka je u vreme razvitka ove metode bila čak 10-15% skuplja od tehnologije rada u običnim klimatskim uslovima (sada je poskupljenje 6-12%) što je predstavljalo efektanu zamenu za mnogo skuplje (i do 20%) metode sa prethodnim zagrevanjem betona, a proširivalo je i oblast primene termos metode - koja je inače vrlo jednostavna za rad. Rad sa hloridnim dodacima na vrlo niskim temperaturama može, uz neadekvatno ugrađivanje, stvoriti probleme uzrokovane rapidnim razvojem korozije. Zato se kombinacija sa "termos metodom", za nosače manje razuđenosti preseka ( $2,5 < M_p < 6$ ), javlja kao vrlo povoljna do "granične" zone (na  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $20^{\circ}\text{C}$  prestaju očekivani efekti) i u praksi je u širokoj primeni. *Mironov i Krilov* (41) preporučuju za takve slučajeve kombinovanja metoda mešavine manjeg w/c odnosa (0,40-0,55) što se obično može postići blendiranjem organsko-neorganskih dodataka sa 1,5-2% potaše (99). Ovakav postupak količinu potrebne vode smanjuje za više od 25%. a efikasan je do  $-15^{\circ}\text{C}$  (tada daje  $\beta_{k28} = 40-45\%$  MB) mada je nesporno ozbiljna zamerka što se puna čvrstoća dostiže tek posle 3 meseca (pri čemu je nega poslednja dva meseca na normalnoj temperaturi).

Kompleksni protivmrazni dodaci, plastifikatori i potaša u dozaži od 2-6% ukupno, mogu čak i na ekstremno niskoj temperaturi od  $-35^{\circ}\text{C}$  da za 3 dana (betonu ugrađenom sa  $t_{op} = 15^{\circ}\text{C}$ ) daju 50% MB, a za uobičajene, u praksi proverene kombinacije "antifriznih" materijala date su tabelom 6.1. odgovarajuće vrednosti čvrstoće na pritisak kroz vreme.

Tabela 6.1

TEMPERATURA OČVRŠĆAVANJA	KOLIČINA ADITIVA (% NA KOLIČINU CEMENTA)			
	$t_b$	NaCl + CaCl <sub>2</sub>	NaNO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
- 5°C		3,0 + 0,6	4 - 6	5 - 6
- 10°C		3,5 + 1,5	6 - 8	6 - 8
- 15°C		3,0 + 4,5	8 - 10	8 - 10
- 20°C		-	-	10 - 12
- 25°C		-	-	12 - 15

RILEM (57) naglašava potrebu da beton sa hemijskim dodacima ne bude prepušten očekivanoj, srednjoj ambientalnoj temperaturi pre nego što dostigne određenu čvrstoću, i to:

- 20% MB - za betone sa NaNO<sub>2</sub> ili Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>
- 10% MB - za betone sa K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- 5% MB - za betone sa NaCl + CaCl<sub>2</sub> ili NaNO<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub>

### 6.3. ZAGREVANJE KOMPONENTI BETONSKE MEŠAVINE

Pokušaj da se, korišćenjem efekta međusobnog trenja čestica agregata, mešavini podiže temperatura produženim mešanjem završio se na nivou eksperimenata jer je za 3°C povećanja  $t_{bp}$  nužno izvršiti dodatnih 5 min mešanja, a za tehnološki gotovo zanemarljivih 6°C povećanja  $t_{bp}$  treba izvršiti dopunsko mešanje od čitavih 60 min. Zato se u praksi obično pribegava zagrevanju vode do  $t_w = 60^\circ\text{C}$  čime se mešavini daje radna temperatura na izlasku iz fabrike betona od oko 15°C.

Prema jednomizveštaju iz 1988 god. od 158 anketiranih američkih centralnih fabrika betona 56% zagreva samo vodu (među njima 2/3

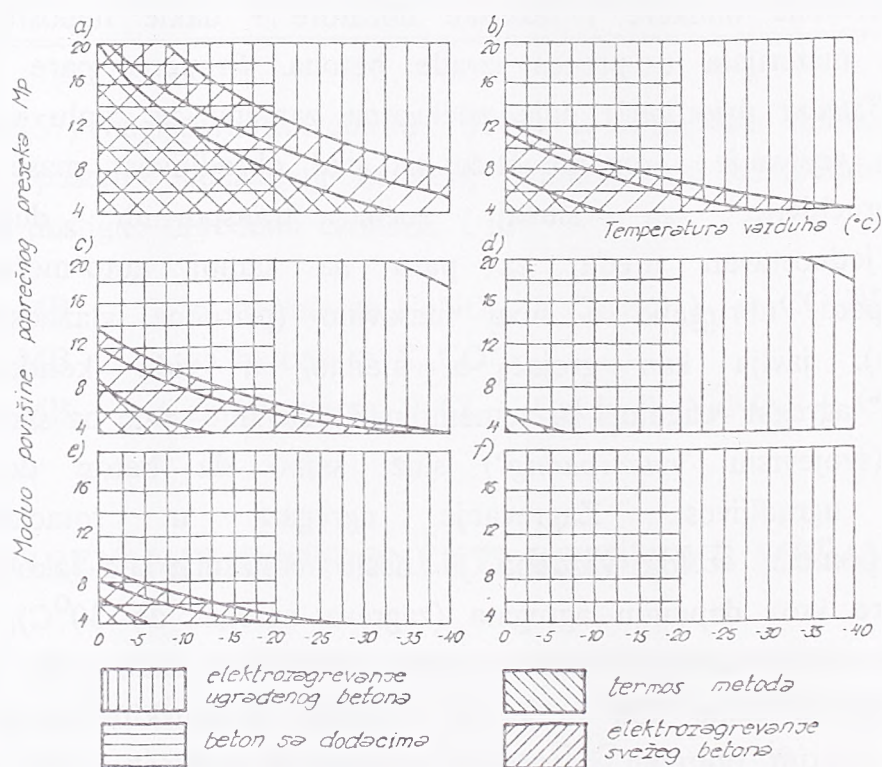


zagreva vodu do preko 60 °C), 38% zagreva i vodu i agregat (među ovim fabrikama u 2/3 se zagreva voda do temperature koja premašuje 80 °C) a samo 6% nema kotlove za zagrevanje vode. Radi kontrole procesa zagrevanja mešavine 85% anketiranih proizvođača svežeg betona primenjuje kontrolu mešanja zagrejjane i hladne vode (1/2 takvih ima automatsko blendiranje). Iako je zaštita agregata na deponiji i njegovo blago zagrevanje (preko zagrejjane podne ploče ili preko pare koja se "uduvava" u dnu deponije) jedan od najčešćih načina akumulacije toplote ipak se, kao najefikasnija metoda, izdvaja aktivno zagrevanje agregata putem uduvavanja vrele pare u zatvorene bunkere i težinske dozatore - dakle neposredno pre ulaska materijala u proces izrade betona. Primena pare pod pritiskom ("*steam injection*") daje adekvatnu zamenu za toplu vodu, ali ubrzava vezivanje i znatno utiče na pad obradljivost mase pa je preporučljivije, za slučaj većih transportnih dužina, instalirati jednostavan uređaj za paru na samoj auto-mešalici. Tada se para, ubrizgana u suhu mešavinu (prirodne vlažnosti i temperature), javlja kao grejjać a ujedno, u vidu kondenza, "podmazuje" agregat reagujući sa cementom. Dodavanje vode na samom gradilištu (svojevrsni "*retempering*") služi samo da beton dobije adekvatnu ugradljivost. Zagrevanje agregata u rotacionim sušilicama pomoću vrelog vazduha je nešto efikasnije od aktivnog razvoda pare kroz deponiju agregata (zagreva agregat do 30°C), ali troši daleko više energije i zahteva veće pripremne radove pa mu treba pribegavati samo kod projekata u oštrim klimatskim uslovima i sa vrlo velikim obimom betonskih radova, ili kod objekata koji traže vrlo brzo realizovanje kritične čvrstoće materijala.

#### 6.4. TERMOS METODA I NJENE PODVARIJANTE

Termos metoda je vrlo jednostavna, pa time i vrlo ekonomična, a bazira na postupku konzervacije ugrađenog betona čime se uneta toplota (toplota ugrađenog betona) i toplota hidratacije koriste

kao katalizatori procesa očvršćavanja u zimskim uslovima. Konzerviranje toplote utiče na uspostavljanje njenog ravnomernog rasporeda u masi i time umanjuje mogućnost pojave termičkih prslina na površini betona. Uobičajena je primena ove metode za konstrukcije čiji nosači imaju kompaktan oblik ( $M_p < 6$ ), a za razudnije preseke "termos" metodu treba kombinovati sa primenom aditiva i/ili prethodnim zagrevanjem betona. Preporuka je (32) da se za temperature do  $-15^{\circ}\text{C}$  od aditiva koristi  $\text{NaNO}_2$ , a za niže temperature potaša. Što se oblasti primene tiče puno precizniju preporuku daju dijagrami Gendin-a (92) na slici 6.2. Ovi dijagrami



Slika 6.2 - Oblast primene metoda zimskog betoniranja za betone sa portland cementom (92)

ukazuju na obavezu ravnopravnog tretiranja različitih metoda, čija je primena u oblasti blažih temperaturnih uslova realno moguća, pa bi odluka o izboru morala da se donese tek nakon detaljne tehno-ekonomske analize. Priroda ove metode naglašava važnost pravilnog konstruisanja oplate i izbora materijala za nju. Drvena

oplata je povoljnija od metalne, ali zato manje robusna, pa ako se ipak ide na primenu metalne oplata tada i nju i armaturu valja zagrevati do temperature od nekoliko stepeni iznad nule - kako bi se izbegao termalni šok svežeg betona. Za metodu je karakterističan parametar je koeficijent predaje toplote putem oplata ( $k$ ) koji zavisi od brzine vetra iznad oplata, a date vrednosti ( $W/m^2C$ ) u tabeli 6.2 dozvoljavaju preciznu uporednu analizu efikasnosti naznačenih materijala kao termo-izolacione zaštite ugrađenog materijala. Mora se obavezno naglasiti da zbog drastične promene konduktivnosti oplata, koja može biti pokvašena u toku tehnološkog procesa, treba preferirati tipove oplata sa kombinacijom vodo-otpornih i termo-izolacionih materijala. Neka starija istraživanja *Golovnev-a* pokazuju da se kod malo razudjenijih preseka ( $M_p \approx 6$ ) čak ni prethodnim zagrevanjem betona do temperature od preko  $t_{bp} = 70^{\circ}C$  ne može tokom vremena nakupiti kritična čvrstoća materijala ( $70\% R_{28}$ ) ukoliko je ugrađen u metalnu oplatu a ambijentalne uslove karakteriše  $t_a \approx -10^{\circ}C$ . Utoliko je važnije na pravi način izabrati (projektovati) oplatu u koju se betonska masa ugrađuje.

Tabela 6.2

TERMOIZOLACIJA NA POVRŠINI BETONA	BRZINA VETRA IZNAD POVRŠINE BETONA		
	1 m/sec	3 m/sec	9 m/sec
Bez termoizolacije	14,3	22,2	50,0
Čelična oplata $d = 25$ mm	12,5	18,9	33,3
Blažujka $d = 18$ mm	4,6	5,2	6,0
PVC folija sa 20 mm vazduha	3,9	4,3	4,8
Blažujka $d = 37$ mm	2,8	3,1	3,3
Drvena piljevina $d = 50$ mm	1,9	1,9	2,0
Mineralna vuna $d = 25$ mm	1,3	1,3	1,4
Daska $d = 18$ mm + mineralna vuna $d = 25$ mm	1,1	1,1	1,2
Mineralna vuna $d = 50$ mm	0,7	0,7	0,7



Napor da se betonu očuva zadovoljavajući nivo temperature može se oslanjati kako na primenu cementa sa bržim razvojem procesa egzotermije, tako i na postupke zagrevanja sveže, još ne očvršle mase. Beton se u tim slučajevima zagreva procesom elektrotermije, pri čemu brzina podizanja temperature mora zavisiti od sposobnosti betona da podnese taj gradijent, a to znači i od modula površine (Mp) nosača. Kod prefabrikacije pločastih elemenata međuspratne konstrukcije *Klepov* i *Lemehov* (98) preporučuju brzinu od  $10^{\circ}\text{C/h}$  u toku 6-8 sati, a potom termosno održavanje toplote u toku 12-14 sati kako bi se na nivou jednodnevne čvrstoće dobilo oko 70% MB. U cilju uštede oplata i grejača oni preporučuju paket sa 4 ploče i 2 grejne table. Mnogo detaljnije ovakve probleme elektrotermije obrađuju radovi domaćih autora (32).

## 6.5. ZAGREVANJE BETONA PRE ILI POSLE UGRADIVANJA

### 6.5.1. OPŠTI PROBLEMI ZAGREVANJA BETONA

Prve ideje o načinu zagrevanja betona bazirale su na izradi zaštitnog omotača koji bi, navučen na ramove-nosače, ostavljao međuprostor (do oplata) sa mogućnošću da u taj prostor bude upumpavana vrela para. Očito je u pitanju bila metoda sa primenom zaštitnih objekata. Pored malog stepena iskorišćenja energije praktičan problem stvara i velika količina kondenzata. Primena vrelog vazduha kao alternativnog nosača toplote je, zbog njegovog malog toplotnog kapaciteta, neracionalna a pritom stvara efekat "pustinjskog vetra" sa izraženom evaporacijom. Osim "vrućeg termosaa", koji je praktično u primeni od 1962. godine, vrlo rasprostranjene metode su:

- zagrevanja betona direktnom aplikacijom električne energije preko spoljnih elektroda ili preko elektroda uronjenih u masu;

- indukcijom zagrevanja preko solenoidnih provodnika; i
- zagrevanja infracrvenim zračenjem.

Sve ove metode su vrlo primenljive u praksi i to nezavisno od ambientalnih uslova i tipa konstrukcije (modula površine preseka). Ono o čemu se ipak mora voditi računa je gradijent brzine zagrevanja (ne više od  $20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ) i maksimalna temperatura površine grejnog nosača (ne više od  $80^{\circ}\text{C}$ ) (57).

### 6.5.2. ZAGREVANJE BETONA PRE UGRADIVANJA

Pomenute metode su tehnološki odgovor na probleme koje je u "cold weather concreting" uneo zahtev za radom pri vrlo teškim ambientalnim uslovima. Metoda zagrevanja mešavine pre ugrađivanja je u primeni od 1974. god. Mešavini se dodaje brzovezujući Portland cement, a potom ubrizgava para, čime se žitkoj masi podiže temperatura do prosečno  $50^{\circ}\text{C}$ . Efekat ubrzanog očvršćavanja se balansira doziranjem odgovarajućih retardera, a manja ugradljivost super-plastifikatorima. Sav taj napor u velikoj meri čini depiasiranim upravo značajan pad čvrstoće koji je direktno proporcionalan parametrima veštački obezbedene zrelosti betona:

- maksimalnoj temperaturi, i
- vremenu njenog održavanja.

Obzirom da su *Verbeck i Copeland* utvrdili da izlaganje betona temperaturama i do nivoa od  $100^{\circ}\text{C}$  ne utiče na fizičku i hemijsku prirodu produkata hidratacije to uočeni pad čvrstoće materijala treba pripisati slaboj vezi cementne paste i čestica agregata, vezi uslovljenoj nepravilnim rasporedom produkata hidratacije.

Osim parom beton se uspešno zagreva i u specijalnim sudovima (kadama), primenom električne energije, tako da za 10-20 minuta dostiže temperature i do  $80^{\circ}\text{C}$ . U takvim uslovima intenziviraju se hidratacioni procesi tako da čestice cementa kvalitetnije reaguju

a vodom, a oslobodena toplota omogućava povoljne efekte "vrućeg termososa". Opšta preporuka da se opisani postupak primenjuje samo za preseke čiji je  $M_p < 12$  može se, na vrlo niskim temperaturama, zanemariti ako se primeni u kombinaciji sa hemijskim dodacima i naknadnom termo-obradom ugrađenog betona.

### 6.5.3. ZAGREVANJE PRIMENOM EFEKTA ELEKTROOTPORA

Direktna primena naizmjenične struje kao sredstva za "negu" betona nije komercijalizovana samo za određene tipove nosača već za sve vrste relativno homogeno armiranih konstruktivnih elemenata. Uslov "homogenosti" je postavljen zbog potrebe ravnomerne distribucije unete toplote a ugrađena armatura se pritom javlja kao jedan od medijuma za prolaz elektriciteta (drugi je oplata). Pogodnost primene metalne oplata kao jedne od elektroda nameće potrebu kvalitetnog termo-izolovanja oplata prema okruženju jer se zbog potencijalno velikih gubitaka toplote u fazi izotermije nepotrebno troši snaga grejača. Da bi podužna armatura pravilno vršila svoju funkciju treba je poprečnom armaturom (najbolje zavarivanjem) vezati u armaturnu mrežu - kavez.

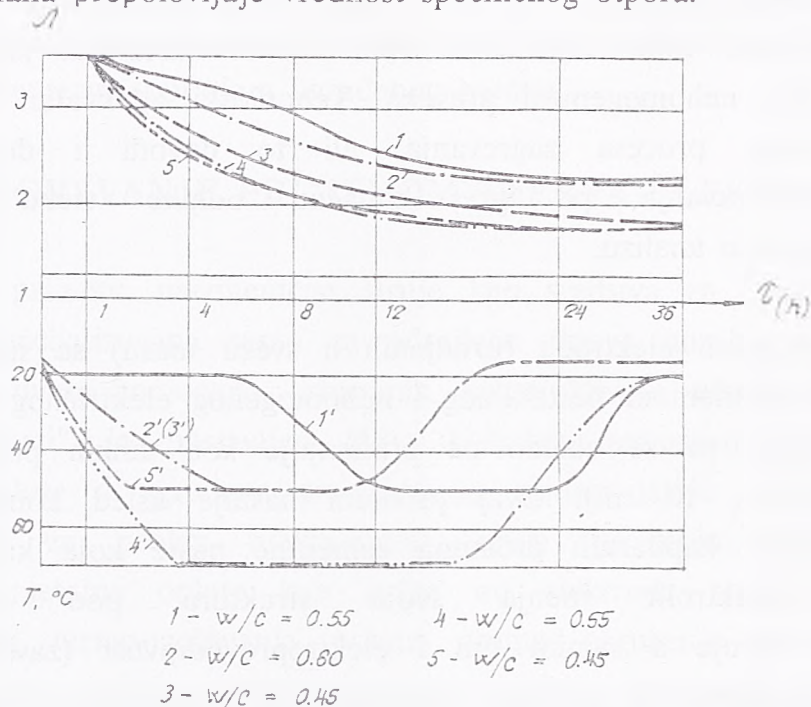
Prilikom ugrađivanja betona često se kao problem javlja opisani termo-šok koji nastaje usled kontakta hladne oplata i betona pa oplatu treba sekundarnim postupkom zagrevanja pripremiti za prijem sveže betonske mase. U praksi su česti slučajevi kombinovanja ove metode sa metodama prethodnog zagrevanja mešavine (do  $10-15^{\circ}\text{C}$ ) što povoljno deluje na neravnomernosti distribucije toplote i proces nakupljanja zrelosti materijala. Velika osetljivost svežeg betona na promenu temperature zahteva preciznu kontrolu rada sistema (beton - elektrode) jer se povratnom spregom obezbeđuje prilagodavanje radnog napona promeni elektro-otpota, nastaloj kao posledici očvršćavanja materijala. Usled zagrevanja betonske mešavine dolazi do formiranja mehurića vazduha unetog procesom spravljanja betona pa se preporučuje revibriranje još neočvrle



mase čime joj se smanjuje ukupna poroznost površinskog sloja. Samo revibriranje je jednostavno ali kod visokih stubova, kod kojih se beton ugrađuje u više faza, zbog revibriranja nastaje ekstrakcija viška vode koja se u zoni radnih nastavaka javlja kao osnovni uzrok nehomogenosti preseka. Tehnološki adekvatan odgovor je usporavanje procesa zagrevanja, ali to dovodi i do dužeg perioda očvršćavanja pa pre konačne odluke treba izvršiti tehno-ekonomsku analizu.

Primena dubinskih elektroda (uronjenih u svežu masu) se sukobljava sa krupnim problemom nestabilnog i nehomogenog električnog polja u betonskoj masi, pa se obično ne primenjuje kod tankih površinskih elemenata ( $d < 10$  cm). Ovaj problem nastaje usled kompleksnih mikro i makro kapilarnih promena cementne paste koja kao retko dinamičan elektrolit menja svoju strukturu pod dejstvom naizmenične struje a samim tim i elektroprovodljivost (zavisi i od sastava mešavine, starosti betona,...). Preciznija kontrola ponašanja materijala stvara mogućnost za adekvatniji tretman. Tako *Ichiki* u svom radu (31) smatra da je aproksimativna vrednost specifičnog otpora svežeg betona na temperaturi od oko  $12^{\circ}\text{C}$  u intervalu  $16-18 \Omega\text{m}$  i to na početku grejanja, da bi kasnije uz brži rast temperature (ona u prvih 24 sata ne sme premašiti  $50^{\circ}\text{C}$ ) pala na  $12-13 \Omega\text{m}$ . Ovo se drastično razlikuje od RILEM-ovih preporuka koje za inicijalnu vrednost specifičnog otpora daju širok interval ( $4-25 \Omega\text{m}$ ) koji karakteriše i drugu, stabilizovanu fazu elektrolita sa minimalnom vrednošću otpora od  $2-20 \Omega\text{m}$ . Ova faza se održava neko vreme, jer je za ravnomerno "trošenje" elektrolita u procesu hidratacije u mešavini dato dovoljno materijala (vode, alkalnih komponenti, aditiva...), ali kasnije električni otpor raste sa padom količine slobodnih jona. Da sastav mešavine bitno menja specifični otpor betona potvrdili su *Ross* i *McIntosh* ispitujući promenu otpora kroz vreme za različite mešavine. Zaključak koji se iz njihovog dijagrama (slika 6.3) može izvesti je da veći w/c odnos daje manji otpor, ali da to ne sme ići na uštrb doze cementa

jer cement unosi rastvorljivu supstancu budućeg elektrolita. Jasno je da prisustvo aditiva, recimo samo 2% CaCl, u prvih nekoliko sati tretmana prepolovljuje vrednost specifičnog otpora.



Slika 6.3 - Promena koeficijentata termoprovodljivosti u zavisnosti od režima zagrevanja i W/C odnosa (109)

Promena električnog otpora nije vezana samo za promenu karakteristika betona kao materijala već i za "grejna tela". Površina uronjenih metalnih elektroda se vremenom, pri radnoj temperaturi preko 30°C, prekriva nataloženim mehurićima istisnutog vazduha usled čega se pri dejstvu naizmenične struje na elektrolit izaziva neravnomerno zagrevanje okoline elektrode. Profilaktičke mere koje preporučuje literatura (32) svode se na početno zagrevanje samo jednom trećinom nominalne snage grejača, čime tanka betonska opna (nastala oko elektrode u početnoj fazi procesa) uspeva da sprečava lokalnu koncentraciju istisnutog vazduha. Količina toplote (Q) koja se oslobađa je srazmerna naponu

$$Q = C \frac{U^2}{R} \quad (6.2)$$

(C = const.)

pa se može regulisati ne samo promenom napona već i promenom razmaka elektroda. Ovaj razmak je dakle funkcija sastava betona jer zavisi od dozvoljenog gradijenta temperature za beton sa određenom dozom aditiva i cementa, a mora se prilagoditi i projektovanoj konzistenciji betona kako bi elektroda neometano prodirala u betonsku masu.

Prilikom kretanja kroz masu može doći do kontakta elektrode i položene armature pa svaku elektrodu valja obložiti slojem plastične mase dovoljne izolacione debljine. Sve ovo govori da je efikasnost primene metode u velikoj korelaciji sa obučenošću radne snage i nivoom merno-regulacionih uređaja a samim tim postavlja i visoke zahteve u pogledu pripreme za proizvodni proces. Površinske elektrode nalaze daleko širu primenu u elektro-kontaktom grejanju površinskih nosača gde se toplota aplicira preko oplata, grejnih panela ili mrežastih prekrivača. Dubina efikasnog dejstva varira, ali se orijentaciono kreće oko  $15 \text{ cm}^1$  za grejanje jedne strane ploče/zida, odnosno oko  $20 \text{ cm}^1$  za obostranu aplikaciju grejnih tela. Maksimalna dozvoljena temperatura na kontaktu betona i grejnog tela je oko  $90^{\circ}\text{C}$ , pa se i armatura mora prethodno zagrejati do  $5-10^{\circ}\text{C}$  kako bi se izbegla štetna termička naprezanja. RILEM-ove preporuke (57) ukazuju da je ovaj tehnološki postupak najefikasniji za vrlo brzo dosezanje neophodne čvrstoće materijala (60-70% MB), a da je za sve ostale zahteve izuzetno skup. Ovo stoga što je metoda elektro-kontaktinog zagrevanja ugrađenog betona je razvijena kao proizvod napora da se rashodi elektro-energije prilikom postupka zagrevanja što više smanje. Do danas je našla primenu kako kod izrade površinskih nosača tako i kod monolitiziranja montažnih konstrukcija. Optimalno polje primene nalazi kod nosača čiji je moduo površine poprečnog preseka veći od  $M_p = 6$ . Kod masivnijih konstrukcijskih oblika ide se na primenu niskotemperaturnih režima zagrevanja ( $t_{\text{max}b} = 40^{\circ}\text{C}$ ) koji dosta brzo daju kritičnu čvrstoću površinskog sloja betona i time jezgro betona prepustaju dejstvu egzotermalne toplote.



Kod primene elektro-kontaktnog zagrevanja je posebno važan problem brzina zagrevanja jer se toplota, u materijalima kakav je i beton, relativno teško prenosi pa bi kod prekoračenja dozvoljenih gradijenata došlo do svojevrsnog "pečenja" površinskog sloja. Brzina zagrevanja u najvećoj meri zavisi od načina zagrevanja (jednostranim ili dvostranim apliciranjem grejnih ploča) i modula površine nosača. Preporuka je (32) da se, kao kod elektro kontaktnog grejanja, za ploče i zidove primenjuje obostrano zagrevanje. Po dostupnim starijim radovima dopušteno je ubrzano zagrevanje od:

max 20°C/h	za $M_p \geq 14$ i jednostrano zagrevanje
	za $M_p \geq 7$ i obostrano zagrevanje
max 15°C/h	za $10 \leq M_p \leq 14$ i jednostrano zagrevanje
	za $5 \leq M_p \leq 7$ i obostrano zagrevanje

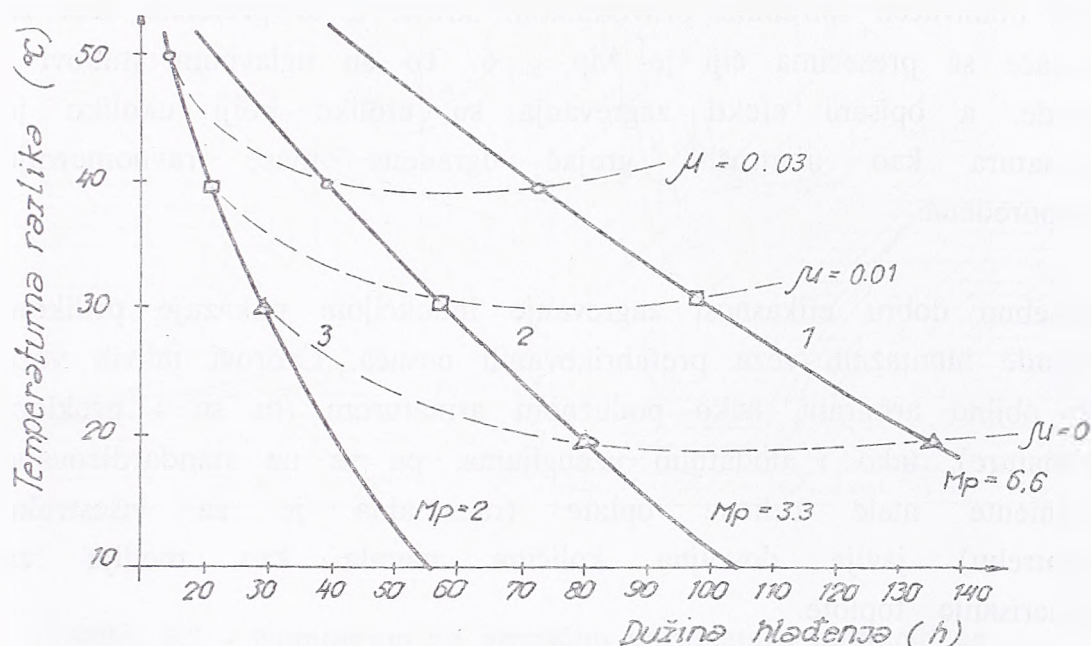
a kod hlađenja su uslovi daleko oštriji pa se preporučuje gradijent od:

max 15°C/h	za $M_p \geq 14$
max 10°C/h	za $10 \leq M_p \leq 14$
max 5°C/h	za $5 \leq M_p \leq 10$

Pri analizi uticaja termo-šoka na beton treba imati na umu da se sposobnost betona da se odupre unutrašnjim naprezanjima uvećava sa stepenom armiranja. *Krasnovskij* je pokazao da preseki sa  $M_p \geq 5$  mogu, ukoliko imaju  $\mu \geq 1\%$ , mogu lako izdržati pad i od  $\Delta t = 40^\circ\text{C/h}$  a da sa  $\mu \geq 3\%$  pad može ići do  $\Delta t = 50^\circ\text{C/h}$ . Ograničenja, data SNIP-om se dakle pokazuju konzervativnim jer dopuštaju samo  $30^\circ\text{C/h}$  pada.

Na proces sazrevanja neposredno utiču temperatura i vreme ali se ujednačenost sazrevanja unutar betonskog nosača javlja kao funkcija koeficijenta toplotne provodljivosti betonske mase. On se u toku procesa zagrevanja betona (nakon ugrađivanja) značajno

menja, što pokazuje i prethodni dijagram (slika 6.3) u kome krivama koeficijenta odgovaraju krive režima obrade t.j. krive promene temperature betona.



Slika 6.4 - Dijagram zavisnosti dužine hladenja betona od modula površine i koeficijenta armiranja (102)

Poseban tehnološki problem, na koji je ukazao i tim sovjetskih istraživača (1979. god.) je pad vlažnosti površine nosača pod uticajem visoke temperature. Autori predlažu primenu sistema "kapalica" koje bi između betona i elektro-grejača održavale vodeni film tokom 4-5 sati aktivnog dela procesa obrade. Na žalost, preciznost rada je na gradilištu još uvek na nedovoljno visokom nivou pa ovakvi postupci nemaju širu praktičnu primenu.

Na osnovu poznatih primera može se reći da se kod pločastih formi troši oko  $25 \text{ kWh/m}^3$ , dok masivni blokovi zahtevaju i  $50 \text{ kWh/m}^3$ , a dosadašnja iskustva govore da je prilikom zagrevanja potrebno kontrolisati proces na svaka 2 sata, u toku procesa izotermije ukupno 2 puta u toku smene i tokom hladenja 2 puta za 24 sata.

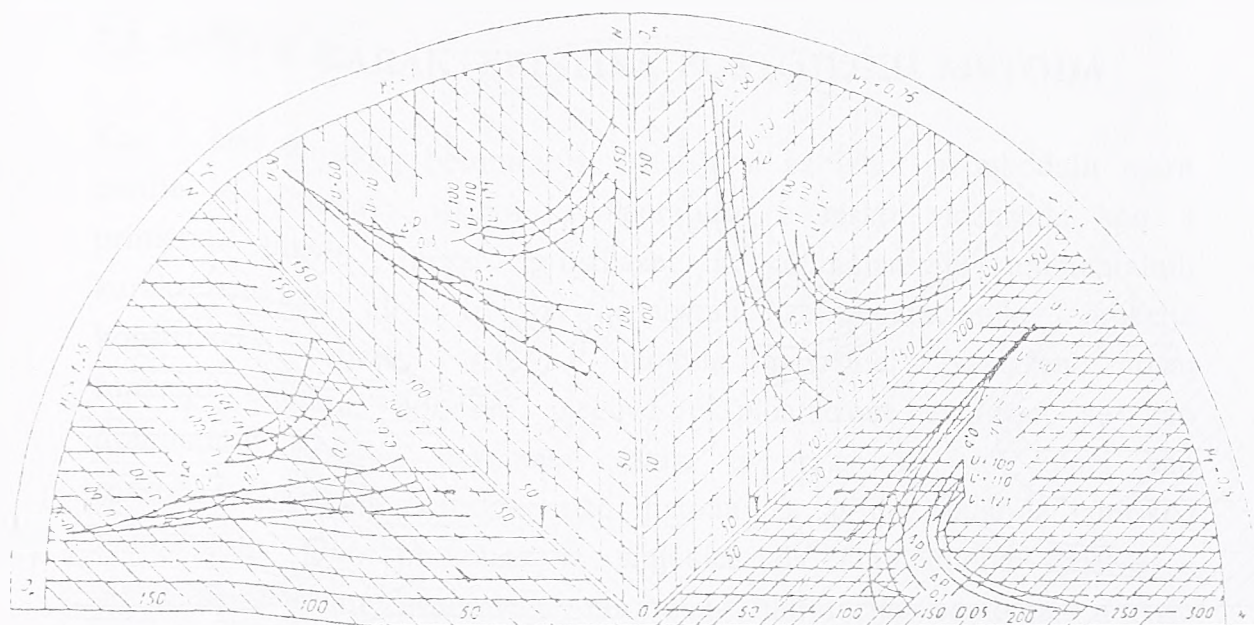
#### 6.5.4. PRIMENA INDUKCIJE I INFRACRVENOG ZRAČENJA

Efekat zagrevanja čeličnih predmeta zahvaćenih elektro-magnetnim poljem može se koristiti samo ukoliko armirani betonski nosač može biti obuhvaćen spiralnim provodnikom struje, a to pretežno važi za nosače sa preseccima čiji je  $M_p > 6$ . To su uglavnom stubovi i grede, a opisani efekti zagrevanja su utoliko bolji ukoliko je armatura kao unutrašnji grejač ugrađene mase ravnomernije raspoređena.

Posebno dobru efikasnost zagrevanje indukcijom pokazuje prilikom obrade montažnih veza prefabrikovanih nosača. Čvorovi takvih veza su obilno armirani, kako podužnom armaturom (tu su i preklopi armature), tako i dodatnim uzengijama, pa se uz standardizovane elemente male čelične oplata (racionalna je za višestruku upotrebu) javlja dovoljna količina metala kao medija za generisanje toplote.

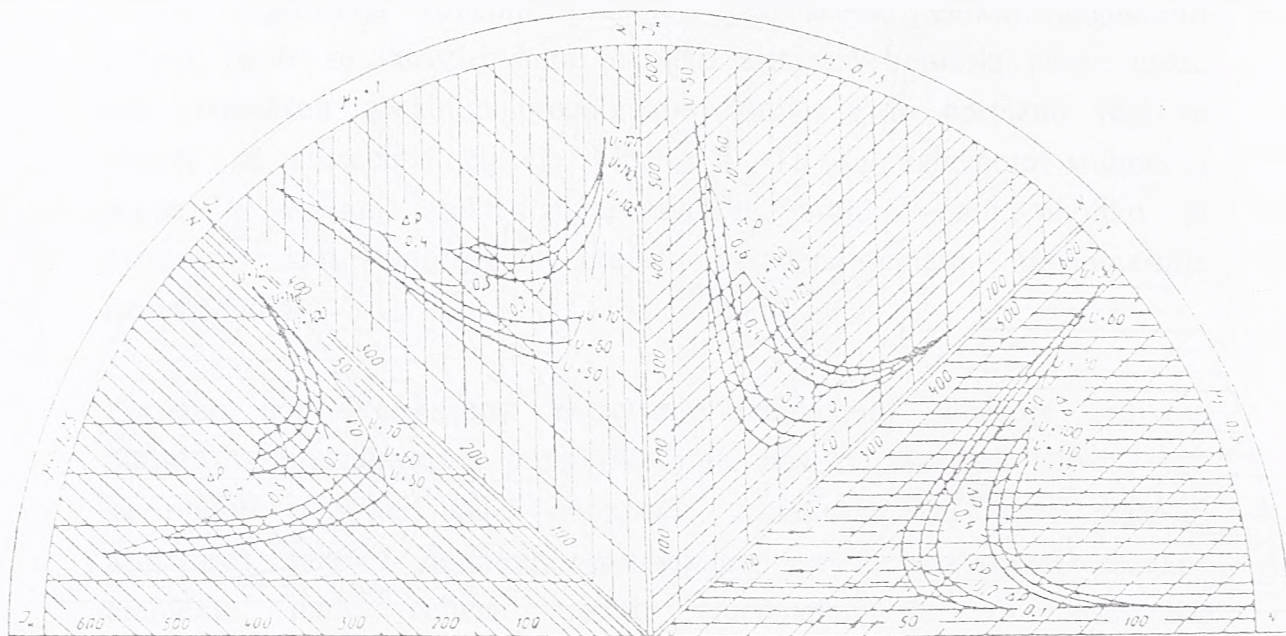
Proračun svih potrebnih parametara za indukciono grejanje vrši se uz primenu nomograma (slika 6.6) pri čemu treba voditi računa o stepenu armiranja poprečnog preseka ( $\mu$ ), broju namotaja induktorskog kalema ( $N$ ), naponu struje ( $U$ ) i dužini jednog namotaja ( $P_{rs}$ ). Tako se jačina struje u induktoru lako dobija ukoliko se znaju  $P_{rs}$ ,  $\mu$ ,  $N$  i izabrani radni napon  $U$ , kada se u sektoru za poznati stepen armiranja nade presek  $U$ -krive i linije koja definiše broj namotaja kalema  $N$ . Infra-crveno grejanje se suštinski razlikuje od indukcionog jer je izazvano transformacijom zračenja u toplotnu energiju. Lampe ("grejači") se postavljaju na udaljenost od oko  $1 \text{ m}^1$  od površine ugrađenog betona (za lampe trapezoidnog oblika), odnosno do  $3 \text{ m}^1$  ako su lampe sferične. Spektar betonske apsorpcije je najveći za zračenja emitovana lampama zagrejanim na  $300-800^0\text{C}$ , ali se zračenjem zahvata samo površinski, izloženi deo konstrukcije, dok se dubinsko dejstvo ostvaruje kondukcijom toplote.





Slika 6.5 - Nomogram za proračun parametara indukcionog zagrevanja nosača sa perimetrom od 150 cm (57)

Kao što je na početku poglavlja rečeno na izbor metode značajno utiče tip objekta i moduo površine prevladavajućih nosača. Tako kod objekata rađenih primenom klizajuće oplata često srećemo negu betona pod zaštitnim objekom. Čitave deonice dimnjaka, tornjeva i TV-antena se mogu, čak i na temperaturi od  $-10^{\circ}\text{C}$ , održavati u ambijentalnim uslovima od  $+20^{\circ}\text{C}$ . Nažalost, primena ovakvih objekata ne utiče na ubrzavanje procesa vezivanja i očvršćavanja (ali dozvoljava neometano sazrevanje materijala) pa se to direktno odražava i na ritmu rada odnosno roku građenja. U pomenutim slučajevima primene zaštitnih objekata dolazi do nekih pratećih efekata po kojima je, pre svega, pozanat rad u uslovim male vlažnosti a visoke temperature - kakva je i pustinjska klima. Ti efekti uglavnom nastaju pod dejstvom toplog i suvog (hladan vazduh koji se usisava iz okoline i zagreva radi kondicioniranja prostora



Slika 6.6 - Nomogram za proračun parametara indukcionog zagrevanja nosača sa perimetrom od 250 cm (57)

unutar zaštitnog objekta je niske relativne vlažnosti) vazduha na vlažnu površinu sveže ugrađenog betona. Beton usled visokog gradijenta evaporacije gubi vlagu iz površinskog sloja pa se javlja plastično skupljanje i adekvatne prsline. Stoga treba vršiti pravilno negovanje betona uz kombinvanje postupaka sa modifikovanjem opreme za kondicioniranje prostora pri čemu se uvode uređaji za veštačko podizanje relativne vlažnosti vazduha.

## 7. METODE RADA NA VISOKIM TEMPERATURAMA

### 7.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE POSTOJEĆIH METODA

Kao i kod zimskog betoniranja kriterijumi za izbor neophodnih mera zaštite od uticaja visokih temperatura i niske vlažnosti, kao i primena takvih mera, proizilaze iz dominantnih ambientalnih karakteristika, ali i iz osnovnih eksploatacionih funkcija konstrukcije, njene vrste i modula površine. Naglašen uticaj funkcije objekta, odnosno njegove eksploatacione namene, se kao dominantni uticajni parametar javlja u praksi u istoj ulozi kao razvoj mehaničkih karakteristika betona za grupu metoda zimskog betoniranja. Ovo proizilazi iz činjenice da ambientalna dejstva u zimskom klimatu usporavaju normalnu hidrataciju cementa, a vrlo visoke temperature letnjih uslova drastično ubrzavaju evaporaciju. "Cold weather concreting" ima kritičnu tačku u maloj brzini prilaza kritičnoj čvrstoći na pritisak (a time i dug ciklus obrta skele i oplata) a "hot weather concreting" je pod stalnom pretnjom pojave velike evaporacije i prslina. Kod mnogih objekata visokogradnje prslina i ne moraju imati uticaj na eksploatacione karakteristike konstrukcije, ali kod drugih se (u hidrotehnici) posledice nekontrolisanog dejstva evaporacije manifestuju kroz znatno veću vodopropustljivost, a time i koroziju armature.

Osim evaporacije problem stvara oslobađanje toplote egzotermije u uslovima kada se, u toku prvih 24 sati, spoljna temperatura kreće u vrlo širokom intervalu a hidratacioni proces je u intenzivnom razvoju. Intenzitet početnog udara toplote se ublažava obaranjem temperature neugradenog betona (hlađenjem vode i agregata, supstitucija vode ledom...) ili hlađenjem tek ugradenog. Posebno efikasna je upotreba blendiranih cemenata čije pucolanske komponente svoj hidratacioni proces razvijaju u trenutku kada je dostignuta neophodna otpornost materijala.



Kod projektovanja sastava mešavine uobičajena je i primena retardera kao regulatora brzine hidratacije, ali se hemijskim dodacima ne rešavaju problemi temperaturnog gradijenta u masivnim elementima, tako da kod takvih konstrukcija treba uvek pristupati aktivnom postupku - hlađenju izbetonirane mase preko sistema ugrađenih spiralnih cevi.

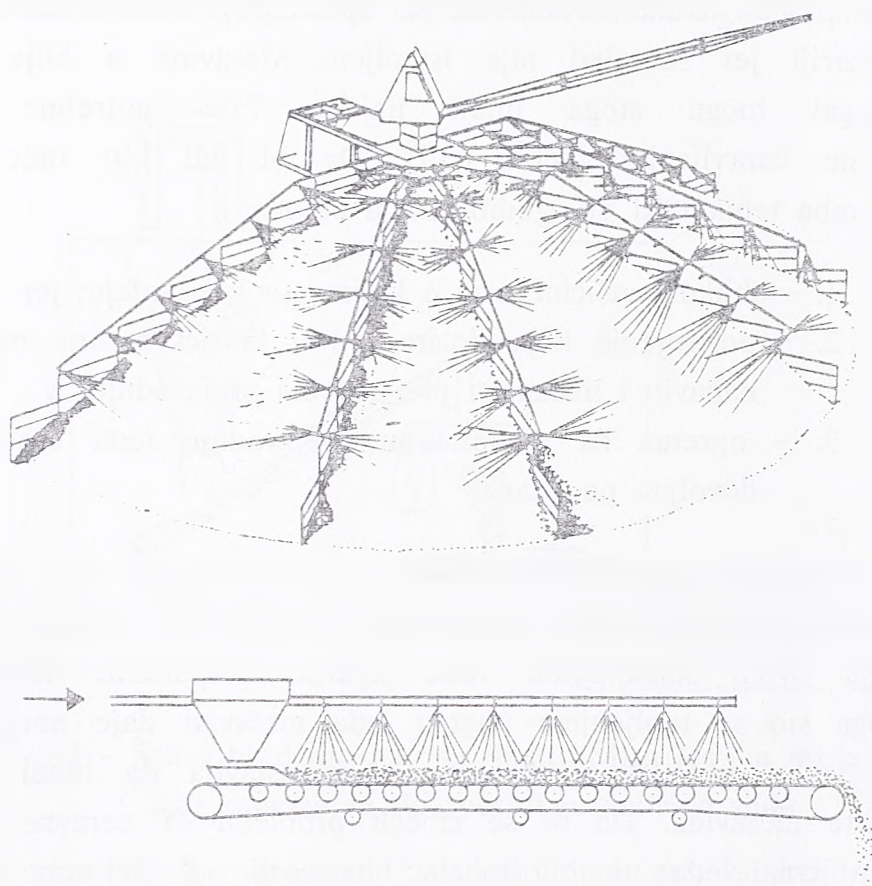
## 7.2. HLADENJE KOMPONENATA BETONSKE MEŠAVINE

Jednostavni postupci hlađenja/zagrevanja komponenata mešavine se na gradilištu vrlo lako organizuju i izvode, ali im je prava kontrolabilnost relativno niska, pa samim tim ni očekivani efekti ne mogu biti pouzdano dobijeni. Ipak, hlađenje vode i agregata (uz uobičajeno deponovanje frakcija u senci nadstrešnica) je gotovo nezaobilazan tehnološki postupak u žarkom podneblju. Pranjem sitnog agregata, na kraju procesa separiranja, oduzima mu se velika količina akumulirane toplote a zagrejana tehnička voda ide u postupku recikliranja kroz fazu veštačkog hlađenja. Krupniji agregat se, zbog proporcionalno veće mase svojih zrna, sporije hladi pa ga treba duže izlagati niskim temperaturama.

Jedan od vrlo pogodnih postupaka redukovanja temperature agregata se zasniva na intenziviranoj evaporaciji "prirodne" vlage agregata a tako se, na primer u velikim metalnim bunkerima zapremine do 300 tona, procesom vakumiranja (pritisak vazduha pada do 6 mm živinog stuba) za nepunih 45 minuta može oboriti temperatura krupnog agregata sa 43<sup>0</sup>C na samo 10<sup>0</sup>C. Jasno je da se u fazi pripreme agregatu može "zadati" potrebna vlažnost jednaka onoj količini vode koja ima ekvivalent toplote ravan željenom stepenu redukcije.

Time se proces veštački ubrzane evaporacije "hrani" vlagom doziranom u skladu sa projektovanim ograničenjem temperature agregata.

U literaturi (15) je opisan postupak potapanja agregata (max D = 150 mm) u bazene sa hladnom vodom ("immersion cooling") u kojima se za 45 min vodom ohlađenom u fazi pripreme na 2<sup>0</sup>C (cirkuliše kroz sistem pod prinudom) krupan agregat hladi i do 3<sup>0</sup>C. Mada su ovakvi betoni i prateća oprema vrlo skupi, za hlađenje krupnog agregata nema boljeg postupka.



Slika 7.1 - Hlađenje agregata na deponijama  
ili u toku transporta do fabrike

Ostale varijante sa "tuširanjem" agregata u toku transporta na gumenim trakama, ili njegovim "kupanjem" u bazenima sa vodom (agregat putuje kroz bazen na trakastim transporterima) nisu tako efikasne jer imaju pretežno površinsko dejstvo, ali je jednostavnost upotrebe uređaja za hlađenje vode koja se pritom koristi značajna prednost u odnosu na opremu za pravljenje leda. Naime, čileri za hlađenje protočne vode industrijske namene imaju

protok od oko 4,5 l/sec pri čemu se postiže pad temperature od preko 20°C (44) što gotovo u potpunosti zadovoljava potrebe srednjeg postrojenja za proizvodnju betona.

Led se dodaje vodi u komadicima različitih oblika i veličine, ali ukoliko su zrna leda veća, treba koristiti mešavinu vode i leda da tehnološki proces izrade betona ne bi trpeo zbog neravnomernosti u homogenizaciji jer sav led nije istopljen. Mešavine u koje ulazi suv agregat mogu stoga imati najviše 75% potrebne vode supstituirane izmrvljenim ledom (15). Da bi led bio industrijski korišćen treba tehnološki prilagoditi izradu betona:

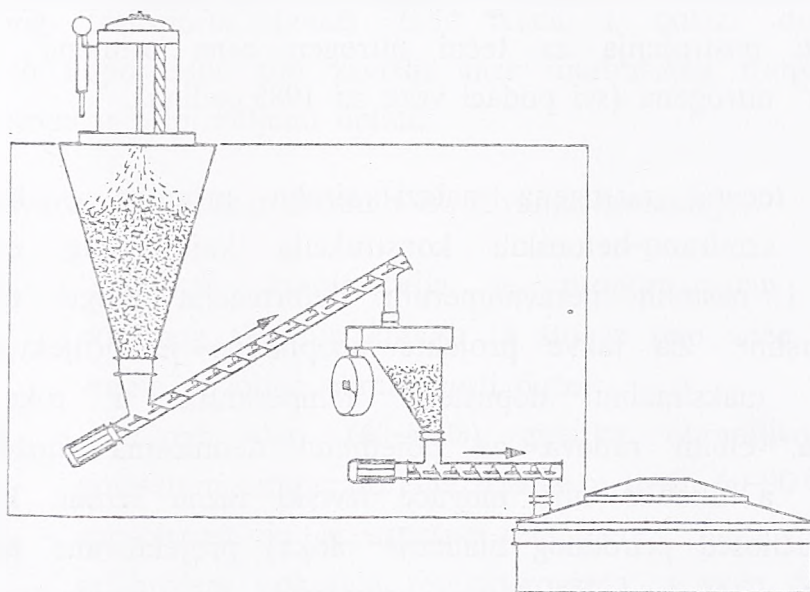
1. - obliku i veličini zrna u kojima se led dodaje; jer
2. - postrojenje koje dozira led u fabrici betona moramo nabaviti i instalirati pre početka proizvodnje, a
3. - oprema za ravnomernu proizvodnju leda često nije dovoljno pouzdana.

I pored navedenih tehnoloških zahteva skoro 150 puta veći toplotni kapacitet leda (sposobnost apsorbovanja toplote iz okoline) nego vode daju ovom supstituentu vode sigurnu tehnološku budućnost. Pored toga što se topljenjem unetog leda mešavini daje neophodna voda, ta voda (na temperaturi od 0°C) nastavlja da hladi ostale komponente mešavine. Da bi se izbegli problemi sa neravnomernim topljenjem zrna leda ne bi trebala biti veća od 10 mm što se savremenim postrojenjima tipa "McGregor R1000" (kapacitet 10 tona/dan) može obezbediti.

Mogući zastoji u proizvodnji leda, kada se dobija u vidu listića ili pahulja, su često praćeni teškoćama usled lepljenja "zrna", pa je održavanje visoke pouzdanosti kontinualnog proizvodnog procesa od izuzetne važnosti. Kao regulaciono sredstvo služe specijalni "frižideri", deponije leda, sa tehnološkom proizvodnom rezervom dovoljnom za jednu radnu smenu.



Za hlađenje još neugrađenog betona ("precooling") služi i nitrogen koji se tečan, pravilno doziran, može ubrizgavati u bubanj auto mešalice u toku transporta, a inače služi za hlađenje vode (ubrizgava se u vodu neposredno pre doziranja). Postupak hlađenja vode tečnim nitrogenom stvara mešavinu leda i vode pa je neophodno precizno pratiti procenat leda u mešavini kako bi bio na vreme korigovan u skladu sa toplotnim kapacitetom ostalih ingredijenata.



Slika 7.2 - Šema hlađenja betona dodavanjem leda u mešalicu kao zamene za deo potrebne količine vode

Ubrizgavanje tečnog nitrogena kao medijuma za redukciju toplote mešavine donosi ima niz prednosti a jedna od tehnološki najvažnijih je kontrolabilnost procesa. Ukoliko se postrojenje za proizvodnju betona opremi adekvatnim mernim instrumentima može se lako i precizno izvesti obaranje temperature u nekoliko proizvodnih koraka:

- auto-mešalica dolazi do postrojenja za hlađenje sa već unetim i primarno zamešanim komponentama,
- u bubanj se spušta digitalni termometar i automatski očitava stanje temperature u konkretnom slučaju,

- nakon izvlačenja termometra u bubanj se uvlači "šmrk" i operater aktivira ubrizgavanje nitroгена (sa radnom temperaturom od  $-200^{\circ}\text{C}$ ) koje u standardnim okolnostima ne traje duže od 1-2 minuta a ukupna količina unetog tečnog nitroгена se precizno meri tajmerom sa automatskim isključivanjem dovoda.

Iskustva sa projekta izgradnje mosta preko reke *Cape Fear* (USA) pokazuju da se uz 12.000 \$ jednokratnih troškova na mobilizaciji i demontaži postrojenja za tečni nitrogen cena primene kreće oko  $8,50 \text{ \$/m}^3$  nitroгена (svi podaci važe za 1985.godinu).

Primena tečnog nitroгена nalazi široku primenu i kod izrade masivnih armirano-betonskih konstrukcija koje zbog egzotermnih procesa i nastalih neravnomernih deformacija mogu dobiti vrlo velike prsline. Za takve projekte neophodno je projektom betona definisati maksimalnu dopuštenu temperaturu u toku procesa negovanja. Obim radova na pojedinim deonicama može prelaziti  $1000 \text{ m}^3$  a ukoliko nije moguće izvršiti faznu izradu konstrukcije (sa mogućnošću prirodnog hlađenja bloka) projektovane temperature betonske mešavine je često nemoguće (sa stanovišta kriterija tehnno-ekonomske analize) realizovati uz primenu konvencionalnih metoda redukcije temperature betonskih ingredijenata.

Najveći problem u takvim situacijama predstavlja količina vode koja se u vidu leda može dodati betonskoj mešavini. Obzirom da je toplotni kapacitet leda takođe limitiran jasno je da tehnolozi moraju naći efikasniji (mada nekad i skuplji) metod kontrole temperature. Kombinovanje hlađenja agregata, vode i adicije leda na relativno malim projektima nemaju racionalnog opravdanja obzirom da je instaliranje proizvodnog postrojenja (silosa, kada...) za hlađenje agregata izuzetno opterećenje jedinične cene betona.

### 7.3. RETEMPEROVANJE SVEŽEG BETONA

"Retempering" je specifičan proces, ili preciznije rečeno procedura, usvojena radi očuvanja željene konsistencije svežeg, pravilno spravljenog ali još neugrađenog betona putem dodavanja vode, aditiva, cementne paste ili bilo koje njihove kombinacije. Sam naziv (*re-temper-ing*) govori o "vraćanju" određenog kvaliteta, što konkretno znači da se promena konsistencije neutrališe bilo u toku spoljnog transporta (znači tada kada i dolazi do pada *slump*-a) bilo neposredno pre završne faze unutrašnjeg transporta i polaganja betona u pripremljenu oplatu.

Grupa istraživača (62) nakon obimnih istraživanja konstatuje:

1. - gubitak konsistencije je proporcionalan veličini početnog sleganja konusa (a što je ono veće to je i vreme povoljne obradljivosti duže);
2. - najveći deo (60-80%) gubitka obradljivosti pri povišenim temperaturama nastaje u prvih 60-90 min;
3. - sposobnost da se uspešno retemperuje mešavina pada sa brojem pokušaja retemperovanja, a veće doziranje superplastifikatora vodi ka segregaciji betona; i
4. - retemperovanom betonu brže pada "*slump*".

Njihova je preporuka da se beton zbog navedenih razloga najviše dvaput retemperuje. Naime, jasno je da za više ambientalne temperature postupak traži, nezavisno od w/c odnosa, više vode za retemperovanje mada i niski w/c faktori pri visokim spoljnim temperaturama traže značajno više vode. Pad čvrstoće retemperovanog betona izloženog temperaturama do 60°C je reda veličine 5% i to samom postupku daje značajnu prednost u odnosu na slične. *Samarai* je izvršio slična detaljna ispitivanja i zaključio da retemperovanje ne utiče na prirodu betona i njegove karakteristike pa je kao optimalnu količinu vode (kao najefikasnijeg sredstva za retemperovanje) utvrdio onu "koja vraća



sleganje konusa na meru dobijenu neposredno nakon inicijalnog mešanja". Nadoknađivanje prethodno izgubljene vlage je dakle manje opasno od nadoknađivanja prognoziranih gubitaka vode.

U svom vrlo obimnom i iscrpnom radu *Samarai* je izneo precizne podatke o brzini pada *slump*-a u toku prvih sat vremena nakon izrade mešavine:

na $t_v = 40^{\circ}\text{C}$	pri $w/c = 0,40$	brzina je oko $13 \text{ cm}^1/\text{h}$
	pri $w/c = 0,50-0,60$	brzina je oko $5-6 \text{ cm}^1/\text{h}$

da bi na još višim temperaturama brzina promene konsistencije bila ujednačena za sve mešavine i računska vrednost brzine pada *slump*-a tako da se primenom ovih podataka može odrediti neophodna količina vode za retemperovanje ako su poznati:

- a. - vreme potrebno za transport, i
- b. - prosečna ambientalna temperatura,

ali je ipak treba pažljivo dozirati uz povremena kontrolna merenja sleganja konusa.

Osim primenom vode, obradljivost se mešavini vraća i pomoću dodatnih količina superplastifikatora, ali i one imaju slične efekte kod više ponovljenih retemperovanja (sve slabiji uticaj na konsistenciju), a pritom su i značajno skuplji od vode. *Rixom* i *Mailvaganam* (59) su u principu protiv retemperovanja vodom jer smatraju da je ono, laički shvaćeno pa tako i izvedeno, uzrokovalo znatne štete. Zato daju prednost kvalitetnim retarderima kao regulatorima procesa hidratacije i superplastifikatorima u fazama osnovnog i naknadnih doziranja. Značajan problem kod primene brojnih postojećih (raspoloživih) aditiva je upravo nedostatak pouzdanih rezultata o ponašanju betona sa pojedinim aditivima (tip i količina se menjaju od slučaja do slučaja) na visokim temperaturama.

#### 7.4. PRIMENA ZAŠTITNIH PREMAZA

Zaštitni premazi ("*curing compounds*") su samo jedna od varijanti "membranske" zaštite ("*membrane curing*") koja fizičkom preprekom sprečava prekovremenu evaporaciju.

Razlikujemo sledeće tipove membrana (72):

1. PVC folije (0,10-0,25 mm<sup>1</sup>) prekrivene slojem vlažnog peska koji isparavanjem umanjuje štetno dejstvo kratkotalasne sunčeve radijacije;
2. vodootporni papir, obično obostrano plastificiran;
3. polietilenski rastvori ili rastvori naftnih derivata sa visokim procentom suve materije;
4. bitumenske emulzije;
5. rastvori na bazi gume ili epoksi smole; i
6. mešavine za negu betona ("*curing compounds*") u vidu parafinskih ili uljnih emulzija.

Membranska zaštita je vrlo efikasna jer, kvalitetno izvedena, u površinskim nosačima (meduspratna konstrukcija, temeljna ploča, betonski podovi ili saobraćajnice...) zadržava dovoljno vlage za razvoj mehaničkih karakteristika. Iako su jednostavni i vrlo efikasni jutani pokrivači natopljeni vodom se sve više kombinuju sa zaštitnim premazima jer te kombinacije daju najbolje rezultate. Da bi isparila površinska vlaga iz ugrađenog betona treba sačekati bar par sati vremena kako bi prijanjanje *compound*-a bilo efikasno. Uslov za primenu parafinskih emulzija je da reflektuju 60% svetlosti, pa tamnije (bitumenske) premaze valja dodatno štititi premazivanjem krečnim mlekom što unosi nepotrebnu dozu ljudskog rada. Membranska zaštita mora biti pravovremena, u protivnom će biti premašena dozvoljena količina evaporacijom izgubljene vode od 1,5 l/m<sup>2</sup> izložene površine.

## 8. ALTERNATIVNE METODE I MODELI DONOŠENJA ODLUKA

### 8.1 UVOD

Brojna istraživanja i naponi da se organizacioni oblici usavrše i učine efikasnijim ne sprečavaju sistem, u kome se ti oblici javljaju, da se na principu prilagodavanja okruženju tako adaptira da samoinicijativno usvoji optimalnu formu. Zakoni tržišta neumoljivo vrše svojim ekonomskim mehanizmima selekciju tehnologija, raspoložive opreme i znanja. Ali, obzirom da je osvajanje i primena nove tehnologije višegodišnji proces a ti mehanizmi imaju u suštini kraći "eksploatacioni" vek to su neophodni suptilniji instrumenti pri odlučivanju o investicionim ulaganjima u osvajanje novih metoda rada.

Višegodišnji rad, kakvo je istraživanje metoda betoniranja u posebnim uslovima, se stalno sukobljava sa prilivom mnogih novih činjenica i znanja koji utiču na odnos istraživača prema obliku usvojenog modela. Međutim, sami ciljevi rada na svoj način određuju duktilnost modela, njegovu strukturnu otpornost poremećajima iz okruženja, čime olakšavaju napore kod oblikovanja. U svakom slučaju model mora (obzirom na subjektivne razlike u pristupu izboru metode) ostaviti određeni stepen slobode donosiocu konačne odluke. Takav uslov ispunjava samo model koji maksimalno precizno registruje koordinate problema izbora (a to su objektivne odlike pojava oblika metoda rada) i pogodnim instrumentarijem svodi oblast subjektivnih stavova donosioca odluke na grupu onih koji bi se mogli podvesti i pod preferencu kolektiva.

Pre no što se pristupi praktičnoj primeni nekog od raspoloživih postupaka za optimizaciju tehnologije betonskih radova u posebnim ambijentalnim uslovima korisno je sagledati stanje razvoja i tih tehnoloških postupaka i spremnost društva da prihvati inženjerske



odluke zasnovane na određenom stepenu aproksimacije stvarnosti. Po jednoj od široko prihvaćenih definicija tehnologija je "svako sistematizovano praktično znanje zasnovano na ispitivanjima i/ili naučnoj teoriji koje stvara i/ili uvećava sposobnost društva da proizvodi dobra i usluge a koje je otelotvoreno u proizvodnoj moći (veštini) organizacije ili mašina". Međutim, ova stečena znanja često ne daju egzaktno utvrđene radne parametre proizvodnog procesa već se neki od tih parametara prihvataju kao racionalni samo ukoliko su u okviru empirijski potvrđenih granica. Takav pristup donosi mogućnost kretanja *output*-a procesa u relativno širokim granicama. Ako se, kao žrtva kompleksnosti matematičkog modela, uvede i određena simplifikacija problema postavlja se pitanje da li je optimalno rešenje, dobijeno na tako "fluidnoj" bazi, pravi odgovor inženjera na prvobitno postavljeni zadatak. Jedan od mogućih odgovora nudi *D.I. Blockley* u knjizi "The nature of structural design and safety" gde kaže da je ono što, u okviru neke naučne hipoteze, možemo smatrati istinom jeste samo "najviše što se u datom trenutku može, a i to će u daljem toku rada biti revidovano". Zato se i postupkom optimizacije ekstraktovane metode moraju posmatrati u svetlu konkretnih okolnosti koje određuju njihovu praktičnu primenu.

Naravno, nekad je "adekvatno rađen i na vreme završen posao mnogo gori (izbor) od remek dela koje je došlo sa zakašnjenjem" ali u konkretnom slučaju se radi o postupcima koji spadaju u deo rutinskih obaveza dobro obučениh radnih brigada pa se i mala racionalizacija tehnoloških rešenja odražava kako na dinamici izvođenja radova tako i na direktnom smanjenju proizvodnih troškova pa atraktivnost teme ima i svoju praktičnu podlogu. Ono što se prilikom istraživanja nekog realnog problema uobičajeno javlja je *potreba* (istraživač je ipak čovek !) da taj problem rešimo na neki od uhodanih, dobro poznatih načina. Oslanjanjem na iskustvo drugih dolazi se u opasnost da se uspešna primena neke tehnike nastavi neuspešnom primenom na problemu koji

je srodan nizu obradenih ali i u dovoljnoj meri različit da bi zahtevao autentičan pristup.

Metode linearnog programiranja su našle uspešnu primenu (ili je bar mogu naći) u mnogim oblastima građevinarstva. One su deo opšteg obrazovanja građevinskih inženjera. Nažalost, one su mahom okrenute maksimiziranju jednog izdvojenog parametra problema i ne ostavljaju dovoljno mogućnosti za sveobuhvatniju procenu brojnih raspoloživih alternativa. Tačno je da su mnoge metode operacionih istraživanja oblikovane sa ciljem da izvrše efikasnu selekciju i izbor najpovoljnije varijante, ali je inženjerska obaveza da brzo izvrši subjektivno vrednovanje i favorizovane i "prve-do-nje" alternative pa, zašto da ne, i najnepovoljnije među njima. Obaveza proističe iz činjenice da se matematičkim programiranjem ne mogu obuhvatiti, predstaviti, sva iskustva donosioca odluke a konačno prihvatanje nekog rešenja problema je ipak subjektivan čin.

## 8.2. O PRIRODI PROBLEMA I MODELA

Predmet analize u ovom radu je realan problem izrastao iz višegodišnje borbe domaće građevinske operative na dobijanju i realizaciji poslova u inostranstvu, u klimatima koji zahtevaju specifična tehnološka rešenja. Sama analiza u ovom poglavlju će bazirati na pretpostavkama da je problem shvatljiv, podložan merenju i sistemske prirode. To bi, prema P. Rivett-u ( ) bilo dovoljno da skup mogućih uzroka, povezanih na kompleksan način bude proučen a pojedini aspekti problema shvaćeni u kvantitativnom i kvalitativnom pogledu. Tokom analize biće nužno izvršiti niz klasifikacija koje podrazumevaju opasnost od subjektivnog procenjivanja pripadnosti predmeta posmatranja određenoj grupi. To je naglašeno prisutno u graničnim slučajevima kada nisu jasno izražene odlike jedne ili druge klase. Sa druge strane

klasifikovanje svojim *podrazumevanjem* odlika pripadnika klase dozvoljava "skok" preko onih segmenata procesa odlučivanja za koje nemamo dovoljno sistematizovanih podataka.

Sam model (ili hipoteza formulisana kao "logičan kvalitativan iskaz") je podložan kvantitativnoj analizi raspoloživih podataka obzirom da i sam predstavlja "skup kvalitativnih i kvantitativnih logičkih odnosa koji povezuju relevantne oblike pojave stvarnosti" a može se predstaviti u obliku:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m; y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (8.1)$$

u kome su  $x_i$  - kontrolabilne promenljive, a  $y_i$  - nekontrolabilne promenljive. U konkretnom slučaju X - promenljive su iz oblasti menadžmenta, odnosno upravljanja tehnološkim sistemom, i suočene su sa grupom Y - promenljivih koje obuhvataju uticaje klimatskog, ekonomskog, socijalnog i drugih slojeva okruženja.

Iole ozbiljnija analiza nekontrolabilnosti promenljivih bi dala vrlo heterogene rezultate obzirom da je čovek s vremenom ovladao mogućnostima ograničavanja polja štetnog delovanja okruženja. Da bi u tome bio maksimalno efikasan on je bio prinuđen da za potrebe realizacije svojih ciljeva uoči i formuliše neophodne uzročno-posledične veze promenljivih, sagleda strukturu problema i na bazi opšte usvojene logike formira modele kojima se manifestacije stvarnosti mogu uspešno simulirati.

Zadatak ove analize je da formira model za ocenu efikasnosti brojnih, različitih tehnoloških postupaka, a njihova zajednička odlika je što su, na osnovu spoznaje i kvantitativne procene mogućih vrednosti nekontrolabilnih promenljivih usvojili (ili su im zadate) takve vrednosti X - promenljivih za koje se veruje da na zadovoljavajući (a u nekim slučajevima i optimalan) način realizuju različite postavljene ciljeve.



### 8.3 OSNOVE VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE PROBLEMA

Rešavanje višekriterijumskih problema javlja se i u svakodnevnom životu a karakteriše ga proces odlučivanja u uslovima postojanja različitih, često konfliktnih kriterija. MCDM (*multiple criteria decision making*) karakterišu između ostalih:

- a. - činjenica da svaki problem ima brojne karakteristike, atribute, tako da donosioc odluke mora među njima izabrati, usvojiti ili osmisliti grupu relevantnih atributa ali i voditi računa da se pri rešavanju određenog problema postizu određeni ciljevi (koji su često različitih priroda) za koje važe posebne grupe atributa;
- b. - činjenica da su važeći kriteriji obično međusobno suprotstavljeni, pa je donosioc odluke i sam u konfliktu jer je on taj koji utvrđuje kriterije i procenjuje stepen zadovoljenja;
- c. - činjenica da pomenuti ciljevi, tj. odgovarajući atributi problema imaju različite prirode pa se i mere različitim jedinicama, te se ne mogu adekvatno upoređivati;
- d. - proces rešavanja problema može se pratiti u dva oblika: u vidu projektovanja, oblikovanja najboljeg rešenja ili u izboru jednog (najboljeg) rešenja između konačnog broja postojećih, već oblikovanih rešenja.

MADM (*multiple attribute decision making*) se odnosi na probleme za koje već postoji grupa determiniranih rešenja, čiji je ukupan broj - razuman. Tek tada se među njima vrši selekcija. Da bi se

postupak mogao adekvatno opisati biće korišćena uobičajena terminologija koja podrazumeva da je:

**kriterij** - mera efektivnosti, on je osnova za razmatranje i razvijanje analize problema.

**cilj** - unapred definisani nivo aspiracija koji mrešenjem problema treba biti dostignut ili ne sme mbiti prekoračen u toku određenog perioda vremena. Često ih smatramo stvarnim ograničenjima mjer mlimitiraju grupu alternativnih rešenja. Valjalo bi razlikovati taktičke (dugoročne) od strateških (kratkoročnih) ciljeva pa u skladu sa tim i vrednovati stepen njihove praktične realizacije.

**atribut** - drugim rečima to je komponenta, parametar, faktor, karakteristika ili osobina neke posmatrane pojave. Atribut treba da opiše nivo ostvarenja cilja.

Optimalno rešenje u literaturi poznato i kao (pareto - optimalno, neinferiorno, efikasno, dominantno) je ono koje kao rezultat daje simultano maksimalne vrednosti svih funkcija cilja, odnosno:

$$F(x^*) > F(x) \quad x \in X \quad (8.2)$$

gde je  $X$  - skup dopustivih rešenja, tj. ne postoji neko  $x \in X$  za koje je:

$$F(x) > F(x^*) \quad \text{kao i} \quad (8.3)$$

$$f(x) > f(x^*) \quad \text{,za bar jedno } x \quad (8.4)$$

Optimalno rešenje je poznato i kao: idealno, superiorno i "tačka utopije", a kao jednu hipotetičnu alternativu možemo ga opisati kartezijskim proizvodom koji čine "najželjenije vrednosti" po svim atributima datim jedinstvenom matricom odluka, tj.:

$$A^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*, \dots, x_n^*) \quad (8.5)$$

pri čemu se pod datim oznakama podrazumeva:

$$x_j^* = \max_i U_j(x_{ij}) \quad (8.6)$$

gde je  $U_j(x_{ij})$  ocenjena vrednost (funkcija korisnosti)  $j$ -tog atributa.

U okviru MADM sve uvedene i posmatrane alternative mogu da se opišu bilo kvantitativnim ili kvalitativnim (fazi - "fuzzy") atributima. Za svakog analitičara je veliki problem upravo nehomogenost jedinica mere. Pored toga, za višekriterijumski model izuzetno je važna precizna skala vrednosti svih onih kriterija koji se mogu kvantificirati. Postoje tri vrste primenjivih, upotrebljivih skala:

- a. - **ordinalna skala** uređuje alternative po hijerarhiji ali ne daje prave informacije o relativnom odnosu pojedinih rangova (ili rangiranih alternativa);
- b. - **intervalna skala** donosi kao meru susednih rangova određenu, uvek istu vrednost koja (kao jedinica mere) dozvoljava merenje relativne udaljenosti od utvrđenog, arbitražnog početka skale (primer su  $^{\circ}\text{C}$ ,  $^{\circ}\text{F}$  skala temperature koje obe imaju "nultu tačku");
- c. - **proporcionalna skala** je u najširoj upotrebi jer ima podjednake intervale ali nema "nultu tačku" (skale težina, zapremina, novca... imaju jedinicu mere).

Kvalitativne atribute (poznati su u stranoj literaturi i kao *fuzzy attributes*), iz razloga praktičnosti i efikasnosti, preslikavamo u intervalne skale tako što usvajamo skalu od 1 do 10, ili slično, s tim da je najmanja vrednost skale adekvatna mera:



- *najlošijeg zadovoljenja atributa* čije "povećanje" u nekoj alternativni podrazumeva i "proporcionalno" veću korist za donosioca odluke, odnosno:

- *najboljeg zadovoljenja atributa* čiji rast podrazumeva rast štete za donosioca odluke (naprimer, najvišu cenu rangiramo najniže a što je cena/atribut niža to je rang na intervalnoj skali viši).

Problem koji obavezno donose intervalne skale je "kako dodeliti međuvrednosti". Na primer u pomenutom slučaju je neki prosečni stepen zadovoljenja adekvatan oceni (vrednosti) 5 ali svi oni stepeni koji su "između" ( $1 \rightarrow 5$  ili  $5 \rightarrow 10$ ) moraju imati vrednosti dodeljene u zavisnosti od ukupnog broja intervala jer je svaki interval ovakve skale obavezno isti.

Normalizacija vrednosti atributa nije uvek nužna stepenica u hođu ka optimalnom rešenju ali se njom obezbeđuju uporedljivost skala atributnih vrednosti. Normalizovane vrednosti  $r_{ij}$  se dobijaju iz:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\left(\sum_i x_{ij}^2\right)^{1/2}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8.7)$$

pa sam postupak ima za posledicu da svi vektori normalizovane matrice  $R$  (sa vrednostima atributa kao koordinatama) imaju svoju "jediničnu" dužinu a obzirom da je  $R$  ( $r_{ij} \in R$ ) bezdimenziona matrica lako se može uspostaviti odnos "manje-veće" i izvršiti određeno poredenje vektora. Sve ovo poredenje ne može dati relevantne zaključke obzirom da postupak nije sveo skale na istu dužinu tako da im se "krajevi" ne poklapaju, iz čega, logično, slede netačna poredenja. Linearizovana normalizacija kao dužinu intervala uzima karakterističnu veličinu, ili:

$$x_j^* = \max_i x_{ij} \quad - \text{maksimalnu pojavnu vrednost atributa (i), ili}$$

$x_j^* - x_j^{\min}$  - "raspon" intervala, razliku stvarno najveće i najmanje vrednosti atributa (i).

Polazeći od pretpostavke da za attribute važi stav "što veće - to bolje" dolazimo ubrzo do konstatacije da grupa vrlo važnih, ekonomskih atributa stoji u opoziciji ostalim jer za njih, prema društvenoj konvenciji, važi "što manje (košta) - to (je za nas) bolje". Na toj osnovi se i kriteriji dele na kriterije troškova ("*cost criteria*") i kriterije koristi ("*benefit criteria*") pa se i njihova normalizacija vrši kroz različite oblike transformacije.

## 8.4. VIŠEKRITERIJUMSKI MODEL IZBORA

### 8.4.1. STRUKTURA MODELA

Bilo-kako-bilo, nema formalizovane tehnike sposobne da pokrije sve korake procesa odlučivanja počev od početnog saznanja o postojanju problema do izbora jedne alternative, između više ponuđenih, koja će dati željene rezultate. Višekriterijumski model ipak može dati generalizovani pristup metodologiji rešavanja. Glavna pažnja se poklanja ustanovljenju "pravila odlučivanja" (*decision rooles*) i sistemu preference donosioca odluke jer se pri oblikovanju bilo kog višekriterijumskog modela upravo ovi pojmovi vezuju uz najveće probleme. Jedan od mogućih postupaka je iterativna procedura pribavljanja podataka o strukturi preference kada donosioc odluke oblikuje svoj stav u kontekstu analize prethodnih koraka. Polazi se od jednostavnih stavova koji opisuju preferencu a zatim se vrši nadogradnja na bazi pretpostavki koje su potvrdile svoju osnovanost u prethodnim iteracijama i pokazuju konsistentnost sa, do tog koraka, ustanovljenim pravilom odlučivanja. Oblikovanje višekriterijumskog modela i njegova efikasna primena sastavni su deo procesa odlučivanja u kome se sve alternative merodavno

procenjuju u skladu sa deklarisanom preferencom donosioca odluke. Traženi model može biti predstavljen 7-orkom:

$$(t, S, k, x, f, G, r) \quad (8.8)$$

gde su:

$t$  - postavka problema kojim se u potpunosti određuje karakter svih postavljenih ciljeva (ona mora biti dobro promišljena kako bi neinferiorne alternative mogle biti lako identifikovane a "najpoželjnija" oblikovana ili selektirana).

$S$  - skup svih alternativa koje zadovoljavaju grupu unapred postavljenih ograničenja a na različite načine vode ka postavljenim ciljevima.

Neke alternative se mogu celovito i precizno sagledati pre a neke samo u toku analize problema. Utvrđivanje članova skupa  $S$  predstavlja specifičan problem jer istraživanjem alternativa u formi podproblema, u okviru opšte analize nekog višekriterijumskog slučaja, dolazi se do zaključaka koji omogućavaju povećanje broja alternativnih rešenja za nivo podproblema pa se time i broj realno izvodivih alternativa (*feasible alternatives*) srazmerno povećava i time čini višekriterijumsku analizu složenijom. U slučaju selekcije postojećih alternativa nužna je i provera sveukupne srodnosti tih različitih puteva rešenja problema i njihovo grupisanje u podskupove.

$K$  - skup kriterija na osnovu kojih se procenjuju ili se ocenjuju posledice primene pojedinih alternativa iz skupa  $S$ .

Kod dobro proučenih tehnoloških problema moguće je kriterije osmisлити i pre analize problema i. Da bi



to bilo ostvarivo  $K_i$ , mora biti zaista bitan bilo za postavljeni cilj bilo za stav donosioca odluke, mora važiti za sve alternative skupa  $S$ , mora odslikati opšte ekonomske odlike koje donosiocu pribavlja neku korist pa u tom smislu kriteriji skupa  $K$  ne mogu ni imati oblik ograničenja.

Složeniji problemi, kakvi su brojni u oblasti tehnologije rada sa heterogenim materijalima, zahtevaju adekvatan višekriterijumski pristup a to istraživača i donosioca odluke često vodi ka neracionalnom povećanju broja kriterija. Veliki skup kriterija daje samo prividnu preciznost odraza (preslikavanja) složenog problema u složenom modelu, jer ono čemu donosioc odluke teži je merodavan zaključak u pogledu ranga pojedinih alternativa a na konačan stav o poželjnosti neke od njih kriteriji ne utiču u podjednako meri. Pritom ne treba zanemariti ni činjenicu da su svi složeni, kompleksni modeli neatraktivni za donosioca odluke, da ga mogu demotivisati za kreativan, aktivan odnos u toku analize usled čega izostaje očekivana interakcija čovek-model i gubi se šansa za analitičku procenu modela i njegovo racionalno korigovanje.

Daleko povoljniji je slučaj kada su analitičar, donosioc odluke i ekspert za posmatranu problematiku objedinjeni u jednoj ličnosti. Tada se iterativni proces vrednovanja kriterija, sa stanovišta njihove relativne važnosti i uticaja na valjanost odluke kao i njihovog svođenja na razuman broj, vrlo skraćuje. Ovakvi slučajevi su vrlo zahtevni u pogledu znanja i veštine istraživača pa su pre izuzetak nego pravilo i mahom daju rešenja za relativno uske oblasti inženjerskog interesovanja.

Relevantni kriteriji se, u inženjerskim problemima, zasnivaju ne samo na svesti o neophodnosti ispunjenja određenih mehaničkih karakteristika i manifestaciji normiranih kvaliteta već proističu iz iskustvene, praktične strane problema koja, obično, favorizuje tehnološki procesa. Bez obzira šta kriterijum fokusirao kao bitni aspekt svih alternativa, on taj aspekt mora i vrednovati preciznim poređenjem sa empirijski utvrđenim intervalom mogućih vrednosti.

*X - skup uredenih skala procene mogućih alternativa.*

Alternative se procenjuju po svakom od kriterija i dobijaju se numeričke i opisne skale  $X_i$ . Verbalne (opisne) skale nastaju kao posledica kompleksnosti pojedinih kriterija koji su tako sveobuhvatni da se odnose na više međusobno zavisnih karakteristika posmatranih varijanti. Verbalizacijom skale može se lako stvoriti opasnost od nepreciznog vrednovanja varijanti pa je treba eliminisati detaljnim i jasnim opisom kvaliteta koji se pod određenim stepenom (čije mesto u skali unapred određujemo) podrazumeva. To, u kom stepenu određena varijanta ispunjava zahteve specificirane pod nekim stepenom na skali vrednosti, može proceniti samo specijalista (ne analitičar, ne donosioc odluke) i to bilo na osnovu eksperimentalnih rezultata, bilo na osnovu stečenog iskustva o manifestacijama pojave koju kriterijum vrednuje. Ne treba naglašavati da su korektno provedena eksperimentalna istraživanja prava osnova objektivnog kvantificiranja kriterija za koje važe opisane proporcionalne ili intervalne skale. Kod kvalitativnih ocena subjektivnost se može donekle

izbeći samo učešćem brojnih specijalista približnih kvaliteta na čije bi se sudove i procene mogli osloniti podobni aparati i instrumenti matematičke statistike. Kako to proces donošenja odluke najčešće ne trpi (bilo zbog dugog procesa vrednovanja, bilo zbog neizbežnog odraza konfliktnih stavova) ostaje trag ličnog na procesu formiranja skala.

Za razliku od mnogih drugih matematičkih procedura, kod kojih se objektivnost dosledno poštuje, nad višekriterijumskim problemima ključni uticaj ima *struktura preference donosioca odluke* a ona se formira pod dejstvom racionalnog i iracionalnog dela ljudske svesti, te kao takva nosi nezaobilazan pečat subjektivnosti.

- f - *pravilo preslikavanja posmatranih alternativa u skup vektorski prikazanih procena.* Ovaj skup (Y) može biti predstavljen Kartezijanskim proizvodom uređenih skala ( $X_i$ ):

$$Y = X_1 X_2 X_3 \dots X_m \quad (8.9)$$

- G - *sistem preference donosioca odluke.* Sistem čini celokupnost stavova i saznanja koja bliže određuju preferencu (skup kriterija, skale i intervali između susednih vrednosti na njima, podskupovi alternativa određene "privlačnosti" za donosioca odluke itd.). Upravo zato što je bazirana na subjektivnim osnovama struktura preference se, kao pojavni oblik ljudske svesti, vrlo teško "objektivizira". Problem se dodatno komplikuje činjenicom da postoji interakcija članova "sedmorke" višekriterijumskog modela i da, recimo, promena relativne važnosti jednog kriterija



može dovesti do drugačijih zaključaka o rangui tretiranih alternativa.

- r - *pravilo donošenja odluka*. Može biti u vidu analitičkih izraza, algoritama ili samo u vidu verbalnog opisa a ima za cilj uređenje skupa A, tj. skupa koji obuhvata celovite procene alternativa. Ovako dobijen poredak može biti preslikan u poredak alternativa podvrgnutih definisanom skupu kriterija. Verbalni opis ovkvih pravila odlikuje heurističke pristupe, odnosno metode donošenja odluka zasnovane na induktivnom razmišljanju. Obzirom da pravilo nije artikulirano u matematičkom obliku, već bazira na nekim jasnim činjenicama, za heuristički pristup je pogodniji iterativni postupak odlučivanja. Njime se vrši parcijalno uređivanje podskupova varijanti i olakšava procedura donošenja konačne odluke ali i dozvoljava nekonzistentnost preference koja logično ne mora biti ista za sve podskupove. Pravilo donošenja odluka (r) neposredno zavisi od strukture preference donosioca odluke i, kao što je rečeno, formira se na upoređivanju kao baznom procesu. U tom procesu, pod uticajem preference, može doći do potrebe za *kompromisom*, jer se za razliku od saglasnosti (u kojoj povećanje vrednosti nekog kriterija ne iziskuje pad vrednosti bar jednog od ostalih), u oblasti kompromisa i najmanja promena kriterija izaziva smanjenja ali i povećanja vrednosti drugih kriterijumskih funkcija. Shvaćeno kao lokalni maksimum u n-dimenzionom prostoru dopustivih rešenja, konačno rešenje (definitivni izbor jedne od mogućih varijanti) je ostvarivo samo ako donosioc odluke u potpunosti vlada vrednostima minimalno potrebnih ustupaka ("*trade-off*").

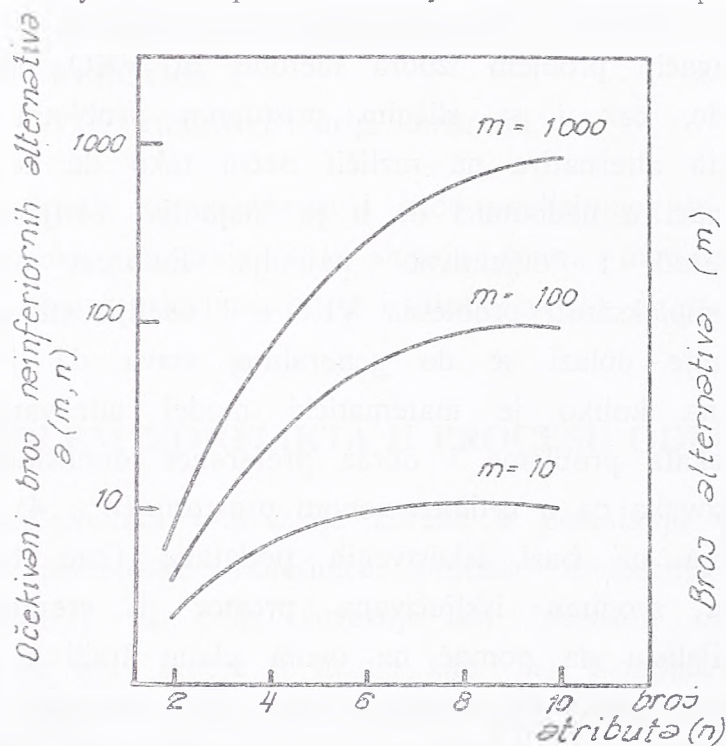
Obzirom da za ovako složen višekriterijumski model ne stoje na raspolaganju jasno i precizno definisani članovi 7-orke, jer ili nisu u pogodnoj formi ili nisu uopšte poznati, to se za svaki poseban problem može formirati više različitih modela zasnovanih na različitim faktorima i znanju analitičara i donosioca odluke.

#### 8.4.2. SELEKCIJA ALTERNATIVNIH REŠENJA

Donosioc odluke ponekad može imati poteškoće da ga brojne alternative onemogućavaju da racionalno troši svoju energiju na analizu nekolicine dominirajućih. Brojnost alternativa je odlika pretežno onih problema koji nisu adekvatnom, stručnom analizom svedeni na razuman broj alternativa. Filtriranje i odbacivanje grupe inferiornih rešenja vrše neke jednostavne metode MADM-a, kao što je, recimo, Dominans metoda ("*dominance*" - vlast, nadmoć) koja uporednom analizom para alternativa izdvaja jednu kao dominantnu a zatim sa njom upoređuje narednu... i tako redom dok se ne dobije primarno uređeni skup. Ovakav skup treba nekim preciznijim postupkom vrednovati i rangirati ali se tada dalja procedura može svesti na redukovani podskup favorizovanih alternativa. Da i takav, suženi prostor mogućih rešenja problema ima veliki broj mogućih članova (alternativa) pokazali su *Calpine* i *Golding* ( ) dijagramom (slika 8.2) koji daje vezu prosečnog (očekivanog) broj neinferiornih rešenja ( $m$ ) i broja atributa njihove ocene ( $n$ ).

Interesantan prilog tezi o jednostavnosti a korisnosti primene Dominans postupka u fazi "filtriranja" problema daje pismo *B. Francklin*-a priloženo na početku disertacije). Ovaj postupak je posebno pogodan za neodlučne donosiocce odluke, jer ne iritira njihovu nesigurnost u pogledu strukture preference, i dozvoljava pridruženom specijalisti za posmatranu oblast da detaljnije izloži aspekte samo "superiornih" alternativa. Kod mnogih tehnoloških

problema čija priroda rešenja zahteva da se, kao prihvatljivi, razmatraju samo oni tehnološki procesi koji po svakom od usvojenih kriterija zadovoljavaju zadati nivo kao vrlo prikladna metoda primarne selekcije može poslužiti konjuktivna metoda poznata i kao



Slika 8.1 - Dijagram zavisnosti broja neinferiornih alternativa od broja atributa (30)

"satisficing method". Međutim, kao što su pokazali i podaci u prethodnim poglavljima, za mnoge kriterije nije moguće usvojiti standardnu vrednost pojedinih atributa, bilo zato što oni nisu jednoznačno utvrđeni nacionalnim normativnim aktima, bilo zato što se donji prag nivoa zadovoljenja javlja kao različita vrednost za razne metode pa bi usvajanje određenog nivoa apriori izuzelo iz razmatranja čitave kategorije tehnoloških procesa (alternativa). Da bi se kakvo-takvo klasificiranje mogućih rešenja moglo izvršiti kod takvih slučajeva treba odmah izuzeti vrednovanje po "nepodobnim" kriterijumima, jer to ima isti efekat kao i zadavanje (usvajanje) neracionalno niskih standarda zadovoljenja - tada sve alternative zadovoljavaju usvojeni prag. Problem filtracije skupa



dopustivih rešenja (*feasible solutions*) nije od presudnog uticaja na konačnu odluku, pa u mnogim slučajevima nakon filtracije čak nema ni značajnijih promena u rangu grupe najbolje vrednovanih alternativa.

Sasvim je drugačiji problem izbora metode za VKO obzirom da različite metode, čak i sa sličnim pristupom problemu, uređuju skup superiornih alternativa na različit način tako da se donosioc odluke može naći u nedoumici da li je "najbolja" varijanta rešenja po jednoj metodi i "objektivno" najbolja. Polazeći od stavova izrečenih o kompleksnosti problema VKO-e i osetljivosti modela za njegovo rešavanje dolazi se do generalnog stava da je metoda onoliko precizna koliko je matematički model adekvatan prikaz najbitnijih aspekata problema i odraz preference donosioca odluke. Nesposobnost čoveka da u  $n$ -dimenzionom prostoru ( $n > 4$ ) proverava dobijena rešenja na bazi iskustvenih podataka (kao bića svoju spoznaju sveta svodimo isključivona prostor i vreme) nagoni analitičara-specijalistu da pomoć na ovom planu traži u bogatstvu metoda VKO-e. Uporedna analiza "rang listi rešenja" dobijenih srodnim postupcima daje mogućnost boljeg sagledavanja grupe visoko ocenjenih alternativa (u svetlu prednosti i mana odgovarajućih metoda VKO-e) i pouzdanijeg odlučivanja pri konačnom izboru. O složenosti ovog problema govori i stav *Easton-a*: "*The selection of a MADM method is itself a MADM problem*".

Ovaj stav je, primenjen na oblasti konstruktorskih problema, analizirao *L. Duckstein* (21) i dao pregled 13 metoda vrednovanih putem 28 kriterija. Četiri najbolje su:

1. - Kooperativna teorija igara (modifikacija kompromisnog programiranja pogodna kako za "projektantske" tako i za brojne "izvođačke" probleme odlučivanja koja daje Pareto optimum maksimiziranjem distance:

$$g(x) = \prod_{i=1}^n |f_i(x) - f_i^*|^{a_i} \quad (8.10)$$

gde je  $f_i^*$  donji prag  $i$ -te kriterijumske funkcije),

2. - Kompromisno programiranje,
3. - ELECTRE, i
4. - Višeatributivna teorija korisnosti.

a sličnost priroda tog problema i ovde analiziranog bi ove metode verovatno visoko rangirala i u slučaju izbora metode betoniranja za rad u posebnim uslovima. To je i uticalo na tok disertacije.

### 8.4.3. PROBLEM KONFLIKTA U PROCESU ODLUČIVANJA

Opisana problematika ima svoje korene u postojanju konflikta kao dominantne psihološke odrednice procesa donošenja odluke (u stranoj literaturi su česte sugestije da "decision making" treba posmatrati pre kao *proces* a manje kao *čin*). Konflikt postoji kako na početku procesa kada se ne može doneti odluka o izboru jedne između više atraktivnih i primamljivih alternativa (*M. Zeleny* u svom radu ( ) duhovito podseća na problem *Buridan*-ovog magarca koji je u sličnoj situaciji i umro dvoumeći se kojoj alternativiti da da prednost) a isto tako i na kraju procesa odlučivanja.

Finalnu odluku prati svest o "težini" kompromisa koji je učinjen prihvatanjem rešenja različitog od "idealnog" i mada konflikt malo ublažava znanje o relativnoj važnosti pojedinih kriterija pojedini, parcijalni ustupci mogu izgledati neracionalno veliki. U toj fazi može se, na osnovu saznanja o odbačenim alternativama, pristupiti korigovanju (doprojektovanju) usvojenog rešenja po pitanju parametara za koje je rang preference visok. Praksa, i ne poznajući metode VKO-e, stvara nove tehnološke postupke "stapanjem" više nedovoljno efikasnih, o čemu svedoče i brojne kombinovane (kompleksne) metode betoniranja u zimskim uslovima.

U okviru analize tehnoloških procesa osnova za primenu kriterija su posledice brojnih, različitih aktivnosti koje proces obuhvata i koje nastupaju po nekom utvrđenom redosledu. Ove manifestacije primene izabrane metode se normiraju za određene standarde uslove okruženja i kao takve postaju etaloni za praktičnu ocenu i vrednovanje alternativa. Skup uredenih vrednosti ovog porekla daje skalu ocene (procene) skupa alternativa. Međutim, standardni uslovi (kao bitne odrednice okruženja) nisu donosiocu odluke, tj. korisniku ponudene tehnologije, dovoljno atraktivni da bi uticali na strukturu preference. Zato se akcenat interesovanja stavlja na ponašanje sistema u prirodnim uslovima, sa visokim rizikom odstupanja određenih odlika sredine od normativnih vrednosti. Kod ponderisanja dobijenih rezultata posebna specifična težina daje se malim koeficijentima varijacije.

Proučavanje prirodnih i veštačkih (čovekom iniciranih) procesa unosi određenu sigurnost pri proceni u smislu preciznijeg predviđanja "kakvi će biti rezultati" koje očekujemo kao svojevrsnu rezultantu "vektora okruženja" i "vektora funkcije cilja". Pomenuto blago smanjenje rizika samo je razlog više da se uvede polazna simplifikacija problema kojim se bavi ovaj rad: klimatski uslovi (kao reprezentativni uticaj okruženja) *sigurno će biti* onakvi kakvim smo ih, kroz grupu osnovnih parametara, i usvojili za potrebe vrednovanja alternativnih metoda.

Ovakva simplifikacija je neophodan korak bliže determinističkom prostoru; ona olakšava analitički rad. Međutim, jednom uvedena ova pretpostavka postaje nezaobilazan faktor u fazi tumačenja konačnih rezultata, tj. rangova metoda rada u posebnim uslovima.



#### 8.4.4. UTICAJ PREFERENCE NA PROCES ODLUČIVANJA

Druga pretpostavka iz postupka simplifikacije, koja ima takode radni karakter, ali je sa blažim posledicama po rezultate ovog tipa zadatka, je ta da se ovde radi o slučaju kada je donosioc odluke personificiran u jednom licu; bez obzira da li strukturu preference zaista određuje jedna ili je to grupa osoba. Ovaj pristup je zahvalniji za rad jer ostavlja šire mogućnosti kod izbora prilaza višekriterijumskoj optimizaciji (13, 24). Konkretno prednosti naglašeno favorizuju interaktivne metode kod kojih se grupni donosioci odluke javljaju kao neprihvatljiv "partner" optimizacionog algoritma jer nemaju mogućnost brzog i efikasnog prestrukturiranja preference - do čega uvek dolazi u fazi razmatranja dobijenih rešenja.

Skup alternativa, čija je podobnost za vrednovanje i rangiranje prethodno utvrđena analizom sličnosti metodoloških pristupa i izabranih ciljeva, odlikuju kriterijumske funkcije  $f_1(x)$  ovde objedinjene (na nivou višekriterijumskog problema) vektorskom kriterijumskom funkcijom  $F(x)$ . Odnos kriterijumskih funkcija, komponenti vektora  $F(x)$ , uređuje funkcija vrednovanja  $V$  koja vektorskoj promenljivoj  $x$  pridružuje takav odnos da je:

$$a) f(x_1) \sim f(x_2) \text{ ako i samo ako je } V(f(x_1)) = V(f(x_2)) \quad (8.11)$$

$$b) f(x_1) \succ f(x_2) \text{ ako i samo ako se } V(f(x_1)) > V(f(x_2)) \quad (8.12)$$

a to važi za svaki par vrednosti  $x_i$  iz dopustivog skupa  $X$ . U gore pomenutim relacijama, koje pokazuju ličnu preferencu donosioca odluke, upotrebljeni simboli označavaju (respektivno) da:

- a.- ne postoji preferenca jedne u odnosu na drugu kriterijumsku funkciju (donosioc odluke se ne može odlučiti u korist jedne od njih pa kažemo da je "indiferentan"),

- b.- donosiocu odluke je prva funkcija poželjnija od druge pa kažemo da donosioc odluke preferira prvu kriterijumsku funkciju u odnosu na drugu.

## 8.5. MOGUĆI ALTERNATIVNI PRISTUPI

### 8.5.1. TEORIJA KORISNOSTI

Polazeći od činjenice da je odlučivanje intelektualni proces kojim se razrešavaju pitanja protivurečnosti više alternativnih rešenja problema sa kojima se donosioc odluke suočava, kao i procenjuju moguće posledice takvih rešenja, možemo reći da je cilj željeno stanje sistema a to znači da je *"najznačajnija mera kvaliteta (donete) odluke stepen dostizanja postavljenog cilja nakon njene realizacije"*. Kako donosioc odluke u trenutku procene atraktivnosti raspoloživih rešenja ne može izbeći direktan uticaj subjektivnog stava o poželjnosti svakog od njih to teorija korisnosti uspostavlja mehanizme pridruživanja preferenci očekivanim posledicama donete odluke. Tvorac ove teorije *Fishburn* navodi interesantan stav nekih biheviorista da se čovekova preferenca manifestuje isključivo kroz njegovo ponašanje a ne kroz odnos prema pitanju *"koja od ovih dveju (ili više) stvari vam više odgovara"*. Isključivost ovog tipa negira većinu teorijskih postavki višekriterijumske optimizacije i njenih brojnih varijantnih metoda jer negira artikulisanu preferencu kao kontrolabilnu manifestaciju ljudske svesti. Kvalitetna rešenja MCDM-a pokazuju nedovoljnu osnovanost takvih stavova biheviorista.

Subjektivnost, kao neminovna posledica angažovanja donosioca odluke, "zakrivljuje" sliku problema obzirom da svako vrednovanje alternativa bazira na iskustvu (ukusu) donosioca odluke, na proceni verovatnoće pojave dobre/loše posledice odluke i, što je

posebno značajno, pritom stalno deluje nekonsistentnost procene veličine dobiti/gubitka. Naime, u zavisnosti od trenutka procene i načina predstavljanja problema čak i iste osobe mogu jednu istu posledicu vrednovati kao "vrlo važnu", "važnu" ili "donekle važnu" što na skali preference podrazumeva potpuno različite vrednosti pondera. Čak i kad se, pogodnim metodama, neutrališe veliki deo ovog "šuma" ostaje problem kvalitetne ocene verovatnoće pojave nekih događaja u okviru reakcije sistema na izvršenu upravljačku akciju.

Tehnološki problemi, kakvima direktno pripada i problem masovnog betoniranja u posebnim klimatskim uslovima, obuhvataju procese čija se priroda relativno lako može podvesti pod poznate zakone raspodele verovatnoća ali takvi problemi najčešće nisu adekvatno strukturirani pa nije moguće razdvojiti nezavisne od zavisnih događaja. Pored toga *Horowitz* napominje da *"donosilac odluke, zasnivajući odluke samo na statistici, može biti podstaknut da napravi izbore koji nisu u skladu sa njegovim psihološkim preferencama i odnosom prema riziku"* jer statistički obrađeni uzorci kroz standardne parametre analize (srednja vrednost, koeficijent varijacije,...) ne iskazuju odnos ekstremnih oblika pojave i nekih prosečnih, očekivanih oblika pojave.

Tehnološki procesi svojom multidimenzionalnošću nagone donosioca odluke da problem pojednostavljuje primenom postupka dekompozicije na jedno-, dvo-, i retko tro-dimenzione probleme kod kojih je distribucija preferencije daleko kontrolabilnija, ali se time gubi strukturalna izbalansiranost tokova prirodnih procesa i automatski poseže za neadekvatnim modelima. Zato se procesi pri analizi moraju predstaviti u obliku koji u najvećoj meri odražava njihovu prirodnu kompleksnost a mora se naći pogodan model koji će biti dovoljno elastičan da odoli uvođenju neophodnih pojednostavljenja u vidu radnih pretpostavki.



Jedan od osnovnih aksioma *Teorije korisnosti* je da među ishodima kao događajima koji nastaju kao posledice donetih odluka a koje obuhvata skup raspoloživih ishoda mora postojati mogućnost doslednog rangiranja. Kako se rangiranje ostvaruje kroz upoređivanje ishoda nužna je puna tranzitivnost ovih događaja (ako je  $I_i \succ I_j$  i  $I_j \succ I_k$  tada je i  $I_i \succ I_k$ , gde ( $\succ$ ) označava da je ono "prvo" poželjnije od onog "drugog") a nju je u slučaju česte pojave kvalitativnih atributa vrlo teško realizovati. Pored toga, ima situacija kada se prema određenom aspektu tehnologije rada možemo odnositi krajnje indiferentno, da bi on u nekom drugom postupku dobio (za nas) nezanemarljivu važnost.

Subjektivnost donosioca odluke (veća od društveno prihvatljive) je osnovni problem kod prihvatanja *Teorije korisnosti* kao osnove za odlučivanje o pitanjima u vezi sa složenim tehnološkim sistemima i procesima. Taj problem dodatno komplikuje sklonost donosioca odluke ka riziku. Posebno jak uticaj te osobine se vidi na primeru etapnih procesa donošenja odluke. *Decision tree*, recimo, dozvoljava svakom čvoru procenu verovatnoće ostvarenja mogućih posledica pa je stalno prisutna opasnost da se izabere riskantniji put kojim se doseže maksimalna očekivana vrednost. Iz istih razloga se zahteva visoka racionalnost i konsistentnost ponašanja korisnika *utility theory*.

Sa druge strane, zbog brojnih alternativnih metoda, aktivira se uticaj osetljivosti donosioca odluke na redosled ulaska tih metoda rada u postupak uporedne analize. Tada neke varijante, ukoliko su predočene na početku analize, dobijaju viši rang nego ukoliko dođu pri kraju kada se javlja efekat zasićenja t.j. pomanjkanja *pozitivnog odnosa* prema njihovim performansama. Taj aspekt subjektivnosti može donekle biti eliminisan disciplinom i samokontrolom analitičara (on je često i donosioc odluke) ali ne sme biti u potpunosti zanemaren.

Kako su mnogi kvalitativni atributi opisanih tehnoloških procesa, na osnovu izložene prirode tih procesa, dobili pravo na adekvatan i ravnopravan tretman sa ostalim, skalarnim aspektima problema to je jasno da primena izvorne Teorije korisnosti može dovesti do neprimerenih odluka ukoliko se primeni na višekriterijumske probleme kompleksne prirode. Zato se takvi problemi tretiraju metodama višeatributivne teorije korisnosti. Da bi se ona mogla pravilno primeniti trebalo bi za svaki kvalitativan i kvantitativan atribut odrediti funkciju korisnosti kao n-dimenzioni oblik preferencije donosioca odluke. Problem je očito složen ali značajno pojednostavljenje takvog problema unosi pretpostavka o nezavisnosti skala (dimenzija) preferencije različitih atributa. Jedan od dobro razvijenih i primenljivih postupaka pomenute vrste je Metoda višeatributivne korisnosti sa aditivnom formom (23) koja uvodi uz svaki od atributa  $A_i$  i meru njegovog značaja ( $t_j$ ) za donošenje odluke maksimalne korisnosti. Kompozitna korisnost  $KU(A_i)$  bilo koje od razmatranih i vrednovanih alternativa  $A_i$  dobija se iz aditivnog oblika:

$$U_i(A_1, A_2, \dots, A_n) = KU(A_i) = \sum_{j=1}^n t_j U(A_j)_i \quad (8.13)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

u kome su:

- $t_j$  - specifične težine atributa ( $j = 1, 2, \dots, n$ )
- $U(A_j)_i$  - pojedinačne korisnosti koje su nastale kao posledica i-te akcije j-tog atributa.

U literaturi se mogu pronaći neki algoritmi za primenu ove metode a koraci koji se pritom čine su obično:

- 1.- Definisanje cilja problema,
- 2.- Definisanje skupa atributa i utvrđivanje njihovih vrednosti  $o_{ij}$  za svaku od alternativa (za kvalitativne attribute primenjuju se "bipolarne skale" za njihovo kvantifikovanje) kao i formiranje matrice odlučivanja  $O$ ,

- 3.- Rangiranje atributa u skladu sa preferencijom donosioca odluke i ocenom njihovog relativnog značaja,
- 4.- Dodeljivanje težina ( $t_j$ ) atributa i normalizovanje pridruženih težina svodenjem na  $\sum t_j = 1$ ,
- 5.- Definisane graničnih (neprihvatljivih za donosioca odluke) vrednosti usvojenih atributa,
- 6.- Definisane krivih korisnosti za pojedine attribute (najčešći oblici krivih su eksponencijalna, kvadratna i posebno logaritamska ali funkcije mogu biti i linearnog oblika),
- 7.- Formiranje posebne matrice performansi atributa upoređivanjem članova matrice odlučivanja sa usvojenim graničnim vrednostima atributa (alternative koje po bilo kom atributu ne zadovoljavaju postavljena ograničenja moraju se eliminisati),
- 8.- Preslikavanje vrednosti članova matrice performansi uočeni atributa u vrednosti članova matrice korisnosti (zakon preslikavanja definišu već usvojene funkcije korisnosti atributa),
- 9.- Proračun kompozitnih korisnosti alternativa,
- 10.- Usvajanje jedne alternative sa najvećom kompozitnom korisnošću kao kriterijem optimalnosti izbora.

Prednosti i mane Teorije korisnosti zahtevaju opsežniju analizu ali i iz navedenog može biti zaključeno da nije sasvim adekvatna za kompleksnu ocenu predmetnih metoda rada tim pre što jedan od osnovnih aksioma *Von Neumann*-a i *Morganstern*-a eksplicira jasan stav da, po ovoj teoriji, naša "ravnodušnost prema nekoj pojavi (metodi rada) neće evoluirati bez obzira kako se menjale okolnosti u kojima dolazi do pojave" - a takav *a priori* pristup nijedna tehnologija gradjenja ne može prihvatiti kao osnovu za vrednovanje.

Bez obzira na izložene mane ove teorije opisani koraci algoritma se (obzirom na "jednostavnost" postupka) nameću kao pravi obrazac za formiranje postupka koji bi na praktičan način uveo preferencu donosioca odluke i uključio je u proces selekcije metoda.



### 8.5.2 INTERAKTIVNA METODA

Metode zasnovane na interaktivnom pristupu polaze od pretpostavke da donosioc odluke pre izbora optimalne alternative nije u stanju da u potpunosti uredi strukturu svoje preference, bilo zato što je problem suviše kompleksan bilo zato što nije siguran da će posledica donete odluke biti adekvatan odgovor za *investirani korpus* (pod *korpusom* treba podrazumevati kako materijalna sredstva i ljudski rad tako i saglasnost na stepen odstupanja usvojenog rešenja od idealnog rešenja). Zato se donosiocu odluke dozvoljava da primarno strukturiranu preferencu dograđuje kroz iterativni postupak u kome je osnova za korekciju prethodne odluke saznanje o "odgovoru" višekriterijumskog modela na tu odluku.

"Odgovor" se sastoji u promeni vrednosti kriterijumskih funkcija kao posledici spremnosti donosioca odluke da odstupanjem od prvobitnih zahteva po nekom kriterijumu (ili grupi kriterija) dođe korak bliže rešenju koje je po svojoj prirodi najbliže idealnom. Osnovni problem je veličina odstupanja (ustupka), jer osetljivost modela na promene parametara nije ista za sve varijable pa postoji opasnost od neracionalnog, skupog "plaćanja" nekih minimalnih poboljšanja aktivnog rešenja.

Rešenje zadatka u velikoj meri zavisi od realnosti postavljenih ciljeva, tj. od strukture deklarisanе preference, jer u slučaju neadekvatnog modeliranja problema neće biti moguća konvergencija iterativnih rešenja, pa ni optimalno (ili bar zadovoljavajuće) rešenje. Ono što nam olakšava rad na ovaj način je primena kompjutera koji obradu problema sa više desetina promenljivih i grupom često antagonističkih ciljeva pojednostavljuje i čini mogućim brzo analiziranje i vrednovanje kompleksnih varijanti.

Očito je da se ove metode sukobljavaju sa istim onim problemom koji je donosilo *decision tree*, a to je da donosioc odluke mora o

funkciji cilja problema (čija je prava priroda nesumnjivo probabilistička) imati unapred definisane (dakle determinisane) stavove o korisnosti koja se na pojedinim etapama može očekivati. Ni blaga korekcija jednom date liste preferenci se ne može izvršiti a da to ne prouzrokuje poteškoće u procesu donošenja odluke pa je nužan mnogo elastičniji instrument vrednovanja.

### 8.5.3. VIŠEKRITERIJUMSKA SIMPLEKS METODA

U okviru analize tehnoloških problema lako je uočiti postojanje različitih, često antagonističkih, ciljeva čiju realizaciju uslovljava dostizanje (i premašivanje) nekih graničnih vrednosti atributa. Tako, u slučaju izvođenja betonskih radova u posebnim uslovima, možemo kao prve ciljeve izdvojiti : dostizanje kritične čvrstoće betona u najkraćem roku, ostvarenje maksimalne čvrstoće betona nakon 28 dana, dobijanje betona najmanje poroznosti, izvođenje proizvodnog (tehnološkog) procesa sa najmanjim učešćem radne snage... Ograničenja koja se pritom moraju sva ispoštovati odnose se na raspoloživa finansijska sredstva, broj obučenog osoblja, količinu propisanog aditiva koja (iz tehnoloških ili drugih razloga) sme da se primeni po jedinici mere i slično. Ovakva struktura problema dozvoljava formiranje matematičkog modela sa linearnim promenljivim i linearnim vezama a to se svodi na poznati oblik SIMPLEX-modela:

$$\max \sum_{j=1}^n c_{kj} X_j \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (8.14)$$

gde su ograničenja u obliku nejednačina:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8.15)$$

$$X_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8.16)$$

i gde oznake imaju sledeći smisao:

- $X_j$  - promenljive (ciljevi)  $n$  - dimenzionog vektora  $X$ ,  
 $p$  - ukupan broj kriterija po kojima se vrednuje,  
 $c_{kj}$  - vrednost  $k$ -tog kriterijuma pri realizaciji  $j$ -tog cilja neke od razmatranih metoda rada,  
 $a_{ij}$  - vrednost resursa angažovanog u cilju dostizanja određenog cilja  $X_j$ ,  
 $b_i$  - element vektora ograničenja  $b$  koji definiše donju ili gornju graničnu vrednost resursa  $i$ .

Ovako strukturiran problem gradjenja u posebnim uslovima lako gubi mogućnost analize atraktivnih alternativnih tehnoloških postupaka (metoda rada) u svetlu brojnih kvalitativnih kriterija koji takođe odražavaju strukturu preference donosioca odluke a nemogu se na adekvatan način obuhvatiti modelom jer najčešće nema preciznih podataka o veličinama  $c_{kj}$  i  $a_{ij}$  koje opisuju njihov značaj. Primarno opredeljenje autora za višekriterijumski pristup dobilo je, u okviru kratkog pregleda alternativnih metoda, adekvatnu potvrdu ispravnosti. Iskušenje da se zadati, kompleksan problem pojednostavi dekompozicijom na niz manjih, pogodnijih za analizu nije bio mali. Brojnost podataka od vitalne važnosti za donošenje odluke i neophodnost doslednog poštovanja zahteva za maksimalno objektivnim vrednovanjem svih alternativnih tehnologija rada imali su neophodan uticaj na izbor metode optimizacije.

## 8.6. „ELECTRE,, - INSTRUMENT SELEKCIJE METODA

### 8.6.1. ANALIZA SAGLASNOSTI PAROVA ALTERNATIVA

Metodu je razvio i prezentirao Francuz *Benayoun* (1966. god.) da bi njenom razvoju kasnije mnogo doprineli *Buffet*, *Roy*, *Bertier* i drugi njegovi sunarodnici, kao i Holandani *Van Delft* i *Nijkamp*. Metoda (**E**limination **E**t **C**hoix **T**raduisant la **R**Ealite) se zasniva na analizi *saglasnosti* parova alternativnih planova za realizaciju nekog projekta. Pritom polazi od višekriterijumskog pristupa koji



služi za kompleksno vrednovanje rezultata (posledica) konkretnog plana  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) a tim postupkom se dolazi do članova matrice odlučivanja  $P$  :

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1I} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2I} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{J1} & P_{J2} & \cdots & P_{JI} \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

u kojoj  $P_{ji}$  predstavlja procenjenu vrednost rezultata primene  $i$ -tog plana *merenu* po osnovu kriterijuma  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ).

Neophodno je naglasiti da u trenutku utvrđivanja pomenutih *vrednosti* ne postoji tehnička mogućnost za svestrano *merenje* stvarnih performansi konkretnog plana. Zato je sve što nam preostaje svojevrsna *simulacija* ponašanja alternativnih varijanti zasnovana na visokom nivou poznavanja njihovih efekata u sličnim uslovima. Dopunski uslov za analitičara je da postoji opšte prihvaćena skala vrednosti za svaki od usvojenih kriterija kako bi *ocena* planova u okviru parcijalnih analiza bila relevantna za primenu u višekriterijumskom pristupu. Pored toga broj alternativnih planova može biti vrlo veliki (što u slučaju *blendiranih* tehnologija betonskih radova u posebnim uslovima nije retkost) pa i aparat za ocenjivanje jako tako postaje glomazan.

Da bi se olaksao proces vrednovanja on mora biti i oslobođen svih onih varijantnih planova koji su *podređeni* (po većini kriterija) podskupu "favorita". Dominaciju plana  $A_k$  nad planom  $A_l$  izražava i relacija  $A_k \rightarrow A_l$  kojom uvodimo odnos *nadredenosti* jednog plana nad drugim. Taj odnos nije proistekao iz eksplicitne dominacije  $A_k$  već iz stava donosioca odluke da je *rizik* sa kojim se ocena o dominaciji donosi *prihvatljiv* jer je alternativa  $A_k$  prema svim raspoloživim podacima *skoro sigurno bolja* od alternative  $A_l$ . Ono

sto ELECTRE metoda donosi, a pomenute alternativne metode nisu imale, je automatsko generisanje kompleksne procene vrednosti alternativa iz raspoloživog skupa i prenošenje odnosa nadređenosti sa jedne na drugu, sve do konačnog uređenja skupa ili bar odbacivanja podskupa *inferiornih* alternativa. Da bi selekcijom izdvojena alternativa zadovoljila donosioca odluke ona mora nositi odraz (pečat) njegovog stava o *važnosti* pojedinih kriterija i o *stepenu* njihovog *uticaja* na formiranje optimalne odluke (odluke koja će u najvećoj meri zadovoljiti potrebe donosioca odluke) pa je stoga neophodno uvođenje *preference* u vidu vektora:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_j) \quad (8.18)$$

koji pod članom  $w_j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) podrazumeva relativnu težinu (važnost) kriterijuma  $j$ . Ove vrednosti je teško odrediti (osim u situacijama kada se zbog frekventne primene istog *algoritma* kod donošenja odluke mogu utvrditi *prosečne vrednosti*) pa se donosioc odluke mora svaki put iznova izjašnjavati u tom pogledu. Ovo je koliko neudobno (sa stanovišta korisnika metode) toliko i prednost (u odnosu na prethodno razmatrane postupke vrednovanja) jer se donosioc odluke tera na analizu i vlastitih, ranije donetih sudova o *težini* kriterija – ali ovoga puta u svetlu u međuvremenu stečenog iskustva i prikupljenih podataka, a to sve podiže kvalitet odlučivanja. No, bez poznavanja problema i prethodnog *definisanja očekivanih* efekata primene određene tehnologije rada i utvrđivanja njihove *veličine* (dodeljivanjem odgovarajućih jedinica mere) nije moguće pristupiti dodeljivanju težinskih koeficijenata. Generalni stav sa kojim analiza konkretnog problema počinje proizilazi iz potrebe da se u toku selekcije eliminiše što je moguće veći broj *inferiornih* alternativa iz raspoloživog skupa a to je moguće samo ukoliko se usvoje dovoljno *visoki pragovi* (*threshold values*) za zadovoljenje uslova saglasnosti i nesaglasnosti (videti matrice C i D). Pri analizi moraju biti ispoštovani elementarni logički uslovi, da:

- eliminisane varijante moraju biti inferiorne bar u odnosu na jednu od atraktivnih, izabranih varijanti, i da
- atraktivne varijante ne mogu stajati u odnosu međusobne dominacije.

ELECTRE metoda koristi postupak upoređivanja i vrednovanja parova alternativnih planova po svakom od mogućih (a za nas relevantnih) efekata njihove primene. Ukoliko je, upoređivan po kriterijumu  $j$ , rezultat primene plana  $k$  ( $p_{jk}$ ) za nas *poželjniji* od rezultata primene plana  $l$  ( $p_{jl}$ ) ili najmanje *iste vrednosti* to možemo predstaviti simbolom ( $\succeq$ ) pa svakom koraku uporedne analize koji potvrđuje ispunjenje tog uslova može biti pridružen član *skupa saglasnosti* (*concordance set*) a skup je sam po sebi pridružen posmatranom paru ( $k \Leftrightarrow l$ ) i za njega važi:

$$C_{kl} = \{ j \mid p_{jk} \succeq p_{jl} \} \quad (8.19)$$

Svi ostali *očekivani* rezultati primene planova automatski generišu članove *skupa nesaglasnosti* (*disconcordance set*) za koji je:

$$D_{kl} = \{ j \mid p_{jk} \preceq p_{jl} \} \quad (8.20)$$

Ukoliko aktuelni kriterijum za vrednovanje ima intervalnu ili proporcionalnu skalu ovde uvedene simbole ( $\succeq$  i  $\preceq$ ) možemo logično zameniti nama poznatim parom ( $\geq$  i  $<$ ) respektivno uzevši oznake. Oznake uvedenih skupova su preuzete iz referentne literature ( ).

Jasno je da će (formalno gledajući) rezultat komparacije biti po alternativu  $k$  utoliko povoljniji ukoliko skup saglasnosti ima više članova ali vrednost tog skupa (sa stanovišta izražene preference donosioca odluke) može izraziti samo *zbir težinskih koeficijenata* onih kriterija koji su obuhvaćeni skupom saglasnosti, odnosno za koje je rezultat primene metode  $k$  poželjniji od rezultata primene druge posmatrane metode ( $l$ ). Relativnu vrednost skupa daje *indeks saglasnosti* koji označavamo sa:



$$c_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} w_j \quad (8.21)$$

Obzirom da je vektor  $(W)$  težinskih koeficijenata po definiciji normalizovan (tako da je  $\sum w_j = 1$ ) to i ovde automatski važi da je  $(0 \leq c_{kl} \leq 1)$  pa veći indeks saglasnosti odražava veću podobnost plana  $k$  a priori deklarisanog preferenci donosioca odluke. Ukoliko je  $c_{kl} = 1$  plan  $l$  je potpuno inferioran planu  $k$  jer ni po jednom kriterijumu ne nadmašuje očekivane rezultate konkurentnog plana. Sve vrednosti pomenutog indeksa formiraju *matricu saglasnosti* u kojoj nema dijagonalnih članova jer je upoređivanje varijanti samih sa sobom besmisleno ( $k \neq l$ ) pa matrica saglasnosti  $C$  dobija prepoznatljiv oblik:

$$\begin{bmatrix} - & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & - & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & - \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

Imajući u vidu psihološki (subjektivni) aspekt procesa vrednovanja u kome i redosled pristupanja varijantnim planovima može imati određenog uticaja na stav o preferentnosti treba konstatovati da matrica  $C$  nije nužno simetrična.

Analogno matrici saglasnosti treba formirati *matricu nesaglasnosti* koja treba da odrazi razliku alternativnih metoda izvođenja radova proisteklu iz različitih vrednosti njihovih atributa. Jer dok se matricom  $C$  na selekciju utiče strukturom preference, izraženom kroz dodeljene težinske koeficijente, nova matrica treba da uvede i izrazi *stepen* različitosti očekivanih performansi metoda rada u posebnom uslovima. Na toj osnovi uvodi se ovde i novi indeks - *indeks nesaglasnosti* ( $d_{kl}$ ):

$$d_{kl} = \max_{j \in D_{kl}} \frac{|p_{jk} - p_{jl}|}{d_j^{\max}} \quad (8.23)$$

u kome  $d_j^{\max}$  predstavlja najveću razliku istovrsnih rezultata (po istom kriteriju  $j$ ) primene metoda  $k$  i  $l$ . Uvođenjem razlike:

$$d_j^{\max} = \max_{k,l} |p_{jk} - p_{jl}| \quad (8.24)$$

omogućava se normalizacija raznorodnih rezultata primene bilo koje metode rada ( $0 \leq d_{kl} \leq 1$ ). Ovako oblikovani, indeksi  $d_{kl}$  postaju članovi matrice  $D$  koja je po obliku slična matrici saglasnosti:

$$\begin{bmatrix} - & d_{12} & \dots & d_{1I} \\ d_{21} & - & \dots & d_{2I} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{I1} & d_{I2} & \dots & - \end{bmatrix} \quad (8.25)$$

Opisanim postupkom su kreirani svi neophodni instrumenti analize pa ako indeks saglasnosti pokazuje kojim metodama treba dati prioritet tada optimiziranje odluke (po tom osnovu) treba izvršiti na bazi *maksimiziranja* njegove vrednosti i istovremeno, a po analogiji, na bazi *minimiziranja* vrednosti indeksa nesaglasnosti. Obzirom da je "sadržaj poruka" koje indeksi nose različiti neophodno je simultano ekstremiziranje njihovih vrednosti jer trivijalni problemi kod kojih je:

$$c_{ks} = 1, \quad d_{ks} = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, I) \quad (8.26)$$

nisu predmet razmatranja ovde primenjene višekriterijumske analize. Pored izloženog pristupa izdvajanje svih članova skupa inferiornih alternativa može biti zasnovano i na minimiziranju vrednosti  $c$  - indeksa i maksimiziranju  $d$  - indeksa. Ukoliko je za ovako

postavljen pristup ukupan broj skupova saglasnosti jednak  $I(I-1)$ , a to isto važi i za broj skupova nesaglasnosti pridruženih svim *parovima* kompariranih alternativa, jasno je da pre definitivnog izbora treba izvršiti *grubu* selekciju posmatranih planova na bazi dovoljno pouzdanog kriterija. ELECTRE metoda koristi u te svrhe (kao merilo blizine skupu favorita) prosečne vrednosti  $\bar{c}$  i  $\bar{d}$  komparacijom dobijenih indeksa saglasnosti, odnosno nesaglasnosti:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}} c_{kl}}{I(I-1)} \quad (8.27)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}} d_{kl}}{I(I-1)} \quad (8.28)$$

uvедene kao jedan od mogućih instrumenata selekcije. *Nijkapm* i *van Delft* ( ) konstatuju da je arbitrarnu ulogu ovih *pragova* mogla preuzeti i bilo koja druga razumna veličina ali je, sa numeričkog stanovišta posmatrano, usvojeni par daleko najpovoljniji. Svaki indeks saglasnosti (nesaglasnosti) koji *preskoči* definisani *prag* dobija istu vrednost (1) a svi ostali koji ne ispunjavaju taj uslov gube prividnu vrednost i svi postaju (0). Na taj način se matrice **C** i **D** preslikavaju u odgovarajuće (0-1) matrice **A** i **B** koje kao *matrica dominantne saglasnosti* (**A**), odnosno *matrica dominantne nesaglasnosti* (**B**) generišu članove *matrice sveukupne (agregatne) dominacije* (**E**). Naime, kako važi da je:

$$a_{kl} = 1 \quad \text{ukoliko je } c_{kl} \geq \bar{c}, \text{ odnosno} \quad (8.29)$$

$$b_{kl} = 1 \quad \text{ukoliko je } d_{kl} < \bar{d} \quad (8.30)$$

tada će *presek* ovih skupova biti izrazen proizvodom:

$$e_{kl} = a_{kl} \cdot b_{kl} \quad (8.31)$$



prema kome  $e_{kl} = 1$  potvrđuje istovremenu dominaciju po oba kriterija a  $e_{kl} = 0$  znači da bar jedan od njih nije zadovoljen. Ovakva analiza dopušta selekciju ali ne uspostavlja automatsku hijerarhiju posmatranih alternativnih metoda betonskih radova jer ne isključuje mogućnost da (u okviru grupe favorizovanih metoda) više alternativa iskaže svoju dominaciju nad grupama drugih a da pritom ne postoji informacija o njihovom međusobnom odnosu. Čak i takav odnos prema skupu varijantnih tehnoloških postupaka može zadovoljiti donosioca odluke ukoliko je u prilici da analizom na isključivo tehno-ekonomskoj osnovi odredi svoj konačni stav. Kako je takva analiza u stvarnosti realno moguća, pa čak i obavezna, to ELECTRE metodu možemo prihvatiti kao pogodan instrument analize i to tim pre što jednostavnim variranjem (zadavanjem) vrednosti pragova  $\bar{c}$  i  $\bar{d}$  skup *nedominiranih* alternativa može biti redukovan.

### 8.6.2. KOREKCIJE METODE I SPECIFIČNOSTI PROBLEMA

ELECTRE metoda na opisani način donosi višestruko poređenje alternativa zasnovano na proveru saglasnosti prethodno dodeljenih težinskih koeficijenata i poređenjem dobijenih odnosa dominacije jedne alternative nad drugom. Ona dozvoljava i ocenu međusobne sličnosti razmatranih alternativa što je dodatno kvalifikuje kao instrument za analizu tehnologija rada u posebnim uslovima. Međutim u svojoj izvornoj formi ona nije najpogodnija za precizno odslikavanje svih aspekata višekriterijumske analize problema kojim se ovde bavimo. Utisak o kompleksnosti višekriterijumske analize u velikoj meri potiče od činjenice da se čovek (oslanjajući se prvenstveno na svoja čulna iskustva) teško snalazi u višedimenzionom prostoru. Ako su, pored toga, i skale vrednosti u tim dimenzijama različite priroda komparacija rezultata je dodatno otežana. Zato je nužno normalizovati rezultate, recimo klasičnim postupkom:

$$\bar{p}_{ji} = p_{ji} \left( \sum_{i=1}^I p_{ji}^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (8.32)$$

čime se ne dobijaju skale iste dužine ili podudarnih repernih tačaka ali se gubi *dimenzionalnost* kao nepotreban *šum* u analizi, ili *nekim* sličnim. Pomenuta je (8.8 i 8.9) normalizacija apsolutno najvećom vrednošću  $p_j^*$  posmatranog kriterija. Iz obimnog uvodnog dela disertacije se lako izvlači zaključak da, na žalost, neki aspekti problema još uvek nemaju definisane kriterije za utvrđivanje limita sa opštom važnošću. Zato i izraz (8.32) ostaje pouzdan instrument normalizacije svih kriterija, osim onih koji registruju *utrošak* nekog od angažovanih resursa a za koje važi:

$$\bar{p}_{ji} = 1 - \frac{p_{ji} - p_j^-}{p_j^+ - p_j^-} \quad (8.33)$$

(  $p_j^- = \min_i p_{ji}$  )

Normalizovana matrica odlučivanja  $P$ , ukoliko je pomnožena svojom dijagonalnom matricom  $W$  normalizovanih težinskih koeficijenata  $w_j$ , daje novu matricu  $V$  :

$$V = P W \quad (8.34)$$

a njeni članovi su mnogo preciznije iskazani u obliku:

$$\begin{bmatrix} p_{11}w_1 & p_{12}w_2 & \cdots & p_{1J}w_J \\ p_{21}w_1 & p_{22}w_2 & \cdots & p_{2J}w_J \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{J1}w_1 & p_{J2}w_2 & \cdots & p_{JJ}w_J \end{bmatrix} \quad (8.35)$$

u kojem se instrumenti selekcije opterećuju strukturom preference na još jedan način. Tada je nešto drugačiji pristup stvarno i

moguć ukoliko se, u članovima  $d_{kl}$  i  $d_j^{\max}$ , umesto elemenata matrice  $P$  primene elementi matrice  $V (v_{jk}, v_{jl})$  odnosno tada je:

$$d_{kl} = \max_{j \in D_{kl}} \frac{|v_{jk} - v_{jl}|}{d_j^{\max}} \quad (8.36)$$

$$d_j^{\max} = \max_{k,l} |v_{jk} - v_{jl}| \quad (8.37)$$

Time se i kroz matricu nesaglasnosti  $D$  u proces selekcije i eliminacije - inferiornih alternativa uvodi uticaj preference donosioca odluke. Prvobitno (videti 8.6.1) izložena varijanta je samo "čistija" interpretacija osnovne ideje *dvostranog* prilazanja skupu dominantnih alternativa ali se izrazima (8.34) i (8.35) daje mogućnost za konkretnije odslikavanje specifičnosti problema. Kada su u pitanju težinski koeficijenti treba reći da se kao oblik koji bi u analizu ušao sa najpreciznijim odrazom subjektivnog vrednovanja alternativa javlja matrica  $W$  :

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1I} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2I} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{J1} & w_{J2} & \dots & w_{JI} \end{bmatrix} \quad (8.38)$$

Očigledno ovaj oblik dopušta mogućnost dodeljivanja težinskih koeficijenata svakom pojedinačnom rezultatu  $p_{ji}$  ali samim tim i *nedodeljivanja* težine (formalno je  $w_{ji} = 0$ ) ukoliko ispoljena karakteristika nije dostigla (od donosioca odluke utvrđeni) prag, odnosno vrednost koja sa tehnološkog stanovišta predstavlja neki očekivani minimum. Ono što ELECTRE metodu favorizuje u odnosu na srodne je ta pogodnost - mogućnost adekvatnog vrednovanja nivoa zadovoljenja zadanog tehničkog ili tehnološkog parametra - a oni u

principu mogu imati (za isti kriterijum) različite pragove. Tako, u pogledu brzine dostizanja kritične čvrstoće na pritisak grupa metoda na bazi zagrevanja ugrađenog materijala ina drugačije *pragove* u zavisnosti od režima zagrevanja pa samim tim i mogućnost adekvatnog realizovanja tog postupka u konkretnim klimatskim uslovima mora biti vrednovana. Da bi matrica  $W$  odrazila i *kvalitet* metode (to je moguće donekle uvesti putem težinskih koeficijenata dobijenih "intervjuisanjem" pravih eksperata) i relativnu važnost kriterija, koeficijenti  $w_{ji}$  bi trebali biti:

$$\begin{bmatrix} r_{1 \cdot w_1} & r_{2 \cdot w_1} & \dots & r_{I \cdot w_1} \\ r_{1 \cdot w_2} & r_{2 \cdot w_2} & \dots & r_{I \cdot w_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1 \cdot w_J} & r_{2 \cdot w_J} & \dots & r_{I \cdot w_J} \end{bmatrix} \quad (8.39)$$

t.j. proizvod *ranga*  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) metode rada (dobijenog prema redosledu na listi poželjnosti eksperata) i *klasičnog* težinskog koeficijenta  $w_j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) pridruženog određenom kriteriju na osnovu izražene preference donosioca odluke - a taj je obično personalizovan u liku rukovodioca plana i pripreme proizvodnje ili glavnog tehnologa. Na ovaj način proces odlučivanja dobija pečat opšteg stanja u razvoju tehnologije rada (usled čega se vrednosti rangova  $r_i$  menjaju tek nakon opsežnih statističkih analiza stavova stručnjaka iz prakse) ali i onih posebnosti konkretnog projekta koje može izraziti samo odgovorno lice t.j. njemu podređen tim konsultanata.

### 8.6.3. ODREĐIVANJE TEŽINSKIH KOEFICIJENATA

Matrica težinskih koeficijenata (8.39) traži precizno određivanje vrednosti *klasičnih* težinskih koeficijenata  $w_j$  jer se množenjem dvaju težinskih koeficijenata naglašava poželjnost (favorizuje)



alternativa. *Saglasnost* rangova metoda po opštem ( $r$ ) i posebnom ( $w$ ) kriteriju daje potvrdu ispravnosti procene metoda od strane odgovornog lica ali *nesaglasnost* ne znači automatsko negiranje njegove kompetentnosti već, kao odraz specifičnosti konkretnog projekta, utiče na ujednačavanje vrednosti kompleksnih težinskih koeficijenata ( $r_i, w_j$ ). Da bi na osnovu vlastite ocene uspostavio hijerarhiju među raspoloživim alternativama (ili kriterijima) donosioc odluke mora izvršiti upoređivanje parova alternativa dodeljujući pritom ocenu njihovog odnosa prema skali *T.L.Saaty*-a po kojoj ocena ( $w_i/w_j$ ) u vrednosti:

1 - odgovara slučaju podjednake važnosti posmatranih metoda ili atributa;

3 - odgovara slučaju kada iskustvo i procena blago favorizuju jednu od metoda ili atributa;

5 - odgovara slučaju kada iskustvo i procena čvrsto stoje na stanovištu da je jedna od njih bolja od druge;

7 - odgovara slučaju kada iskustvo i procena čvrsto stoje na stanovištu da je jedna od njih bolja od druge ali je uz to i praksa jasno pokazala tako izraženu razliku vrednosti;

9 - odgovara slučaju najveće moguće razlike u važnosti dveju alternativnih metoda ili njihovih atributa,

dok sve ostale međuvrednosti (2, 4, 6, i 8) služe u situacijama kada je nužan kompromis između stavova uobličениh na prethodno opisani način. Ukoliko se tako dobijene pozitivne ocene  $a_{ij}$  unesu u matricu  $A$  dobija se "recipročna matrica" ( $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ) u kojoj su dijagonalni članovi  $a_{ii} = 1$ . Da bi se iz matrice  $A$  dobio set težinskih koeficijenata treba primeniti metodu najmanjih kvadratnih odstupanja od *idealne tačke* (pretpostavlja se da je donosioc odluke u stanju da tu tačku definiše) i minimizirati:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} w_j - w_i)^2 \quad (8.40)$$

pod uslovom da su težinski koeficijenti normalizovani, t.j. oni ispunjavaju uslov:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (8.41)$$

i pritom su sve vrednosti koeficijenata pozitivne ( $w_i > 0, \forall i$ ). Da bi se našlo rešenje funkcije (8.40) treba formirati i *Lagrange*-ovu funkciju:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} w_j - w_i)^2 + 2 \lambda (\sum_{i=1}^n w_i - 1) \quad (8.42)$$

gde je  $\lambda$  - *Lagrange*-ov multiplikator, a zatim tu funkciju treba diferencirati po svim težinskim koeficijentima  $w_j$ . Dobija se skup jednačina:

$$\sum_{i=1}^n (a_{i\ell} w_\ell - w_i) a_{i\ell} - \sum_{j=1}^n (a_{\ell j} w_j - w_\ell) + \lambda = 0 \quad (8.43)$$

koji sa uslovom (8.41) daje  $(n + 1)$  nepoznatu i može se kao sistem rešiti i dati traženi vektor  $w$ . Sistem se inače može prikazati i u matricnoj formi:

$$B \cdot w = m \quad (8.44)$$

gde su:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n, \lambda)^T$$

$$m = (0, 0, \dots, 0, 1)^T$$

$B$  - matrica  $(n+1)/(n+1)$  čiji su članovi:

$$b_{ij} = (n + 1) + \sum_{j=i}^n a_{ji}^2 \quad (i = j)$$

$$b_{ij} = - (a_{ij} + a_{ji}) \quad (i \neq j)$$

$$b_{k,n+1} = b_{n+1,k} = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

$$b_{n+1,n+1} = 0$$

Ovako dobijene vrednosti težinskih koeficijenata daleko preciznije odražavaju strukturu preference donosioca odluke od "jednostavne" distribucije određene *količine* težinskih poena raspoloživim alternativama. Ovo stoga što preciznost, konsistentnost pa samim tim i pouzdanost vrednovanja opada srazmerno broju *objekata* koji se ocenjuju. Po raspoloživim socio-psihološkim iskustvima (18) najveći broj kriterija po kojima se vrednuje ne bi ni trebao biti veći od deset. U ovom radu je broj kriterija daleko veći ali su oni grupisani po 3 tako da, relativno slične prirode, ne predstavljaju psihološki problem kod rangiranja tim pre što broj alternativnih metoda ne prelazi broj 10. Ovaj pristup je prvi počeo da primenjuje *Nijkamp* (1977) s tim što je vrednovao *grupe* a u ovde prihvaćenom postupku je zastupljena i hijerarhija unutar svake usvojene grupe.

Opisani pristup utvrđivanja strukture preference donosioca odluke ne sme zanemariti činjenicu da je donošenje odluke o investiranju u osvajanje nove metode rada u oblasti (na primer) *cold weather concreting*-a postupak u kome učestvuje *tim* od  $N$  stručnjaka i lica čija stručnost nije primarna (sa stanovišta poznavanja tehnologije rada) ali je značajno visok nivo odgovornosti za posledice donete odluke (direktor firme može biti ekonomista ili pravnik). U tom slučaju treba članovima grupe (tima) dodeliti normalizovani *koeficijent* ( $\alpha$ ) *relativne važnosti stava ispitane osobe* kako bi rezultujući težinski koeficijenti bili formirani kao:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i \quad (8.45)$$

## 9. PARAMETRI PRIMARNE SELEKCIJE METODA BETONIRANJA

### 9.1. PROBLEMATIKA SELEKCIJE METODA

Izloženi problemi rada pri ekstremnim temperaturama vazduha onemogućavaju projektanta, koji se aktivno bavi tehnologijom i organizacijom izvođenja radova, da jednoznačno odgovori na pitanje *koju metodu primeniti u konkretnom slučaju*, utoliko pre što svaka metoda svoju tehnološku racionalnost i ekonomsku opravdanost iskazuje u zavisnosti od - *konkretnog slučaja*. Idejni projekat organizacije gradjenja radi se u vreme kada Izvođač, a samim tim i njegove tehnološke mogućnosti (osvojene metode, postojeća oprema, obučenosť kadra...), nisu poznati a očigleno je da bi male izmene utroška angažovanih materijala sigurno izmenile strukturu troškova i opravdanost izbora neke metode dovele u sumnju. Sve metode ne daju u istom trenutku vremena isti kvalitet betona a bitna odrednica izbora je upravo - kvalitet u funkciji utroška resursa. Projektant zato mora izvršiti precizan izbor između više mogućih metoda, utvrditi neophodne uslove za praktičnu primenu izabrane metode, projektovati pripremne radove odgovarajuće namene i specificirati troškove koje metoda unosi u investicioni projekat. Iako za veća domaća gradilišta najčešće vodi računa o tehnološkim kapacitetima potencijalnih izvođača, Projektant ipak mora doneti svoju primarnu odluku samo na bazi nekoliko osnovnih parametara, a to su:

1. - očekivana ambientalna temperatura u vreme izvođenja betonskih radova;
2. - tip konstrukcije (skeletna, masivna);
3. - vrsta betona (armiran, nearmiran).

Ove parametre za zimske uslove rada, tretirao je i *Gendin* (9) i za različite nosače (kriterijum je  $M_p$ ), različite kvalitete oplata (kriterijum je vrednost koeficijenta "k") i različite vrste upotrebljenih cemenata (obični Portland cement ili "blendiran" zgurom) dao dijagrame opšte ocene podobnosti navedenih metoda za



primenu u datim temperaturnim uslovima (od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Svakako, nezavisno od toga da li je u pitanju temelj, ploča ili zid, mora se imati na umu da li je nosač armiran ili nije, a ako jeste u kom stepenu ugrađena armatura prožima betonsku masu. Ovo stoga što se neke metode (indukciono zagrevanje, zagrevanje dubinskim elektrodama) zasnivaju na upotrebi armiranog gvožđa kao grejnog tela, a druge (primena protivmraznih dodataka) pokazuju, pri nedovoljno pažljivom radu, nedostatke u vidu izražene tendencije korodiranja šipki bliskih površini nosača. Efikasnost ovde razmatranih metoda nije ista na različitim temperaturama. Neke pritom pokazuju izuzetnu osetljivost na iznenadni pad temperature u toku očvršćavanja (primena aditiva, termos metoda); druge zahvaljujući mogućoj akumulaciji značajne količine "unete" toplote (zagrevanje komponenti mešavine, prethodno zagrevanje sveže mase) i inertnosti betona dozvoljavaju profilaktičku intervenciju iste vrste; treće (elektro-grejanje ugrađenog betona) samo u ograničenom intervalu vremena dopuštaju intenziviranje režima nege, dok četvrte (infra-crveno i indukciono zagrevanje) ne pokazuju osetljivost na varijaciju ambientalnih uslova. Uprkos iscrpne analize obimne građe autor nije našao osnova da kao relevantne kriterijume uvede, inače uobicajene tehnološke odrednice materijala - marku betona i njegovu konsistenciju u trenutku ugrađivanja. Savremena sredstva za unutrašnji transport i ugrađivanje betona ne prave razliku među markama betona, a kako ugrađene doze cementa (po  $1\text{ m}^3$ ) imaju manji uticaj od vrste i klase upotrebljenog cementa, to se navedeni izbor kriterija pokazuje kao valjan. Da li će beton do mesta ugrađnje biti dopremljen pumpanjem ili ne, takođe je bez uticaja. I na kraju, mada se *"analizom dobijenih rezultata može zaključiti da w/c faktor ima najznačajniji uticaj pri utvrđivanju uticaja mraza na čvrstocu..."* (35) sve metode zimskog betoniranja, bez razlike, efikasno deluju redukcijom vode na ovaj uticaj pa time i fluidnost mešavine čine nevažnom za proces selekcije metoda.

## 9.2. RASPOLOŽIVA OPREMA, SREDSTVA I ZNANJE

Betoniranje u posebnim uslovima je proces u kome se na poremećaje iz okruženja mora brzo reagovati upravljačkim akcijama u cilju vođenja procesa ka projektovanim rezultatima. Sa druge strane neke od upravljačkih akcija (sastav betona, režim nege sa aplikacijom dodatnih izvora toplote...) su istovremeno i faktori poremećaja pa je modeliranje ovakvog problema utoliko složenije. Optimizacija tehnologije rada samo u pravcu *poboljšavanja* tehno-ekonomskih parametara podrazumeva angažovanje prikupljenog znanja u cilju racionalnijeg korišćenja neophodnih sredstava.

Odavno se zna da betonski radovi, u okviru svih grubih građevinskih radova, zahtevaju najviše dopunskog angažovanja radne snage i utroška specijalnih materijala, a često su uslovljeni prisustvom specijalnih uređaja i opreme. Stepem značaja ovih radova u mnogome zavisi od obima radova, a kako liveni beton zauzima preko 80% mase betonskih hidrotehničkih konstrukcija jasno je kolika su, u takvim slučajevima, poskupljenja radova u ekstremnim klimatskim uslovima u odnosu na normalne troškove u standardnim uslovima.

Kod metoda rada sa visokom ambientalnom temperaturom problem sa opremom nastaje u fazi organizacije hlađenja komponenti betonske mešavine, obzirom da su mnogi uređaji za brzu i industrijsku proizvodnju leda često nedovoljno pouzdani. Kod "cold weather concreting-a" su problemi složeniji utoliko što su metode raznovrsnije, pa i primenjeni tehnološki postupci zahtevaju isključivo adekvatne uređaje i ne dozvoljavaju primenu alternativnih metoda rada u slučaju značajnije izmene uslova okruženja. Prividna fleksibilnost krije se samo iza činjenice da metode grejanja ugrađenog betona mogu da se primene za sve tipove konstrukcija i sve temperaturne uslove.

Primena aditiva, čija se optimalna doza utvrđuje prethodnim eksperimentalnim istraživanjem, mora se u praksi realizovati kroz automatsko doziranje rastvora dodatka obzirom da vrlo mala rastvorljivost većine dodataka koji se isporučuju u čvrstom stanju isključuje njihovo težinsko doziranje. Pouzdan rad vremenskog releja i pumpe za ubrizgavanje rastvora u mešalicu uslov je da beton dobije adekvatnu protivmraznu zaštitu, pa sam sistem treba opremiti zvučno-svetlosnim javljačima poremećaja, ili omogućiti automatsko zaustavljanje obrade mešavine.

Kod tehnologija zasnovanih na izradi "vruće" mešavine, ključni uređaj je postrojenje za proizvodnju i distribuciju vrele vode i/ili pare. Sa druge strane, kontaktno elektro-zagrevanje zasniva dejstvo na efikasnosti grejnih panela standardizovanih dimenzija, dok zagrevanje na bazi električnog otpora, u slučaju da se koristi ugrađena armatura nosača, ne zahteva posebnu opremu - osim adekvatnog transformatora. Sličnu opremu traži metoda indukcionog zagrevanja, ali je ona neracionalna osim za manje obime radova. Primena infra-grejača dozvoljava dosta pouzdan rad u širokom temperaturnom intervalu zimskih uslova, ali se lako zapaljiva mešavina propan-butana mora podvrgnuti strogoj kontroli, kontroli koja ima još naglašeniji značaj kod elektro-zagrevanja betona metodom "vrućeg termos" gde merno regulacioni uređaji moraju vršiti automatsko usklađivanje ulaznih veličina: jačine struje i dužine zagrevanja, sa izlaznim parametrima materijala, promenom otpora elektrolita i temperaturom mešavine. Ograničavajući faktor u gotovo svim slučajevima je nedostatak kadrova sa iskustvom adekvatnim za rad u izmenjenim klimatskim uslovima. Edukacija kroz rad, a bez eksperimentalne provere, može improvizacijom i grubim preslikavanjem tehnološkog postupka u mnogome kompromitovati njegovu racionalnost i efikasnost za dati temperaturni režim tako da istraživački projekti (32) postaju samo prvi korak ka ovladavanju specijalnim metodama.

### 9.3. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE LOKACIJE

Precizno utvrđivanje kvalitativnih i kvantitativnih parametara klime u regiji koja obuhvata zonu gradilišta od suštinske je važnosti za sudbinu ugrađenog betona. Iako se mikro-klimatske odlike lokacije menjaju u zavisnosti od udaljenosti od tla (videti poglavlje 1.1.), za planiranje i tehnološku primenu za rad u posebnim uslovima dovoljno su precizni podaci o prosečnim dnevnim vrednostima klimatskih karakteristika. Ako se, recimo, zna da u zoni Persijskog zaliva godišnje padavine prosečno dostižu 80 mm (92) ne sme se prevideti činjenica da iznenadne (doduše retke) letnje kiše, jačeg intenziteta, mogu oštetiti nezaštićenu površinu sveže betoniranih ploča. Pored toga, prosečna letnja vlažnost vazduha od r.v. = 50% ne govori dovoljno o opasnosti od uobičajenih padova relativne vlažnosti vazduha na samo 5%, da bi u zonama izloženim mešovitom dejstvu kopna i mora ona išla preko 90%. I, kao što kaže Shirley (80), "ne postoji jednostavan dijagram koji može adekvatno sumirati sve uticaje klimatskih uslova rada, pa svaka (njihova) komponenta zahteva zasebno razmatranje". Ovome treba dodati da takva, parcijalna razmatranja moraju voditi računa o kompleksnosti kako spoljnog, klimatskog dejstva, tako i unutrašnjeg "odgovora" materijala na te impulse. Gradilište mora biti osposobljeno da reaguje izmenom tehnologije u slučaju da se, zbog poremećaja u dinamici izvođenja radova, "blok" betonskih radova ima izvesti u izmenjenim okolnostima. Zato se optimiziranje sastava mešavine mora obavezno vršiti za različite temperature izrade, a oblik nege za kombinaciju očekivanih vrednosti trojke ambientalnih dejstava (temperature, relativne vlažnosti i brzine vetra). Određenu pomoć pritom može dati rezime istraživanja koje su Gaynor, Meninger i Khan prikazali na ASTM simpozijumu (ASTRM STP 858 (91)). Istražujući zahteve mešavine na povišenim temperaturama zaključili su da rast temperature ( $t_b$ ) od 18°C do 35°C zahteva prosečno manje od 5 kg dodatnog cementa, pri



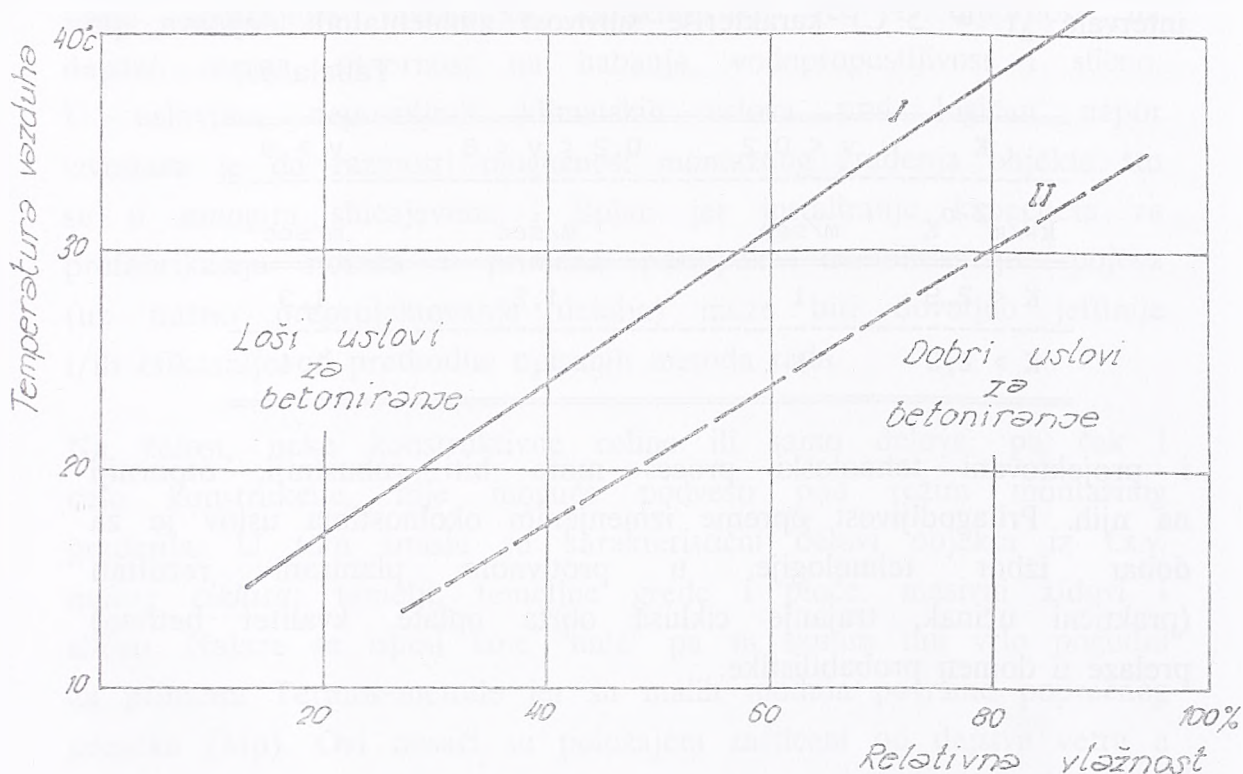
čemu se potrebna količina vode uvećava za 2-6%. Mnogo snažniji uticaj ima produženje transporta sa 20 na 90 minuta. Da bi se ostvario isti nivo čvrstoće na pritisak (pri adekvatnoj konsistenciji sveže mase) potrebno je oko 13,6 kg cementa i 3-13% više vode. Kombinovano dejstvo (beton na  $t_b = 35^{\circ}\text{C}$  se transportuje 1,5 sati posle spravljanja) može usloviti porast količine potrebne vode u mešavini i do 18% što uvodi problem segregacije zrna u "razvodnjenoj" smesi pa se, kao nešto adekvatnije rešenje, jednokratno retemperovanje mešavine (pre pražnjenja auto mešalice) nameće kao prioritetni zadatak. Gradilišne laboratorije moraju biti opremljene neophodnim mernim uredajima koji, na osnovu dobijenih vrednosti ( $t_a$ , r.v.,  $v_{\text{vetra}}$ ), a putem poznatih nomograma (videti Poglavlje 1.2.) mogu skratiti dug postupak utvrđivanja količine vode neophodne za pravilno retemperovanje.

*Shirley* naglašava (79) da pad vlažnosti r.v. = 90% na 50% (vrlo moguć pri pojavi vetra sa kopna), čak i da ostali parametri ostaju nepromenljivi, petostruko povećava stepen evaporacije nezaštićenog betona. O svemu tome Izvodač radova mora voditi računa pre nego što usvoji tehnološka rešenja. Primarnu selekciju je moguće vršiti i na osnovu kriterija postavljenog od strane *Malinowski*-og (7) koji:

- I. - za obični Portland cement ( $300 \text{ kg/m}^3$ ), mirno vreme bez vetra i početnu temperaturu  $t_{bp} = 20^{\circ}\text{C}$ ; i
- II. - za brzovezujući cement i beton pod opisanim uslovima,
  - za obični Portland cement većeg učešća u masi (400 kg),
  - za beton izložen dejstvu vetra brzine bar 10 m/sec;

daje dijagram na slici 9.1 u kome su granice dobrih i loših uslova za betonske radove (u smislu klimatskih parametara) date pravima I i II za odgovarajuće grupe tehnoloških uslova, gore navedenih pod istim oznakama. U zimskim uslovima vlažnost vazduha je bitna

prevashodno sa stanovišta fiziološkog utiska i uticaja na produktivnost rada, ali je i tu dominantno dejstvo temperature - u



Slika 9.1 - Dijagram ocene uslova za izvođenje radova (7)

kombinaciji sa brzinom vetra. Brzinu vetra je akceptirao još *Skramtaev* usvajajući je kroz bezdimenzioni koeficijent kojim se, za različite koeficijente oplata ( $k$ ) i uobičajene brzine vetra dobija mogućnost procene uticaja klimatskih promena (Tabela 9.1). Podaci pokazuju da se vreme hlađenja (zaštićenog) betona do ambijentalne temperature skraćuje za skoro 30% ukoliko naiđe mećava ili slična nepogoda. Projektant tehnologije vođen samo ovom činjenicom već u fazi primarne selekcije može termos-metodi dati negativne poene i u konačnom izboru favorizovati (recimo) postupke direktnog zagrevanja ugrađene mase.

Podatak o minimalnim dnevnim temperaturama sam po sebi ne govori mnogo ako se ima na umu stepen inertnosti betona na promenu ovog

uticaja, ali u kombinaciji sa podatkom o dužini perioda pojave ovakvih temperatura (obično se misli na temperature u okviru intervala  $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$ ) karakteriše surovost ambientalnih dejstava, pa

Tabela 9.1

K	$v < 0,2$	$0,2 < v < 6$	$v > 6$
$\text{kW/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}$	m/sec	m/sec	m/sec
$K < 2,9$	1	1,2	1,3
$K > 2,9$	1	1,3	1,4

i projektovani tehnološki proces mora biti robustniji, otporniji na njih. Prilagodljivost opreme izmenjenim okolnostima uslov je za dobar izbor tehnologije, u protivnom planirani rezultati (praktični učinak, trajanje ciklusa obrta oplata, kvalitet betona) prelaze u domen probabilitike.

#### 9.4. VRSTA KONSTRUKCIJE

Tehnoekonomski parametri su odlučujući kod donošenja konačnog izbora metode rada ali se njihov uticaj oseća još u fazi načelnih razmatranja podobnosti mogućih postupaka za rad u definisanim klimatskim uslovima. U tom smislu i *CIRIA Report 43* (7) specificira da ukupni troškovi nege betona zavise od tipa konstrukcije, njenih dimenzija (kako po gabaritima tako i po prosečnom modulu površine preseka) ali i od težine izvođenja objekta, lakoće pristupa elementima konstrukcije i stepena unificiranosti preseka nosača. Pored ovoga naglašena je važnost izloženosti betona, tokom eksploatacije, agresivnim dejstvima cikličnih promena temperature (pa shodno tome i uslovima zamrzavanja-odmrzavanja) ili korozije materijala nastale pod uticajem takozvanih "kiselih kiša".

Tehničkim uslovima za izvođenje radova, kao sastavnim delovima ugovorne dokumentacije, redovno se i precizno specificiraju ne samo uobičajene mehaničke karakteristike već i otpornost na dejstvo mraza, otpornost na habanje, vodopropustljivost i slično. U uslovima nepovoljnih klimatskih uslova prvi logičan napor izvođača je da razmotri mogućnost montažnog građenja objekta što se u mnogim slučajevima i isplati jer instaliranje kapaciteta za prefabrikaciju nosača i primena postupaka monolitizacije spojeva (uz nužno preprojektovanje detalja) može biti dovoljno jeftinije i/ili efikasnije od prethodno opisanih metoda rada.

Na žalost, neke konstruktivne celine ili samo delove, pa čak i cele konstrukcije, nije moguće podvesti pod režim montažnog građenja. U tom smislu su karakteristični delovi objekta iz t.z.v. *nultog ciklusa*; temelji, temeljne grede i ploče, masivni zidovi i slično. Nalaze se ispod kote "nula" pa su samim tim vrlo pogodni za primenu Termos-metode jer su malih modula površine poprečnog preseka ( $M_p$ ). Ovi nosači su položajem zaštićeni od dejstva vetra a tlo na kojem leže je dosta dobar izolator pa ih možemo prepustiti laganom sazrevanju pod zaštitom kvalitetne oplata i (u slučaju oštih pogoršanja ambientalnih uslova) zaštitnih objekata tipa šatora. Slične efekte daju metode sa primenom hemijskih dodataka ali se na vrlo niskim temperaturama (niže od  $-20^{\circ}\text{C}$ ) racionalni izbor svodi samo na primenu električne energije - prevashodno preko periferijskog zagrevanja oplatom. Ovo pokazuje da se delovi konstrukcije moraju nezavisno posmatrati i tražiti za svaki od njih najadekvatniji postupci nege. Pritom će moduo  $M_p$  biti faktor koji pomaže primarnu selekciju pa načelno važe sledeće podele:

- $M_p < 3$  - (masivni temelji)
- $3 < M_p < 6$  - (temelji opreme i objekata, masivni zidovi)
- $6 < M_p < 10$  - (stubovi, grede, zidovi, ploče)
- $10 < M_p < 20$  - (podovi, pregrade, tanke ploče, skeletne kon.)
- $20 < M_p < 100$  - (čvorovi i oslonci koji se zalivaju betonom)



Ono što se selekcijom metoda postiže je samo korak ka usvajanju metode kojom će biti tretiran najveći deo ugrađenog materijala, ali se kreativnost inženjera praktično iskazuje i u efikasnom transformisanju proizvodnog procesa - u toku odvijanja radova. Izabrana metoda, prevashodno instaliranom opremom i dostupnim materijalima, mora omogućiti uvođenje komplementarnih režima nege za iste ili srodne delove konstrukcije. Tako su, u principu, i nastale kombinacije poznatih metoda, tipa:

- A. - (fizičke metode ubrzanog očvršćavanja) + (kvalitetnije vrste cementa);
- B. - (niski vodocementni faktor) + (hemijski dodaci);
- C. - (kombinacija B) + (zagrevanje agregata i vode) + (Termos metoda);
- D. - (kombinacija B) + (zagrevanje svežeg betona pre ugrađivanja) + (Termos metoda),

a moguće su i sve ostale kombinacije. Prateći kriterijum za izbor metode rada je obezbeđenje optimalnog ritma rada betonskih i ostalih njima uslovljenih aktivnosti. Treba imati u vidu da se primarni izbor pogodnih metoda rada mora baviti i pitanjem stepena armiranosti preseka. Jedna od najopasnijih formi razaranja očvrstlog betona dolazi kao posledica korozije armature pa se tehnolozi orijentišu ka postupcima koji u najmanjoj meri utiču na rast produkata oksidacije metala. Uputno je zato izvršiti ozbiljnu analizu mogućnosti primene dveju različitih metoda rada. Jedne za nearmirane i slabo armirane delove konstrukcije (temelji, debele ploče, potporni zidovi...) i druge za "vitke" nosače. Pritom treba pažljivo razmotriti i ekonomičnost primene jedne (univerzalne) metode uz obezbeđenje dopunskih mera zaštite ugrađene armature. Ne sme se pritom gubiti iz vida da se štetno dejstvo korozije javlja prevashodno u situacijama kada nosač "radi" u eksploatacionim uslovima za koje nije projektovan (ciklično vlaženje, prisustvo štetnih gasova i sl.) pa je praktičnije u okviru projektovanja takvih konstrukcija treba preduzeti potrebne profilaktičke mere.

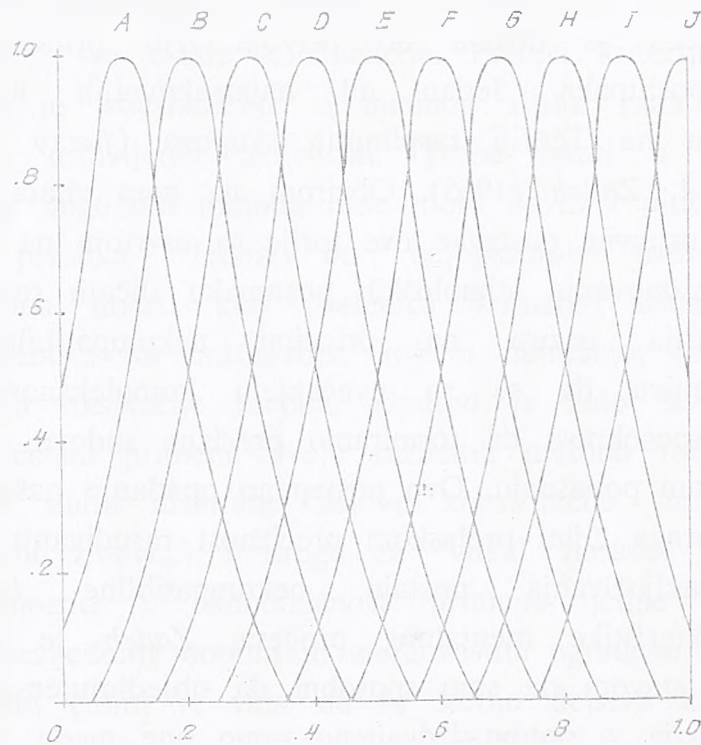
## 10. KRITERIJUMI ZA IZBOR OPTIMALNE METODE

### 10.1. KVANTITATIVNI I KVALITATIVNI KRITERIJI

Odlukom da se, u cilju vrednovanja različitih a podjednako mogućih alternativa, oslonimo na analitički postupak i dekompoziciju kompleksnog pojma vrednosti alternative na niz zajedničkih odlika sadržaja mi nedvosmisleno prihvatamo suočavanje sa novim problemom koji proističe iz nemožljivosti (na klasičan način) nekih aspekata primene metode. Naime, postoji čitav niz *kvalitativnih* odlika opisanih tehnoloških postupaka koje donosiocu odluke mogu, prema iskazanoj listi (rangu) preferenci, značiti neuporedivo više od drugih *kvantitativnih* efekata usvojene varijante.

Potreba da se na racionalan način razreši problem samerljivosti kvalitativnih ocena je dovela do razvoja i/ili primene brojnih matematičkih postupaka. Jedan od najatraktivnijih je svakako pristup zasnovan na Teoriji rasplinutih skupova (*fuzzy sets*) koju je etablirao *L.A. Zadeh* (1965). Obzirom na njen značaj ovde će biti date samo osnovne postavke ove teorije sa osvrtom na mogućnost primene kod vrednovanja tehnoloških postupaka sličnih razmatranom. *Zadeh*-ova teorija bazira na principu nekompatibilnosti koji konstatuje činjenicu da se sa uvećanjem kompleksnosti sistema smanjuje naša sposobnost da formiramo precizne sudove o njegovoj prirodi i njegovom ponašanju. Ovo postepeno opadanje naše moći ide do određenog praga čijim prelaskom preciznost rasuđivanja a time i relevantnost zaključivanja postaju nekompatibilne (medusobno isključive) karakteristike mentalnog procesa. *Zadeh* je obrazlagao svoje stanovište stavom da smo sposobni da objedinjujemo ogromnu količinu informacija, a potom izdvajamo samo one među njima koje su relevantne za određeni problem, zato što stvari (svet koji nas okružuje) poimamo tek aproksimativno. On smatra da je naša svest tako formirana da operiše u smislu formiranja "*klasa ili skupova*

objekata kod kojih prelazak iz stanja pripadnosti u stanje čiste ne-pripadnosti nije nagao već postepen" (...). Ako se zna da je konvencionalan način razmišljanja vezan za binarnu logiku (0,1) po kojoj pripadnost skupu vrednujemo jedinicom a nepripadnost nulom tada logiku rasplnutih skupova (*fuzzy logic*) možemo simbolizovati istim intervalom 0-1 u kome, kao vrednosna oznaka pripadnosti nekom skupu, može postojati osim njegovih graničnih vrednosti i beskonačno mnogo drugih među-stanja pripadnosti. Takva polazišta dozvoljavaju da se *fuzzy* logika može upoređivati sa "logikom verovatnoće" u kojoj se takode javlja skup sa beskonačno mnogo vrednosti a u okviru intervala (0,1) pa bi neka takva analogija dopustila da vrednosne oznake pripadnosti *fuzzy* skupu proglasimo "stepenom verovanja da je (neki) objekat član određenog skupa".



Slika 10.1 - Grafički prikaz *fuzzy* varijabli (A, B,...) koje "opisuju" različite intenzitete manifestovanja neke pojave

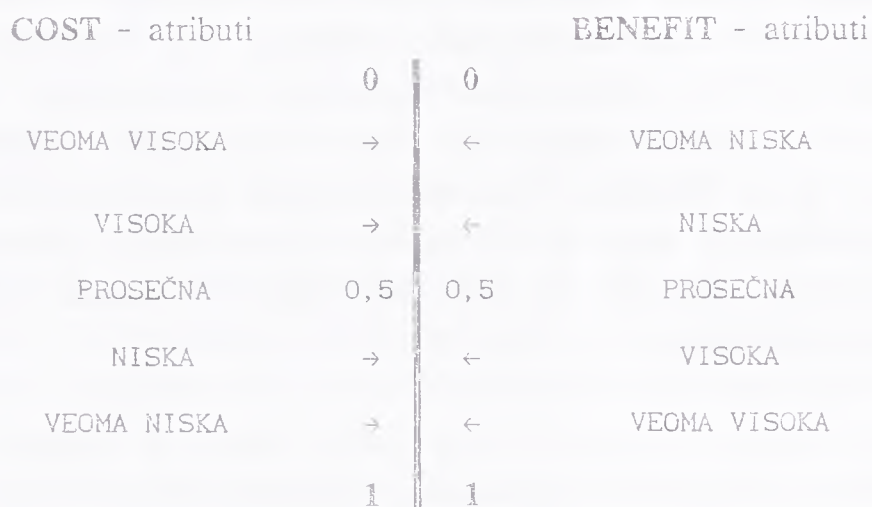
Ne ulazeći dalje u karakteristike logike rasplnutih skupova treba konstatovati da ovako definisane moguće promenljive (*fuzzy variables*) nekog višedimenzionalnog problema mogu, zbog svoje kontinualne prirode i "rasplnutih" područja prelaska iz jedne u drugu vrednost, učiniti matematički model nepraktičnim za efikasan rad. Zato će u ovde razmatranom problemu, kao pogodnija za neposredan rad a u suštini samo adekvatnija aproksimacija *fuzzy* logike, biti korišćena logika po kojoj se stepen pripadnosti određenom skupu karakteriše konačnim brojem diskretnih vrednosti iz intervala 0-1 i koja je u teoriji poznata kao *multi-valued logic*. Ilustracija problema u ovoj vrsti logike bi donela "grupu" vrednosti tipa (0; 0,5; 1).

Kvalitativni (*fuzzy*) atributi se (na način opisan u Poglavlju 8) mogu efikasno kvantifikovati primenom bipolarnih skala u kojima se obično javlja 10 vrednosti a "polove" predstavljaju najpovoljnija i najnepovoljnija manifestacija određenog atributa u prostoru koji definiše priroda tretiranog problema. Skala može imati i manji broj članova obzirom da u govornom jeziku obično nema deset termina kojima bi se mogla adekvatno izraziti gradacija vrednosti kvalitativnog atributa. Da bi se hijerarhija članova skale uredila na racionalniji način obično se uvodi pretpostavka o podjednakim "udaljenostima" članova, čime se skala formalno deli na intervale u okviru kojih se pod istim "opisom" podrazumeva skup različitih ali vrlo srodnih pojavnih oblika *fuzzy* atributa. Takve skale su poznate kao intervalne skale a o njima je prethodno već bilo reči.

Posebno važan problem kod primene ovakvih oblika je pravilna *kalibracija* skale ; utvrđivanjem tačnog položaja "sredine" skale definiše se položaj granice između poželjnih i nepoželjnih aspekata vrednovanog atributa. Kao ilustraciju treba navesti primer uporednih skala (slika 10.2) za *cost-benefit* analizu



(atribute) uzet iz referentne literature (30). Sa obeju strana ove skale dati su opisi vrednosti atributa koji su u datom slučaju vrlo različitih priroda ali se prosečan intenzitet manifestacije atributa u oba slučaja zamenjuje istom numeričkom vrednošću (0,5).



Slika 10.2 - Primer skale za *cost-benefit* analizu

U narednim delovima 10-og i 11-og poglavlja biće stavljen akcenat na analizu kriterija, pri čemu će se voditi računa ne samo koje su vrednosti atributa iz skupa navedenih *dopustive* kao relevantne za konkretan problem već i kako tehnologiju rada prilagoditi da bi vrednovana metoda, u pogledu konkretnog kriterija, realizovala svoju ekstremnu vrednost. Samo tako će rezultati ovog istraživanja imati svoju praktičnu, upotrebnu vrednost za širi krug korisnika.

## 10.2. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

Prva grupa kriterija unosi opšte društveni stav kao *makro* uticaj na vrednost posmatrane metode rada. Taj stav se artikuliše kroz sledeće kriterije grupe A:

- $A_1$  - Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta,
- $A_2$  - Afirmisanost metode u domaćoj praksi,
- $A_3$  - Stepenn materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode.

Očito je da su uticaji ove vrste okruženja na potencijalnog korisnika metode prevashodno kvalitativnog tipa pa je potrebno naći relevantne podloge za procenu takvog uticaja. Obrazloženje, koje se mora dati pre donošenja ocene, biće dato uz svaku metodu posebno a i iz naziva kriterija se (za mnoge među njima u velikoj meri) može sagledati aspekt vrednovanja.

### 10.2.1 TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI ASPEKTI RAZVOJA

Razvoj tehnologije betonskih radova je permanentan proces, ma koliko to iz ugla domaćih prilika izgledalo neverovatno. Kreativni pristup primeni nabavljene opreme u praksi donosi saznanja o čijoj zaštiti (prevashodno putem patenata) brinu odgovorne firme. Vrlo veliki broj oblasti u našem građevinarstvu ne zahteva ogromna finansijska sredstva za izradu prototipova nove ili modifikovane opreme (uredaja) i njihovo ispitivanje u odgovarajućim uslovima.

Samo je pasivan pristup ovoj oblasti mogao dovesti domaće izvođače radova u poziciju korisnika gotovo isključivo strane tehnologije. Obzirom da su betonski radovi u posebnim uslovima ipak specifična oblast primerenije su blaže ocene stanja, tim pre što su u osvajanju opreme i (nužnoj) primeni supstituta mnoge firme stekle mogućnost da se samostalno usavršavaju. Metode rada se razvijaju u pravcu racionalnije, efikasnije primene skupih oblika toplotne energije čime se i otvara mogućnost primene povoljnijih režima obrade obzirom da se deo ostvarene uštede može usmeriti na porast perioda *izotermije*.

Većina metoda podrazumeva raznovrsnu primenu aditiva kao korektora i regulatora ponašanja betona u toku proizvodnog procesa. Primena plastifikatora u dozama koje odgovaraju fazama rada oslobada od neugodnih sekundarnih efekata brzine rada. Posebno važna oblast je osavremenjavanje i prilagodavanje oplatnih sistema. Težnja da se na što efikasniji način egzotermalni procesi uključe u proces obrade betona dovodi do primene termo-izolovanih oplata i kod rada u uslovima blagih zima. Jasno je da metoda mora biti rangirana više ukoliko ne zahteva intervenciju na postojećoj oplati ali se mora imati na umu da metalna oplata (većina poznatih tipova oplata za industrijsku izgradnju bazira na metalnim komponentama) ima mane koje su posebno izražene na uglovima oplata i da, kod određenih modula površine, izrada nosača traži dopunsku zaštitu.

Razvojem metoda postaje manje osetljiva na promenu tehnološkog okruženja. Stepem armiranosti nosača uviče na neatraktivnost nekih metoda rada ali, sa druge strane, donosi slobodu *ubrzanijeg* hlađenja betona a time i skraćenje vremena obavezne zaštite. Sama univerzalnost metode ogleda se sve više u njenoj pogodnosti za primenu i u pogonskoj i u gradilišnoj proizvodnji. Mogućnost promena ritma rada i obima proizvodnje daje metodi neophodnu dozu elastičnosti potrebnu za efikasan odgovor zahtevima tržišta. Mnoge metode su ušle u svakodnevnu praksu (naravno u klimatskim uslovima koji se u ovom podneblju podrazumevaju) pa se prilikom rangiranja metoda o težini tog i takvog načina primene mora voditi računa.

Velika prepreka osvajanju novih metoda je potreba za velikim učešćem vlastitih sredstava pri nabavljanju opreme i kupovini licence. Izvođači radova su obično firme sa niskom akumulativnom moći što stvara dodatni rizik banaka kod kreditiranja kupovine nove tehnologije. Relativni odnos preuzetih finansijskih obaveza oko osvajanja metode i ukupne finansijske moći firme može biti

zahvalan podatak za uporednu analizu alternativnih rešenja. Kako je utvrđivanje precizne vrednosti takvog odnosa irelevantno (obzirom na neophodni i usvojeni nivo tačnosti podataka korišćen u ovom radu) to će rangiranje nekih mogućih a ovde samo detaljnije analiziranih grupa odnosno varijanti rešenja (zasnovana na analizi svih raspoloživih podataka) biti izvršeno na osnovu *inženjerske procene* vrednosti.

### 10.2.2 AFIRMISANOST METODE U DOMAĆOJ PRAKSI

Sam pojam afirmisanosti ovde podrazumeva i relativno veliki broj inženjera, stručnjaka za oblast tehnologije građenja u posebnim uslovima, i određen broj *izvodačkih* referenci u toj oblasti. Već je rečeno da se, zbog dosta blagog klimatskog područja Jugoslavije metode rada nisu razvile u svojoj raznovrsnosti, ali se postojanje timova stručnjaka u nekim institutima i biroima službi za plan i pripremu proizvodnje - ne mogu zanemariti. Jedan od puteva analize stanja koristi primenu *ankete* eksperata. Takav pristup zahteva obimne pripreme i, zbog potreba kvalitetne statističke analize, broj anketiranih stručnjaka ne sme biti manji od 30. Kao što pokazuju istraživanja *Golovnev-a* anketa može dati relevantne zaključke jedino ukoliko je kompetentnost anketiranih nesumnjiva. Nažalost, i taj deo istraživanja se mora osloniti na "objektivnu" (u velikoj meri samokritičku) ocenu samih ispitanika. Odgovori na pitanja koja rasvetljavaju:

- nivo bliskosti sa problematikom,
- teoretsku podlogu stečenog znanja,
- praktična iskustva,
- poznavanje radova domaćih autora,
- poznavanje radova stranih autora, i
- nivo inženjerske intuicije

mogu (ukoliko su ocene kvantifikovane) dati procenu kompetencije



anketiranih stručnjaka. *Golovnev* je, na uzorku od 66 eksperata ispitivao i uticaj pojedinih (od 10 različitih) kriterija ocene i došao do rezultata koji pokazuju da su:

- koštanje proizvodnog procesa,
- ukupno angažovanje radne snage,
- trajanje proizvodnog procesa, i (donekle)
- brzina očvršćavanja

kriteriji sa najvećim uticajem na konačnu ocenu (rang) posmatranih metoda rada. On je zatražio i ocenu *tehnoločnosti* metoda (pri čemu sam taj pojam nije precizno formulisao već je prepustio to "osećaju" samih ispitanika i dobio vrlo konsistentne odgovore koji ne ostavljaju mesta sumnji u valjanost pristupa) pa je došao do liste metoda sastavljene po nivou njihove tehnoločnosti:

- elektro-zagrevanje betona pre ugrađivanja,
- izrada betona sa protivmraznim dodacima,
- održavanje betona "termos" postupkom,
- elektro-zagrevanje ugrađenog betona,
- zagrevanje betona infra-crvenim zracima,
- zagrevanje betona indukcionim postupkom

pri čemu se može smatrati da je rang metoda u okviru datih parova približno isti. Ovakav pristup je samo jedan od mogućih, ali ima razradenu metodologiju i verifikovan je u praksi, pa su njegovi rezultati nezaobilazan reper. Ono što mu, bar sa stanovišta prave primene u našim uslovima, umanjuje upotrebnu vrednost je nedostatak dovoljnog broja eksperata koji bi ispunili pomenuti uslov ( $n > 30$ ) i činjenica da se na afirmaciju mnogih metoda - još mora čekati. U takvim uslovima preostaje subjektivna procena istraživača kojom se omogućava praktično testiranje postavljenog modela i ispitivanje osetljivosti na broj i vrstu kriterija.

### 10.3. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

Ova grupa kriterija podrazumeva sledeće parametre za vrednovanje:

- $B_1$  - Primenljivost za različite tipove nosača,
- $B_2$  - Primenljivost u različitim temperaturnim režimima, i
- $B_3$  - Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

Kako je za samu ocenu određene metode neophodan precizniji prikaz okruženja u kome se parametar manifestuje biće izloženi bitni stavovi o prirodi ovog aspekta vrednovanja.

#### 10.3.1. UTICAJ UNIVERZALNOSTI METODE

U prethodnim poglavljima (5, 6) je bio dat pregled osnovnih odlika metoda rada u posebnim uslovima i u okviru svake od njih dat odnos instalirane opreme prema promeni zadatka. Naime, tehnološka oprema pokazuje određenu osetljivost na promenu objekta obrade; posle zagrevanja pločastih nosača menja se režim radi zagrevanja grupe linijskih nosača itd. Izuzetno važan je *period prilagodavanja* novim uslovima rada i to ne samo sa stanovišta podešavanja opreme i kontrolno-mernih instrumenata, već i sa stanovišta radne snage. Radne brigade su organizaciono-operativne celine koje takode imaju period prilagodavanja uslovljen potrebom za aktiviranjem onog segmenta znanja i iskustva koji obezbeđuje efikasnu primenu tehnološke opreme. Kako je proces rada (iako sa relativno dugim ciklusima) po karakteru ipak ritmičan to česte promene segmenta kolektivnog znanja operativne grupe mogu dovesti do mešanja delova uobičajenih procedura pri obradi betona. Takva iskustva i realna opasnost od ponavljanja incidentnih situacija na gradilištu inhibiraju angažovane radnike i dovode ih u situaciju da, u cilju lakše izmene režima rada, redukuju obim i kvalitet operativnog znanja. Usled toga izvršioци na pojedinim radnim mestima ponekad

zanemaruju (*njima* nebitne) delove svog radnog zadatka i time osiromašuju spektar oblika neophodne kontrole. Ako se ima u vidu da sve opisane metode imaju skraćen režim obrade materijala u kome uglavnom nema mogućnosti za kvalitetnu ispravku greške postaje jasno zašto insistiranje na univerzalnosti zahteva adekvatan odraz i u listi kriterija za ocenu određene metode rada. Diferenciranjem univerzalnih od specijalizovanih postupaka obrade betona stvara se i mogućnost favorizovanja (ponderisanjem) metoda koje širokim opsegom svoje primene garantuju neophodnu fleksibilnost i prilagodljivost zahtevima tržišta.

Postupak određivanja pondera može bazirati i na zastupljenosti pojedinih tipova nosača u okviru objekata visokogradnje ili na konkretnom projektu za koji se vrenovanje metoda i vrši. Tako bi procentualno učešće *tipa nosača* (na primer temelja samaca) moglo biti osnova za utvrđivanje jednog od težinskih koeficijenata ( $p_1$ ) a procentualno učešće vrste objekta (podskup "zgrade" u odnosu na skup "objekti visokogradnje") daje mogućnost za uvođenje drugog težinskog koeficijenta ( $p_2$ ). Ovakvim pristupom bi lako dobijeni proizvod koeficijenata ( $p_1 p_2$ ) izrazio učešće jedne vrste nosača u ukupnom obimu betonskih konstrukcija. Kako su neke metode rada posebno podesne za proizvodnju određenih tipova nosača može se uvesti koeficijent ( $p_3$ ) koji bi odrazio *broj tipova* nosača na koje se metoda odnosi; univerzalne metode bi, po toj logici, odlikovala vrednost  $p_3 = \sum_i p_{3i} = 1,00$ . Neophodno je na ovom nivou razrade problema zadržati ravnopravnost svih znanih tipova nosača, odnosno - usvojiti da svaki od njih (usvojimo samo 5 grupa nosača):

- 1 - temelji (samci grede, ploče),
- 2 - stubovi (puni, sandučastog ili razudenog preseka).
- 3 - gredni nosači,
- 4 - zidni nosači (potporni, pregradni zidovi), ili
- 5 - ploče međuspratne konstrukcije,

podjednako *vredi* sa stanovišta izvođača. Parcijalni koeficijent uz svaki tip je  $p_{3i} = 0,20$  ( $i = 1,2,\dots,5$ ) tako da dobijeni *kompleksni ponder* ( $p_1 p_2 p_3$ ) vrednuje sposobnost metode da odgovori zahtevima prakse. Preciznost takvog težinskog koeficijenta se donekle podiže usvajanjem podele po efikasnosti primene, tipa:

- a - primena efikasna ( $l_1 = 1,00$ ),
  - b - primena samo izuzetno ( $l_2 = 0,50$ ), i
  - c - primena nemoguća ( $l_3 = 0,00$ )
- (10.1)

Pridružene vrednosti koeficijenta  $l_j$  ( $j = 1,2,3$ ) samo su jedna od mogućih kombinacija (polemika se, u principu, ovde može voditi oko veličine koeficijenta  $l_2$ ) ali se konačna vrednost koeficijenta  $p_3$  definiše sumiranjem proizvoda:

$$p_3 = \sum_i l_j p_{3i} \quad (i = 1,2,\dots,5) \quad (10.2)$$

a kompleksnost pondera uz ovaj kriterij predstavlja izrazom:

$$p_{b1} = p_1 p_2 p_3 = p_1 p_2 \sum_i l_j p_{3i} \quad (10.3)$$

U literaturi se mogu pronaći podaci o efikasnosti primene metoda rada u zimskim uslovima. Najčešće se efikasnost dovodi u vezu sa ambijentalnim temperaturnim režimom očvršćavanja a moduo površine preseka ( $M_p$ ) je karakteristika kojom se, pri analizi efikasnosti, zamenjuju svi ostali podaci o nosaču. Ovaj aspekt primenljivosti ne treba stoga mešati sa prethodno opisanim (mada postoji  $M_p$  kao reprezent "vrste" nosača) jer je u prethodnom za pristup važna tehnološka oprema. Za precizno vrednovanje je bitna adekvatna podela na temperaturne opsege u kojima se efekti primene metode mogu pouzdano razlikovati. Stečena saznanja o ovom problemu pokazuju da nema takvih oštih razlika pa je uobičajena podela na intervale od po  $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ . Na početku ovog rada je dato (interno) ograničenje istraživanja problema u kome je donja granica bila temperatura od  $-40^{\circ}\text{C}$ , ali je kraj realne mogućnosti organizovanja



i realizacije posla najčešće u vezi sa graničnom vrednošću  $t_a$  od  $-30^{\circ}\text{C}$  tako da za negativne temperature postoji 5 intervala (zona) za ocenu primenljivosti. Fiksne vrednosti pondera svake zone moraju iskazati *porast važnosti* efikasnosti primene u oštrijim klimatskim uslovima. Vrlo pogodan oblik prikaza promene daje eksponencijalna kriva (pogodna je  $y = e^x - 1$  jer za  $x = \ln 2$  daje jedinični interval  $y$  - promenljive) pa su vrednosti pondera  $m_i$ :

za zonu do $-10^{\circ}\text{C}$	$m_1 = \ln 0,20 \times = 0,15$
za zonu do $-15^{\circ}\text{C}$	$m_2 = \ln 0,40 \times = 0,32$
za zonu do $-20^{\circ}\text{C}$	$m_3 = \ln 0,60 \times = 0,52$
za zonu do $-25^{\circ}\text{C}$	$m_4 = \ln 0,80 \times = 0,74$
za zonu do $-30^{\circ}\text{C}$	$m = \ln 1,00 \times = 1,00$

Ovako usvojene granice zona zahtevaju neku formu prelaska iz jedne zone u drugu a to je moguće samo ako se uvede niži nivo podele kojim se efikasnost primene deli na grupe slučajeva u kojima je:

- a - primena efikasna ( $l_1 = 1,00$ ),
- b - primena samo izuzetno ( $l_2 = 0,50$ ), i
- c - primena nemoguća ( $l_3 = 0,00$ )

Kao u slučaju prethodnog kriterija vrednost pondera se dobija kao suma proizvoda posmatranih po relevantnim temperaturnim zonama:

$$P_{b2} = \sum_j l_i m_j \quad (10.5)$$

$$(i = 1,2,3 ; j = 1,2,3,4)$$

Na taj način bi (recimo) metoda koja se na temperaturama nižim od  $-20^{\circ}\text{C}$  samo izuzetno primenjuje (a u blažim uslovima je efikasna) imala vrednost ocene uz analizirani kriterij:

$$P_{b2} = 1,00 (0,15) + 1,00 (0,32) + 0,50 (0,52) = 0,73$$

Ovaj pristup je i primenjen u okviru kasnije analize metoda ali je tačnost ocene (zbog nedostatka pouzdanih analiza učešća pojedinih tipova nosača) u poglavlju 11 zamenjena - "inženjerskom procenom".

### 10.3.2. UTICAJ OBIM RADOVA I BRZINE UGRADIVANJA

Prilikom utvrđivanja neophodnog vremena za izvršenje planiranih aktivnosti projektant vrši proračun njihovog trajanja korišćenjem građevinskih normi. U slučaju radova zimskog betoniranja kao dopunski element ocene podobnosti metode mogli bi se, u objedinjenoj formi, uzeti obim radova i brzina ugrađivanja (očekivani praktični učinak tehnološkog sistema). Sa tim u vezi je i dopuštena (planirana) dužina negovanja betona koja je uslovljena potrebom za određenim brojem ciklusa obrta oplate. Primena indukcionog postupka implicitno važi za radove sa manjim  $U_p$ , jer je on u direktnoj vezi sa velikim  $M_p$  skeletnih konstrukcija, dok mašine za proizvodnju betona sa protivmraznim dodacima dopuštaju učinke limitirane samo kapacitetom postrojenja.

Značajne razlike organizaciono-tehnoloških mera nastaju već sa promenom koncepta "*cold weather concreting-a*". Transport i ugrađivanje betonske mase kojoj je prinudno podignuta temperatura (bilo zagrevanjem komponenti, bilo ubrizgavanjem pare u mešalicu, bilo elektro-predgrejanjem u specijalnim kadama) moraju se završiti u najkraćem roku kako zbog minimiziranja gubitka toplote tako i zbog očuvanja neophodne obradljivosti mase koja se kod zagrejanih mešavina vrlo brzo gubi. Profilaktičke mere (dodavanje super-plastifikatorra ili dopunske količine vode), radi održanja željene mere sleganja konusa, iziskuju intervenciju na uređajima za doziranje u fabrici betona kao i mere neophodne provere kvaliteta za projektovane vrste dodataka.

Kod "hladniñ betona" spravljenih sa protivmraznim dodacima, pomenute opasnosti od pada "*slump-a*" imaju protivtežu u štetnom da hladna mešavina u trenutku pada temperature sa  $t_{bp}$  na nivo  $t_a$ , ima već realizovan određeni stepen čvrstoće na pritisak.

Posebno važan uticaj, kada je u pitanju brzina ugrađivanja, ima temperatura betona u trenutku ugrađivanja. Njihov uticaj se odražava na veličinu maksimalnog pritiska sveže, ugrađene betonske mase na konstrukciju oplata. Ovaj pritisak, između ostalog, zavisi od brojnih faktora među kojima se po važnosti ističu:

1. visina oplata (ne treba je poistovećivati sa visinom ugrađenog sloja betona obzirom da se u praksi masovno koriste standardizovani komadi oplata prilagođeni spratnoj visini približno istim dimenzijama);

2. prosečna brzina ugrađivanja betona (misli se na brzinu kojom sveža masa popunjava oplatu, meri se po visini oplata i izražava u metrima na sat, a dobija se kao odnos prosečnog praktičnog učinka i površine horizontalnaog preseka nosača);

3. temperatura betona u trenutku ugrađivanja (autor je koristio rezultate koje je *Concrete Society* - London objavila u svojoj publikaciji "*Formwork - a guide to good practice*", 1986. god., a odnose se na temperature u okviru intervala ( $t_a = 5-30^{\circ}\text{C}$ );

4. razmere ugrađenog betona (problemi prenošenja toplote u okviru heterogene mase betonskog bloka neposredno zavise od oblika i dimenzija samog bloka pa će u njihovoj analizi biti adekvatno reprezentovani modulom površine poprečnog preseka);

5. kompozicija betonske mešavine (naglašen uticaj ima kao vrsta cementa tako i vrsta i količina aditiva, posebno kada su u pitanju usporivači vezivanja);

6. gustina betona (obzirom na namenu betona koji se u okviru ovog rada analizira, kao prosečnu gustinu treba podrazumevati vrednost od  $25 \text{ kN/m}^3$ ).

Imajući na umu raznolikost metoda uočljivo je pomeranje težišta vrednosti pojedinih faktoria i to u zavisnosti od izbora metode, što važi kako za rad u zimskim, tako i za rad u žarkim uslovima.

Uticaj temperature betona i sastava betonske mešavine vidi se već iz sledećih uporednih rezultata, za visinu nosača (oplate) od 3 m:

a. - zagrevanjem betona (od OPC i bez aditiva) sa  $t_{bp} = 15^{\circ}\text{C}$  pri istoj brzini narastanja sloja ugrađenog betona ( $2,4 \text{ m}^2/\text{h}$ ) pritisak na oplatu betonskog zida opada sa  $65 \text{ kN/m}$  na oko  $50,6 \text{ kN/m}^2$  što, naravno, dozvoljava (za istu konstrukciju oplate) povećanje brzine ugrađivanja na  $5,1 \text{ m/h}$ , ili za 110%. Jasno je da izvođač, koji raspolaže oplatom standardne konstrukcije, mora precizno analizirati opravdanost skraćenja roka izvođenja betonskih radova (na račun povećanja praktičnog učinka, tj. brzine ugrađivanja betona), jer mu to dozvoljava samo beton više početne temperature - a za njegovu proizvodnju su nužna dodatna sredstva, oplate i znanje;

b. - ukoliko se uz čisti Portland cement za spravljanje betona koriste i retarderi, tada se brzina ugrađivanja sveže betonske mase ( $0,3 \text{ m/h}$  pri  $t_{bp} = 5^{\circ}\text{C}$ ) u oplatu dimenzionisanu na pritisak od  $65 \text{ kN/m}^2$  može zagrevanjem do  $t_{bp} = 15^{\circ}\text{C}$  povećati na  $4,0 \text{ m/h}$  ili za više od 13 puta. Pored toga, očito je da je pri višim radnim temperaturama betona (a to može važiti kako za zimske metode rada, tako i letnje uslove sa visokim ambientalnim temperaturama i adekvatnom količinom toplote koju ingredientni unose u proces izrade betona) uticaj dodatnih usporivača vezivanja manji nego kod hladnih smesa. U jednom konkretnom slučaju (zid  $H = 3 \text{ m}$ ) se pri  $t_{bp} = 5^{\circ}\text{C}$  dodatim retarderom usporava rad za 8 puta, dok njegovo prisustvo u toplijem betonu ( $t_{bp} = 15^{\circ}\text{C}$ ) smanjuje dopušteni praktični učinak za oko 21,6% (27). U pozitivne efekte spada i činjenica da povećanje temperature ugrađivanja betona (u nosač debljine 30 cm, sa karakteristikom oplate  $6,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ) za samo  $\Delta t_{bp} = 5^{\circ}\text{C}$  redukuje vreme skidanja oplate za oko 8 sati.

Jedna od bitnih karakteristika proizvodnog procesa je brzina kojom se betonskoj masi temperatura podiže do projektovanog nivoa. Ova



odlika zavisi u velikoj meri od tehničkih mogućnosti instalirane opreme pa se nameće potreba preciznijeg definisanja oblika u kome bi ta veza našla svoje mesto u okviru trećeg iz pomenute grupe kriterija.

Već samom činjenicom da se pridaje važnost brzini zagrevanja na određeni način se *favorizuju* metode sa dopunskim (veštačkim) uvećanjem količine toplote pod kojom beton sazreva, ali atraktivnost tih metoda i jeste u aktivnom pristupu problemu očvršćavanja, u njegovom kontrolisanju i skraćivanju vremena obrade. Na žalost, svaka oprema ima svoj nominalni učinak pa se problem (u vezi sa primenom opreme) javlja u situacijama kada se nepravilna procena potreba sukobi sa neadekvatnim mogućnostima instalirane opreme. Preopterećivanje uređaja najčešće daje ubranu pojavu otkaza i pad opšte pouzdanosti sistema. Srećom, većina složenijih sistema ima ugrađene redundantne elemente koji dopuštaju premošćenje incidentnih situacija.

#### 10.4. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Mehaničke karakteristike su, za svakog izvođača radova, sigurno najeksplicitniji pokazatelj "potpuno" dovoljan za brzu ocenu efikasnosti primenjene tehnologije. Ukoliko o određenoj metodi zna precizne podatke o tome koliki su:

- $C_1$  - Brzina dostizanja kritične čvrstoće  $\beta_{krit}$
- $C_2$  - Brzina dostizanja računске čvrstoće  $\beta_{k28}$  i
- $C_3$  - Pad čvrstoće kao posledica ubranog očvršćavanja

sposoban tehnički rukovodioc sa lakoćom vrši selekciju one koja ima najmanje vrednosti ovih parametara. Obzirom da je za ocenu korisnosti neophodno celovitije poznavanje okolnosti u kojima se određena vrednost parametra artikulise biće date neke neophodne napomene i objašnjenja.

#### 10.4.1. NEGOVANJE DO USVOJENOG STEPENA ČVRSTOĆE

Ova problematika je detaljnije tretirana u Poglavlju 5, pa ovde treba naglasiti važnost onih *tehnoloških* parametara koji mogu, bez detaljne analize promena mehaničkih karakteristika, da omoguće "grubu" podelu i vrednovanje postupaka za rad u posebnim ambientalnim uslovima. Mora se, međutim, voditi računa o često presudnom uticaju nekih "sekundarnih" klimatskih karakteristika okruženja. Tako skupljanje sveže betonske mase, u toku očvršćavanja pod dejstvom sunčevog zračenja, može biti praćeno formiranjem prslina (dužine do 100 mm) u zoni zaštitnog sloja a slične posledice prate betonske ploče i gredne nosače izradene u ranim jutarnjim satima. Kvalitet nege, u ovom slučaju, mora obuhvatiti i aspekt vremena izvođenja (jutro, podne, noć) nosača jer i to utiče na razvoj mehaničkih karakteristika. Kontinuitet procesa nege betona je drugi aspekt zaštite betona u vreme intenzivnog razvoja hidratacije vezivnog materijala. Ovaj aspekt je, između ostalih, već proučavan (73) i došlo se do zaključka da izostanak nege prvog dana uzrokuje najveću štetu. Ukoliko se, pri visokim temperaturama, sledećih 3-7 dana ostvari normalno, kontinualno negovanje evidentan pad čvrstoće betona (uzrokovan pojavom mikro-prslina kao posledicom napona zatezanja na površini nosača) može biti donekle, naravno ne u potpunosti, saniran a posledice umanjene. Zato je *pouzdanost* angažovane tehnološke opreme, tokom čitavog perioda građenja, od izuzetne važnosti za realizaciju projektovanih vrednosti čvrstoće betona, ali i ljudski faktor može podbaciti jer se nanošenje "*curing compound-a*" može na kvalitetan način izvesti tek po završetku "znojenja" (*bleeding*) ugrađenog materijala, pa se ta faza posla ne sme ostaviti - za naredni dan. *J.C. Birt* navodi (7) da gotovo četvrtina publikovanih radova posvećenih zaštiti betona kao *minimalan period* nege preporučuje period od 7 dana iako je očigledno da ovakva,

generalna preporuka nema adekvatnu tehnološku opravdanost.

Faza primarne selekcije metoda zahteva poznavanje stepena uticaja pojedinih postupaka na skraćenje perioda dostizanja neophodne čvrstoće na pritisak ili zatezanje a dan definitivnog ostvarenja čvrstoće  $R_{28}$  je bitan sa stanovišta sposobnosti konstrukcijskog elementa da u potpunosti primi eksploataciona opterećenja na koja je i projektovan. Zato je brzina dostizanja računске čvrstoće jedan od ključnih tehnoloških parametara za ocenu metode rada pa je i svrstan u ovu grupu kriterija.

Eksperimentalnim istraživanjima je dokazano (27) da rano skidanje oplata, a samim tim i izlaganje nosača uobičajenim radnim opterećenjima (opterećenja u toku građenja se bitno razlikuju od eksploatacionog opterećenja, odnosno od opterećenja za koje je utvrđen moment loma) neće imati značajnijeg uticaja na realizaciju krajnje čvrstoće, adekvatne momentu loma, samo ako radna opterećenja ne prouzrokuju uticaj veći od 87% momenta loma. Tom kriterijumu moraju biti podvrgnute sve ocene povoljnosti određene metode za rad uz brzi obrt oplata. Ocene moraju obuhvatiti i pouzdanost metode kao tehnološkog postupka kojim se realizuje zahtevana čvrstoća ne samo u zoni kontakta oplata i betona (a ta zona je izložena i udarnim opterećenjima u fazi demontiranja oplatnih ploča) već ravnomerno u čitavoj masi.

Tabela 10.1

nosači	zahtevana čvrstoća betona kao odnos radnog i projektovanog opterećenja		
	50%	75%	100%
prethodno-napregnuti	80% MB	80% MB	100% MB
grede i ploče ( $l < 4,5$ m)	60% MB	70% MB	100% MB
stubovi i ploče ( $l > 4,5$ m)	50% MB	60% MB	90% MB
zidovi	40% MB	50% MB	80% MB

*Harrison*-ove stavove na manje precizan, ali takode praktičan način, podržavaju i preporuke RILEM-a (82) koje daju zahtevanu čvrstoću betona kao funkciju vrste nosača sa koga se skida oplata i radnog opterećenja kome se nosač izlaže (vidi Tabelu 10.1).

U usloviima "hot weather concreting-a", preporuka je Mironov-a (110), treba sve nosače negovati do dostizanja 70% MB, a za kontinentalne klimatske odlike preciznije odredbe daje *Harrison* (26) koji za nosač min  $d = 30$  cm, izrađen od betona sa običnim Portland cementom i potrebnih 5 N/mm čvrstoće u vreme skidanja oplata daje mogućnost za analizu uticaja kvaliteta oplata (vidi tabelu 10.2).

Još jednom je potvrđena činjenica da na "normalnim" temperaturama vazduha ( $10-15^{\circ}\text{C}$ ) nema osetnije razlike u brzini očvršćavanja, dok se na temperaturama koje variraju oko  $0^{\circ}\text{C}$  oseća naglasen uticaj termičkih svojstava oplata na mogućnost skraćanja tehnološkog ciklusa. Robustne, industrijske oplata metalnih stranica (pojačane termoizolatorom visokog kvaliteta) mogu gotovo udvostručiti broj radnih ciklusa u odnosu na oplata sa "blažujkom" kao osnovom.

Tabela 10.2

odlike oplate	marka betona	srednja temperatura vazduha ( $^{\circ}\text{C}$ )				
		- 5	0	5	10	15
5,2 $\text{W/m}^2\text{C}$	MB 30	-	6,0	3,5	2,5	1,5
	MB 40	-	5,0	3,0	2,0	1,5
1,3 $\text{W/m}^2\text{C}$	MB 30	4,0	3,0	2,5	1,5	1,0
	MB 40	3,0	2,0	2,0	1,5	1,0

$K = 5,2$  - za vodonepropusne ploče iverice  $d = 18$  mm,

$K = 1,3$  - za čelični lim izolovan sa  $\delta = 25$  mm stiropora.



### 10.4.2. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE BETONA NA PRITISAK U PROIZVOLJNOM TRENUTKU VREMENA

Čvrstoća na pritisak je u praksi ključni parametar za određivanje vremena rašalovanja obzirom da je kritična čvrstoća betona nakupljena u materijalu do tog trenutka dovoljan razlog da se veštačkim putem (podupiračima i oplatom) garantovana stabilnost može zameniti vlastitom krutošću nosača. Postoji više mogućih načina određivanja čvrstoće u određenom trenutku (pa shodno tome i mogućnosti da se za željenu čvrstoću utvrdi momenat njenog pojavljivanja) i svi putevi polaze od određenih krivih koje na manje ili više precizan način aproksimiraju ponašanje materijala u praksi. Treba imati u vidu da se do podataka o stanju betona ugrađenog u elemenat konstrukcije dolazi metodama sa ili bez razaranja tako da podaci o "površinskoj" čvrstoći (dobijenim npr. Šmitovim čekićem) mogu zavarati obzirom da se, usled termo-obrade, u raznim tačkama poprečnog preseka mogu ostvariti značajne razlike u čvrstoći. Ne upuštajući se u istorijski razvoj izraza za određivanje stepena očvršćavanja betona mora se naglasiti značaj brojnih istraživanja *S.A. Mironov*-a i njegovih saradnika. U opštem obliku njihova formula je data kao eksponencijalna kriva:

$$R = 1 - A e^{-B k t_{\text{ner}}} \quad (10.1)$$

gde su veličine:

- R - stepen očvršćavanja (dat kao odnos čvrstoće betona u datom trenutku i poznate čvrstoće  $R_{28}$ ),
- A - koeficijent početne čvrstoće betona (unositi uticaj čvrstoće betona u trenutku završetka procesa primarnog nakupljanja čvrstoće - t.j. čvrstoće nakon tri dana ( $R_3$ )),
- B - koeficijent brzine očvršćavanja (kao i parametar A zavisi od veličine  $R_3$ ),

- $k$  - temperaturni koeficijent (ima oblik stepene funkcije i takode zavisi od  $R_3$ ),
- $t_{\text{nor}}$  - vreme očvršćavanja betona u normalnim uslovima (temperatura od  $20^{\circ}\text{C}$ , vlažnost 90%).

Nakon brojnih analiza i uporedivanja stvarnih rezultata sa datim teorijskim postavkama problema doslo se metodom najmanjih kvadrata do sledećih izraza za pomenute parametre:

$$A = 292 (R_3)^{1/3} \quad (10.2)$$

$$B = 7,3 / (100 - R_3) \quad (10.3)$$

$$k = (0,6 + 0,02 t)^n - C \quad (10.4)$$

pri čemu su novouvedene veličine:

$$t - \text{temperatura očvršćavanja betona } (^{\circ}\text{C})$$

$$n = 1,4 + 50/R \quad (10.5)$$

$$C = 0,054 + 1,33/(100 - R_3) \quad (10.6)$$

Tako je, na osnovu dovoljno precizno određene vrednosti  $R_3$ , moguće odrediti dinamiku razvoja čvrstoće na pritisak pa time i trenutak dostizanja nivoa kritične čvrstoće na pritisak, važne za usvajanje ritma rada i trenutka rašalovanja.

## 10.5. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANOJ RADNOJ SNAZI

Angažovana radna snaga je često ključna karakteristika angažovane tehnologije. Ona je (prema definiciji) jedan od nosioca znanja (mada je sve veće učešće automatizacije) pa time i parametar koji nivelira efikasnost njene primene. Usvojeni kriterijumi:

- $D_1$  - Ukupni utrošak radne snage,
- $D_2$  - Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage, i
- $D_3$  - Stepenn opasnosti po zdravlje radnika

daju neophodne polazne elemente za procenu mogućnosti realizacije ciljnog kvaliteta rada. U analizi potreba za radnom snagom postoje dva osnovna pristupa:

1. - da se, radi preciznije uporedne analize, izvrši inventarisanje i popis svih pozicija rada koje su karakteristika *samo* konkretne metode rada i pritom zanemare pozicije koje odlikuju rad u "normalnim" ambijentalnim uslovima, i

2. - da se, radi dobijanja potpune informacije o utrošku "živog" rada, snime sve pozicije radova alternativnih metoda i izvrši upoređivanje akumuliranih velicina.

Prvi pristup je daleko efikasniji sa stanovišta rangiranja metoda jer daje neto vrednost dopunskog rada, koji je direktna posledica izbora konkretne tehnologije, ali je drugi ekonomičniji jer ne zahteva kompletno poznavanje varijantnih rešenja i strukturu svih angažovanja ljudi na njima. Sa druge strane kod nekih metoda ne postoji jasna razlika između osnovnih i dopunskih aktivnosti pa ni mogućnost precizne diferencijacije u cilju vrednovanja. Stoga se u radu treba oslanjati na publikovane izveštaje ili podatke iz normi (npr. SNiP) kako bi objektivnost ocene očuvala neophodan nivo. Deo procesa osvajanja nove tehnologije je i proces obučavanja za primenu nove opreme i kontrolno-mernih instrumenata. On počinje obukom rukovodilaca iz tehničke pripreme da bi se nastavio treningom neposrednih izvršilaca kroz kurseve i metodsko pokazne vežbe na samom gradilistu. Kod postupaka koji angažuju električnu energiju visokog napona neophodan uslov za obuku je i odgovarajuće predznanje odnosno kvalifikacioni nivo kandidata. Samo nakon obuke i prijema atestirane opreme radnici smeju početi praktičnu primenu novih znanja ali se adekvatni rezultati mogu očekivati tek nakon perioda uigravanja. Međutim, sve vreme moraju biti obezbedene propisane profilaktičke mere koje garantuju bezbedan rad i minimiziraju štetnost efekata svih primenjenih sredstava.

## 10.6. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

Pregled metoda rada za *cold weather concreting* pokazuje jasnu tendenciju razvoja tehnologije radova u pravcu kontrolabilnih postupaka sa kratkim režimima rada. Ovakve metode obično troše značajne količine skupe vrste energije pa su:

- $E_1$  - Utrošak energije za zagrevanje komponenata betona,
- $E_2$  - Utrošak energije za zagrevanje svežeg betona, i
- $E_3$  - Utrošak energije za zagrevanje ugrađenog betona

nezaobilazne veličine o kojima se mora voditi računa pre konačnog izbora. Činjenica je da su sva tri parametra iste vrste i da bi se sumiranjem troškova oko angažovane energije pojednostavio postupak procene. Međutim, ova podela ima dublji smisao koji proizilazi iz usvojene metodologije rangiranja. Pokazano je u radu da energija angažovana pri zagrevanju sveže (ili već ugrađene) betonske mase može biti utrošena noću, kada je tarifa znatno niža, a naknadno održavanje propisanog režima (koje traje relativno dugo) neminovno donosi utrošak skuplje energije. Ovakva podela kriterija dozvoljava dodeljivanje adekvatnih težinskih koeficijenata vrstama utrošaka čime objektivizira postupak ocene metode rada. Troškovi se mogu iskazati vrlo precizno jer je utrošak energije za pojedine vrste nosača (i određenu metodu) i definisanu kritičnu čvrstoću konstantan, ali bi kod *ocenjivanja* postupka ipak trebali biti dati kao interval vrednosti (npr. 20 - 25 KWh/m<sup>3</sup>) kako bi se omogućilo ocenjivanje i onih metoda za koje postoji mogućnost samo okvirne (intervalne) procene. Ukoliko bi se usvojilo da ovi troškovi budu (preko zadatih skala) akceptirani kao konkretne vrednosti došlo bi do slučaja da se zbog različitih vrednosti pri obradi *jedne vrste* stubova nikako ne mogu generalizovati stavovi o utrošku energije za - stubove kao *vrstu nosača*. Nezavisno od toga kako se formiraju skale za ocenu metoda *konkretan slučaj* (kakav se razmatra u ovom radu u poglavlju 11) treba oceniti na bazi stvarnih rezultata.



### 10.6.1. VREME POTREBNO ZA TERMIČKU OBRADU BETONA

Svi načini delovanja na betonsku smesu imaju kao krajnji cilj brzo formiranje veštačkog kamena u vidu betona. Među poznatim postupcima se kao jedan od najefikasnijih javlja "toplotna obrada betona" koja ubrzava procese hidratacije (hidrataciona toplota čini 30-40% ukupne količine toplote koja deluje na sam beton) i relativno ne menja kvalitet i kvantitet produkata hidratacije.

Između ostalih, kao posebno važni za pravilno formiranje "veštačkog kamena", su određene fizičke pojave (promene zapremine tretirane mase usled širenja pod dejstvom povišenih temperatura, pritisak pare u porama betona, razmena temperature i vlage sa okruženjem, itd) koje imaju ishodište u parametrima izabrane tehnologije rada. Inženjeri danas svode brojne odlike očvrstlog betona na samo par njihovih reprezentata (čvrstoća na pritisak, čvrstoća na zatezanje) što je ipak neadekvatna simplifikacija problema ocene kvaliteta ali se usled rasprostranjenosti u praksi mora sa neophodnom pažnjom uzeti kod analize problema. Takvom polazištu bi (kao daleko preciznija aproksimacija svog pristupa) odgovarao stav da fizičko-mehanička svojstva očvrstle betonske mase (izložene postupcima termo-obrade) zavise prevashodno od:

- brzine zagrevanja svežeg betona,
- temperature izotermne faze obrade,
- brzine hlađenja obrađenog betona, i
- čvrstoće mladog betona u trenutku apliciranja režima termičke obrade (površine, mase) betona.

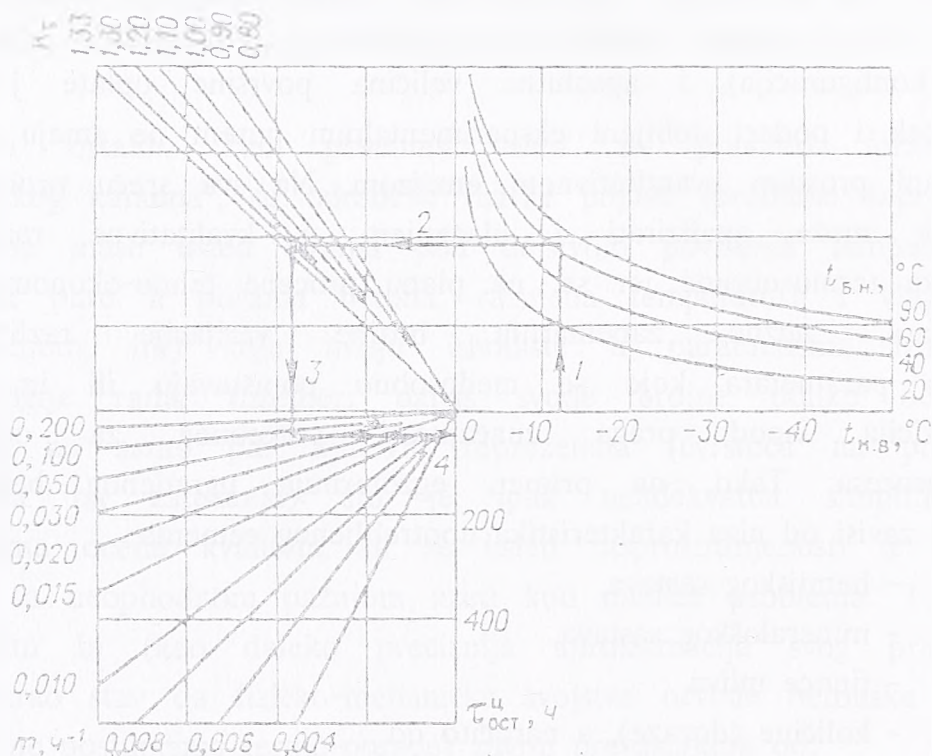
Mnoštvo parametara daje analizi razmene toplote u okviru sprege medija za prenos toplote, tehnološke opreme, svežeg betona i sredine (okruženja) formu nerazmrsivog višeslojnog problema u kome se dinamika temperaturnih promena najteže prati i kontroliše. Jednoznačnost veličina koje bi želeli smatrati konstantama (recimo

koeficijent toplotne provodljivosti betona u toku termo-obrade) se može prihvatiti samo uz radnu napomenu da se "u slučaju druge prirode agregata, sastava mešavine i odlika (nezaobilaznih) aditiva mora pristupiti korekciji vrednosti tih parametara". Nestandardizovani oblici i struktura oplatnih formi daju razmeni toplote u opisanom sistemu značajan porast "stepeni slobode". Ako se ima u vidu da na razmenu toplote (hlađenje) značajno utiču brzina vetra i njegov upadni ugao, vlažnost i temperatura, kao i oblik (konfiguracija) i apsolutna veličina površine oplata jasno je da čak i podaci dobijeni eksperimentalnim putem ne smeju biti sravnjivani prostom kvantitativnom analizom. Na svu sreću problem se ipak može analizirati i ulaženjem u kvalitativne razlike postupaka termo-obrade jer se, na planu procene tehno-ekonomskih parametara, nužno zanemaruju brojne varijacije različitih uticajnih parametara koje se međusobno poništavaju ili im je superpozicija ispod praga značajnosti potrebnog za ocenu makro-procesa. Tako, na primer, egzotermija ugrađenog betona direktno zavisi od niza karakteristika upotrebljenog cementa:

- hemijskog sastava,
- mineraloškog sastava,
- finoće mliva,
- količine (dozaže), a naročito od
- *temperaturnog režima* u kome se egzotermija odvija.

Važnost poslednjeg parametra se zasniva na činjenici da je on najnekontrolabilniji i da shodno tome može učiniti deplasiranim brojne napore na putu ka optimalnom režimu očvršćavanja. Samo ukoliko se zanemare uticaji poremećaja temperaturnog režima (osim nekih ekstremno velikih) može se adekvatno reagovati već u fazi projektovanja sastava mešavine. Sa druge strane, kao posebno važne među makro veličinama koje odražavaju stanje betona i uslove u kojima on sazreva, srednja temperatura betona ( $t_{b,sr}$ ) i vreme hlađenja do izjednačenja temperature betona sa spoljnom

temperaturom zahtevaju jednostavne, racionalne procedure pri identifikaciji čime zadatak inženjera-istraživača čine vrlo složenim. No, u dosadašnjem radu sovjetskih naučnika dobijeni su rezultati koji se mogu svesti na par atraktivnih nomograma (slika 10.3). Ovi nomogrami se javljaju kao odgovor istraživača na



slika 10.2 - Nomogram za određivanje vremena hlađenja centralne  
vačke konstrukcije u slučaju pasivne termo-obrađe betona (87)

nepreciznosti koje u proračunu toplotnog bilansa ostaju ukoliko se primeni dobro poznata formula *Skramtaev-a*. On je, zanemarujući sve marginalne veličine (u cilju dobijanja pogodnog oblika formule za jednostavnu praktičnu primenu), ponudio izraz koji u zavisnosti od uslova hlađenja i veličine modula površine ( $M_p$ ) kod procene ukupnog vremena dostizanja ambijentalne temperature pravi grešku od 20-80% - za inženjerski pristup vrlo grubu.

Značajan pomak ka preciznijoj slici promena stanja temperaturnih polja dolazi nakon potvrde pretpostavke da brzina hlađenja betona nije zavisna od ukupne (kalorijske) moći unutrašnjih izvora toplote već je funkcija dimenzija i oblika betonskog elementa. G.N. Duljnev i G.M. Kondratjev pokazuju da je brzina hlađenja logaritamska funkcija temperaturne razlike temperature betona i temperature sredine (vazduha):

$$v_{h,b} = f \{ \ln (t_b - t_{vaz}) \} \quad (10.7)$$

ciine se sam proces simplifikacije proračuna zadržava na nivou nalazenja najpogodnijih oblika krivih koje odražavaju promene u stacionarnoj i nestacionarnoj oblasti promene toplotnog bilansa. Kako su promene ovog bilansa posledica egzotermnih procesa unutar mase to vrsta cementa igra značajnu ulogu pri određivanju raznih parametara toplotnog stanja u određenom trenutku. Sva dosadašnja, kompleksna istraživanja međusobnih zavisnosti nabrojanih promenljivih se, kao po pravilu, oslanjaju na dve vrste cementa:

- portland cement, i
- šljako-portland cement.

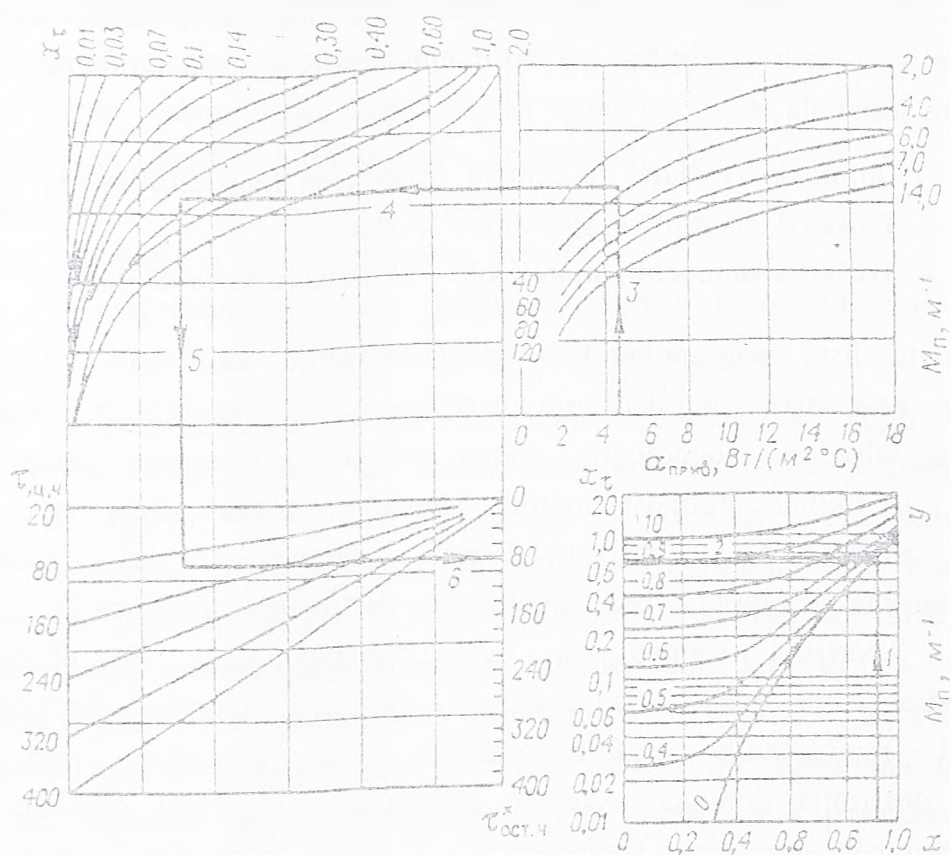
Njihov sastav, u radovima do kojih je autor dolazio, nije bio preciziran tako da one mogu podrazumevati brojne podvrste. Aproksimacija koja je time uvedena predstavlja neminovnu žrtvu ali je učinjena greška kontrolabilna u meri koju dopuštaju iskustvo analitičara tehnološkog procesa i bliskost primenjenog cementa jednoj od dveju ponuđenih opcija. Da bi se došlo do "preciznog" vremena hlađenja mora se poći od činjenice da je, na početku procesa hlađenja, temperatura površine betona neravnomerna. To je poznata posledica sastava oplata kao i neujednačenosti temperature mase betona koja nastaje prilikom njegovog transporta i ugrađivanja. Time se vreme hlađenja deli na periode *neregularnog* i *regularnog* režima hlađenja pri čemu drugi, daleko duži,



podrazumeva uslove ujednačene površinske temperature ugrađenog betona pri kojima promene toplotnog bilansa zavisi od veličine bloka, modula površine i drugih "regularnih" parametara. Neki od pokazatelja do kojih je došao *Golovnev* govore da, u zavisnosti od tipa nosača i odlika konstrukcije, "regularna" faza traje 75-90% ukupnog vremena hlađenja dobijenog iz prethodno prikazanih nomograma. Ovakvi nomogrami su, uprkos određenom stepenu direktno "apsorbovanih" aproksimacija, ipak naš najpouzdaniji instrument za utvrđivanje vremena hlađenja ugrađenog betona koji je izložen bilo aktivnoj bilo pasivnoj varijanti termo-obrađe. Zato će u daljoj analizi nomogrami i biti izvor relevantnih podataka.

### 10.6.2. ODREĐIVANJE SREDNJE TEMPERATURE BETONA U TOKU PROCESA OČVRŠĆAVANJA

Polazeći od *maturity* koncepta lako se dolazi do ideje da integral dejstva temperature betona i vremena u kome je beton bio izložen toj temperaturi može biti zamenjen proizvodom ukupnog vremena "sazrevanja" i srednje temperature betona u toku dostizanja kritične čvrstoće na pritisak. Kako je srednja temperatura betona direktno zavisna od primenjenog postupka brzog a kontrolisanog očvršćavanja to pri njenom određivanju treba poći od specifičnih razlika aktivne i pasivne termo-obrađe. Te razlike se mogu podeliti na one koje proizilaze iz osobina neregularne faze termičke obrađe (faze u kojoj egzotermija unosi poremećaje toplotnog bilansa) i razlike koje su u vezi sa fazom izbalansiranih priliva i gubitaka toplote. Ove druge su daleko manje i odlikuju dominantan deo procesa sazrevanja pa temperaturnu razliku betona ( $t_b$ ) i sredine ( $t_a$ ) možemo podvesti pod neki od oblika eksponencijalnih krivih koje odražavaju zavisnost od brzine pada te temperaturne razlike i trajanja procesa hlađenja ali su i direktno proporcionalne temperaturi vazduha ( $t_a$ ).



slika 10.3 - Nomogram za određivanje vremena hlađenja proizvoljne tačke konstrukcije u slučaju pasivne termo-obrađe betona (87)

Iako nije direktan kriterijum pri oceni (vrednovanju) nabrojanih metoda aktivne i pasivne termo-obrađe srednja temperatura betona je vrlo indikativna za sagledavanje uslova koje je beton u toku sazrevanja imao pa se kroz par nomograma *Golovnev*-a (slika 10.3) daje mogućnost za njeno neposredno određivanje. Sam *Golovnev* navodi da odstupanje rezultata, dobijenih iz ovih nomograma, od onih dobijenih eksperimentalnim putem ne prelazi 7-9% što je za opštost same tehnike proračuna sasvim zadovoljavajuće.

## 10.7. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

Jasno je da se analizom troškova angažovane energije i radne snage ne iscrpljuje lista izdataka za primenu određene tehnologije ali je takode jasno da ni:

- $F_1$  - Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator,
- $F_2$  - Troškovi za aditive specijalne namene, i
- $F_3$  - Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

ne čine tu listu potpunom. Ova grupa kriterija ima zato cilj da ukaže na one vrste izdataka koje, ukoliko se ne sagledaju pre same aplikacije određene tehnologije, mogu svojom naknadnom pojavom umanjiti upotrebnu vrednost metode. Izuzetno važan uticaj vrste i dozaže aditiva na čvrstoću betona negovanog pri niskim temperaturama je morao naći adekvatno mesto pri utvrđivanju liste kriterija. Teorijsku osnovu za takav pristup dala su obimna ruska istraživanja (90) koja pokazuju da 12% ukupne disperzije vrednosti realizovanih čvrstoća nastaje kao posledica tipa i količine doziranja dodatka. Ako se pritom zna da vrsta cementa i sastav betonske mešavine (pojedinačno ili kroz kompleksno dejstvo) utiču na 75% pomenute disperzije postaje jasno da veličina i struktura troškova za ove dve komponente betona mogu u značajnoj meri odrediti rang neke metode rada.

## 10.8. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

Logistička podrška jednog tehnološkog sistema podrazumeva mnoge i kompleksne mere koje obezbeđuju ostvarivanje planiranih efekata rada tako da se kroz grupu kriterija u kojoj su:

- $G_1$  - Neophodnost zaštite nakon primene metode,
- $G_2$  - Intenzitet kontrole tokom primene metode, i
- $G_3$  - Kontrolabilnost metode

sagledava i taj, nezaobilazni deo proizvodnog procesa. Svaki od kriterija zahteva sopstvenu skalu ocene pa je nužno potpunije objašnjenje njihove prirode. Prvi iz ove grupe vrednuje sve mere tehničko-tehnološke zaštite neophodne za očuvanje uslova u kojima beton može nakupiti propisani stepen čvrstoće. Ove mere se odnose na osnovne fizičke karakteristike materijala (od uticaja na razvoj hidrataciju):

- sadržaj vlage u porama betona, i
- temperaturu mase (misli se na nivo temperature i stepen njene ravnomernosti u okviru bloka).

Uloga drugog kriterija je da favorizuje metode kod kojih nakon ugrađivanja nema potrebe za intenzivnom kontrolom što podrazumeva izostanak "petlji" u kretanju radnika i povećanje produktivnosti. Neke metode imaju potrebu za minimalnom kontrolom jer je postupak sazrevanja pojednostavljen i kontrola svedena na pasivnu fazu koja podrazumeva evidentiranje rezultata obrade, dok kod drugih postoji oprema koja vrši automatsku kontrolu i korekciju upravljačkih parametara procesa negovanja materijala. Svaki od postupaka obrade iskazuje određeni stepen pouzdanosti pod kojim treba podrazumevati sposobnost realizacije očekivanih ciljeva (definisanih kvantitetom i kvalitetom radova) u toku određenog (u tehnologiji rada minimalno potrebnog) perioda vremena. Tako ocena metode rada dobija još jednu dimenziju jer (u tehnološkom smislu posmatrana) pouzdanost zavisi od sposobnosti sistema da modifikuje ulazne parametre u cilju korekcije *output*-a ali i od stepena automatizacije procesa (što je manje "ručnog upravljanja" manja je i inertnost sistema u slučaju pojave neželjenog spoljnog impulsa). Stoga vrednovanje metoda treba razdvojiti na dva dela:

a. - vrednovanje *prilagodljivosti* tehnologije zahtevima da se bez naročitih teškoća prosečni praktični učinak (spoljnim dejstvima privremeno smanjen) održava u projektovanim granicama, a to pokazuje sposobnost izvođača da primenom upravljačkih akcija



utiče na uobičajeni ritam rada i ostvarenje parcijalnih rokova, i

b - vrednovanje *automatizovanosti* procesa koja tu startnu prilagodljivost na najlakši i najbrži način treba da realizuje.

Obe grane ovog postupka moraju imati svoje vlastite skale ocene sa rasponom vrednosti od 0 - 1 a ukupna ocena bi se dobila *zbirom* tih parcijalno donetih ocena. Iako se *produkt* parcijalnih ocena (zbog srodnosti vrednovanih pojava) javlja kao naizgled prirodniji iskaz stava analitičara prema metodi, zbog objektivne pojave i vrednosti (0,00) kao parcijalne ocene. *zbir* ostaje za ovde razmatrane grupe kriterija opštiji način iskazivanja jedinstvenog stava po oba data parametra.

## 10.9. SKALE ZA OCENU VREDNOSTI KRITERIJA

Svakodnevno donoseći sud o izboru među brojnim alternativama ili rangirajući neke pojave čovek neminovno (a uglavnom nesvesno) vrši i vrednovanje objekata izbora. Pritom je odlučivanje utoliko lakše ukoliko ima manje alternativa. Skale koje su ovde formirane u cilju bržeg *prepoznavanja sličnosti* vlastitog stava donosioca odluke i "objektiviziranih" merila imaju u većini slučajeva 5 vrednosti kojima su obuhvaćene dve ekstremne (krajevi skale), jedna "prelomna" i dve za koje se može reći da su "prelaznog" karaktera. Pritom se nije insistiralo na proporcionalnosti skale pa tako "prelomna vrednost" nije obavezno na polovini vrednosnog raspona skale, niti su "prelazne vrednosti" nužno u četvrtinama tog raspona. Prilikom utvrđivanja brojčanih ocena pošlo se od stava da u *fuzzy* sistemu vrednovanja postoje ocene koje mogu vrlo precizno opisati određeno stanje i da se prilikom njihovog preslikavanja (kvantifikovanja) ne mora strogo poštovati skup vrednosti koji obuhvata četvrtine, petine i desetine raspona skale. Generalno posmatrano vrednosti se mogu menjati po

linearnom, eksponencijalnom ili bilo kom drugom zakonu i uvek moraju odraziti *stepen razlike* koji donosioc odluke uočava između parova ponuđenih vrednosti.

## A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

### a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Prva vrednost na skali je uvedena za slučaj vrednovanja hibridnih metoda za čiju je širu primenu (osim ideje) neophodan značajan pomak u izradi opreme ili adaptaciji proizvodnog postupka. Metode

Skala A.1.

nedovoljna	dovoljno velika	vrlo velika	skoro potpuna	potpuna
0,10	0,50	0,80	0,90	1,00

koje su predmet analize u ovom radu se uglavnom mogu ocenjivati visokim ocenama, mada ostaje mogućnost da se neka od podvarijanti oceni i sa (0,50) što bi značilo da je nivo razvoja *dovoljan* za ostvarenje određenog zadatka ali ne i za masovnije primenu.

### a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Favorizovanje samo afirmisanih postupaka je gotovo *instiktivna* reakcija inženjera-analitičara koji su skloniji postupcima o čijoj

Skala A.2.

vrlo mala	mala	značajna	velika	vrlo velika
0,00	0,15	0,50	0,85	1,00

prirodi, pa i načinu rešavanja mogućih problema, mogu konsultovati kolege iz srodnih izvodačkih firmi. Skala odražava upravo takav stav jer je on, posebno kod firmi bez naročitog iskustva sa radom u klimatski nepovoljnim uslovima, naglašenog značaja.

### a.3. Materijalna ulaganja u proces osvajanja metode

Procena *stepena* materijalnih ulaganja ostavlja uvek nedoumicu tipa "da li je sve obuhvaćeno", ali ova skala vojim "hiperbolicnim" oblikom ide ka želji da se ne pravi velika razlika između "vrlo velikih ulaganja" i "značajnih ulaganja". Prva obuhvataju kupovinu kompletno nove opreme velike investicione vrednosti koja se mogu otplatiti samo u slučaju dugog i kontinualnog rada a druga

Skala A.3.

vrlo mala	mala	značajna	velika	vrlo velika
0,00	0,35	0,70	0,90	1,00

podrazumevaju ulaganja u opremu i edukaciju dela tehničkog osoblja i za koja je dovoljan relativno mali obim posla da bi se osvajanje metode isplatilo. Pri tom je ostavljena i ocena (0,90) kao prava mogućnost izbora koja odgovara slučaju kada se deo potrebne opreme može adaptirati modifikacijama na već kupljenoj. Pod malim materijalnim ulaganjima treba podrazumevati pravljenje opreme u vlastitoj režiji uz prevashodnu adaptaciju postojećih uređaja i alata.

## B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

### b.1. Primenljivost za različite tipove nosača

U okviru procene "primenljivosti" kao ocena uz kriterijum se može uzeti *procentualno učešće* broja nosača za koje je primena same metode racionalna u odnosu na ukupan broj nosača koji se uopšte izvode. U literaturi nema pouzdanih podataka o zastupljenosti (u masi) recimo skeletnih konstrukcija (stubovi, grede) u odnosu na količinu betonskih nosača. Posebno teška bi bila i procena odnosa koja bi važila samo za određena klimatska područja u kojima se javlja potreba za primenom metoda zimskog betoniranja ali takva

procena je *ipak neophodna* obzirom da odražava bitnu razliku između "univerzalnih" i "specijalizovanih" postupaka obrade materijala. Na teritoriji bivšeg SSSR-a (kao reprezenta tržišta koje prihvata metode sa liste) je u oblasti visokogradnje vrlo visoko učešće konstrukcija sa nosećim zidovima dok je primena skeletnih sistema

Skala B.1.

samo masivni	tanke ploče, stubovi i grede	masivni uz ploče i zidove	svi bez masivnih	svi nosači
0,05	0,10	0,90	0,95	1,00

gotovo - ekskluzivna. Ponudene vrednosti na skali predstavljaju procenu autora (dobijenu ili korigovanu na osnovu "ankete" određenog broja stručnjaka iz prakse) koja može biti prihvatljiva samo do objavljivanja nekih rezultata obimnijih statističkih istraživanja.

### b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Ovde je kao kriterijum usvojena srednja temperatura vazduha u toku sazrevanja ugrađene betonske mase ( $t_a$ ) a podrazumeva primenu na svim temperaturama jednakim ili većim od naznačene. Vrednosti date novom skalom podrazumevaju *stepen izvodljivosti radova* posmatran sa stanovišta otežanih fizioloških uslova za izvođenje radova, jer je jasno da se sa padom  $t_a$  (naročito na vrlo niskim temperaturama) naglo smanjuje obim betonskih radova. Polazeći od stava da se na  $t_a = 0^\circ\text{C}$  može (primenom bilo koje metode) izvesti 100% planirane realizacije utvrđene su (primenom stavova iz poglavlja 10.3) sve ostale vrednosti skale:

Skala B.2.

- 10°C	- 15°C	- 20°C	- 25°C	- 30°C
0,15	0,32	0,52	0,74	1,00



Da bi se utvrdila stvarna primenljivost za *konkretan tip objekata* (jer je on povod za vrednovanje i rangiranje metoda) treba prema skali B.1. očitati vrednosti u skladu sa preovladavajućom grupom betonskih nosača i tom vrednošću pomnožiti koeficijent uz odgovarajuće  $\sigma_{sr} t_a$ . Tako je, na primer, za objekat koji se ima graditi pri  $\sigma_{sr} t_a \approx -15^{\circ}\text{C}$  a projektovan je kao sklop međuspratnih ploča na betonskim platnima ocena primenljivosti data proizvodom (0,32 0,90 = 0,288). Na nivou ovog rada rangiranje će zavisiti samo od vrednosti dobijenih po skali B.2.

### b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

Jasno je da (bez dopunskih informacija) nijedan iskusniji inženjer neće dati prednost tehnologiji rada koja podrazumeva uvođenje novih ograničenja u proizvodni proces. Njegov napor da obezbedi (u dužem periodu vremena) ugovoreni kvalitet betonskih radova postaje nevidljivi *filter* za ulaz novih nepoznanica u gradilište kao pravi sistem. Stoga skala B.3. jako favorizuje (manja vrednost  $\Rightarrow$  bolja ocena) metode sa malim uticajem *novih* tehnologije na planiranu dinamiku radova. Ocena (0,15) odgovara postupku kojim praktični učinak zadržava vrednost *blisku* onoj "u normalnim uslovima" ali se

Skala B.3.

zanemarljiv	mali	značajan	veliki	odlučujući
0,00	0,15	0,50	0,85	1,00

u radu značajno povećava njegovo standardno odstupanje, dok ocenom (0,50) treba oceniti metodu čiji se *dnevni* učinak zadržava na repnom nivou ali samo uz - produženi rad. Veliki uticaj opreme (0,85) odgovara slučaju kada se (u cilju zadržavanja istog nivoa proizvodnje) mora pribići povećanju broja radnih jedinica za obradu (spravljanje, transport ili termičku obradu) svežeg betona.

## C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće  $R_{28}$ 

Brzina kojom se nosač osposobljava da prihvati osnovna tehnološka opterećenja (kod skidanja oplata, transporta i manipulacije...) je ključna za proračun trajanja ciklusa obrade tog nosača, a samim tim i određivanje praktičnog učinka jednog kompleta instalirane opreme. Skala ima podelu koja bazira na, u praksi, uobičajenim trajanjima proizvodnih ciklusa: jedna smena, radni dan, "dva ciklusa nedeljno", radna nedelja. Podela je *prirodna* jer bazira na onom ritmu rada koji je potpuno prihvatljiv za radnu snagu. Ostaje ipak pitanje "koja je čvrstoća stvarno *kritična*" obzirom da se ona

Skala C.1.

za $\leq$ 8 sati	do 24 sata	do 3 dana	do 7 dana	za $\geq$ 7 dana
1,00	0,85	0,50	0,15	0,00

menja u zavisnosti od tipa nosača (nije ista za stub i gredu) pa i skala nema univerzalnost za sve konstrukcijske sisteme. No, za konkretan objekat (konstrukcijski sistem) uvek možemo definisati prevladavajuću vrstu nosača a samim tim i novu, merodavnu vrednost kritične čvrstoće a skala, njeni intervali i dodeljene ocene uprkos aproksimiranju zadržavaju dozu neophodne univerzalnosti.

c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće  $R_{28}$ 

Prilikom oblikovanja skale pošlo se od: čvrstog stava da je svaki dan ranijeg dostizanja računске čvrstoće u toku prvih 7 dana bar *dvostruko* vredniji (za ritam gradjenja) od bilo kog drugog, stava

Skala C.2.

za $\leq$ 7 dana	do 14. dana	do 21. dana	do 28. dana	za $\geq$ 28 dana
0,15	0,45	0,70	1,00	2,00

da 28 dana sazrevanja odgovara vrednosti 1,00 i stava da je svako prekoracenje tog roka ozbiljan tehnološki nedostatak vrednovane metode. Tako se došlo do gore navedenih vrednosti koje analitičaru dozvoljavaju da u slučaju poznavanja preciznijih podataka o brzini sazrevanja može (na osnovu interpolacije) dodeliti adekvatniju ocenu.

### c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvšćavanja

Jasno je da se većina posmatranih metoda nalazi u *zreloj* fazi svog razvoja u kojoj je postojanje pada čvrstoće nakon završetka obrade

Skala C.3.

ne postoji	zanemarljiv	značajan je
0,00	0,50	1,00

dokaz da je tu pojavu bilo *nemoguće* u potpunosti isključiti. Stoga i skala C.3. rigorozno "kažnjava" čak i nagoveštaj opasnosti od eventualnog pada jednom dosegnute čvrstoće. Takve metode postaju u firmi vremenom nepopularne jer nepažnja izvođača može stvoriti neželjene probleme oko dokaza kvaliteta i omogućiti investitoru da ispostavi skupe a neoborive *claim*-ove.

## D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

### d.1. Ukupni utrošak radne snage

Kao jedan od najvažnijih tehno-ekonomskih parametara ukupni utrošak radne snage je pracen i analiziran u brojnim radovima stranih i domaćih autora pa je moguća precizna ocena većine metoda na bazi relevantnih podataka. Za druge, ovde nepomenute metode je naravno neophodan proračun na osnovu karte procesa i važećih normi. Stoga će *prirodna* jedinica mere biti norma-čas (NČ) a treba prihvatiti i dozu neujednačene tačnosti podataka iz referentne literature.

## d.2. Dopunska edukacija radne snage

Skala D.2. odražava stav da je neophodno *blago* favorizovanje onih metoda koje omogućavaju (jednostavnošću opreme i proizvodnog postupka) lak prelazak na nov režim rada i pouzdanu realizaciju samog posla. Nezaobilazna je činjenica da *svaka* promena tehnologije rada traži proveru i dopunu znanja ali je sposobnost *usvajanja* znanja u vezi i sa starosnom strukturom radnih brigada. Naše građevinarstvo dugo pati od rasta prosečne starosti radne snage viših kvalifikacionih grupa (zbog odsustva želje mlade radne snage da se profesionalno i trajno veže za posiove sa teškim uslovima rada) pa je za metodu izuzetno važno da minimalnom

Skala D.2.

nepotrebna	minimalna	značajna	obimna	potpuna
0,00	0,20	0,50	0,80	1,00

dopunskom edukacijom kod svih radnika očuva entuzijazam za njenu dugotrajnu primenu. Postupci (ocena im je 0,90) koji "vrlo obimnom" obukom dobijaju mesto u fondu znanja *majstora* nisu poželjni u dobrom delu malih i srednjih firmi koje problem radne snage često rešavaju na najlakši način - angažovanjem "sezonaca" i unajmljivanjem radnika.

## d.3. Porast opasnosti po zdravlje radnika

Jedan od razloga nevoljnog angažovanja radnika na građevinskim poslovima u ekstremno teškim klimatskim uslovima je i opasnost od narušavanja zdravlja. Ukoliko se kao dopunski otežavajući faktor javi i potreba za sprovođenjem kompleksnih HTZ mera efekti rada će

Skala D.3.

zanemarljiv	mali	značajan	veliki	vrlo veliki
0,00	0,35	0,70	0,90	1,00



biti ostvareni uz vrlo veliki psihološki napor. Progresivan rast ovog napora u tim uslovima odražava svojim ocenama i skala D.3. pa je nepotreban detaljan komentar njene podele, tim pre što su ocene pojedinih metoda ilustrovane i preciznim opisima prirode i porekla opasnosti koja se javlja prilikom primene date tehnološke opreme.

#### E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

Kao što je u prethodnom delu rečeno grupa kriterija koja obuhvata:

- e.1. Troškove energije za grejanje komponenata betona
- e.2. Troškove energije za grejanje svežeg betona
- e.3. Troškove energije za grejanje ugrađenog betona

se u procesu vrednovanja koristi stvarnom utroška energije (izražene u  $\text{KWh/m}^3$ ) data odgovarajuća mera poželjnosti. Skala je formirana na ovaj način da *kaznjava* progresivan rast ovih troškova imajući na umu i opšti svetski trend koji direktno favorizuje metode sa malim utroškom energije po jedinici proizvoda.

Najveća mana ovakve skale je to što je "univerzalna" jer ocenjuje metodu ne vodeći računa o početnoj temperaturi betona ( $t_{bp}$ ), koja je funkcija ambijentalnih uslova ( $t_a$ ) i kvaliteta oplata, do koje je neophodno zagrejati komponente ili samu betonsku masu. Kako je ovo (ipak) grupa čisto ekonomskih kriterija a o uticaju navedenih veličina preciznije pokazatelje sadrže drugi kriteriji mana se ne odražava na kvalitetu *ocene* u meri koja bi bila značajna. Poreklo "mane" je instinktivna potreba analitičara da kompleksan problem u što većoj meri zadrži "u velikim komadima" a ovde je primenjena metodologija koja *a priori* odbacuje takav pristup.

#### F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

Kao u prethodnoj grupi E - kriterija i u ovoj će biti primenjena jedinstvena skala vrednosti obzirom da su:

f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

f.2. Troškovi za aditive specijalne namene

f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

takve prirode da je njihova velicina (u odnosu na ostale ekonomske dovoljno podataka za objektivno vrednovanje. Stoga je u skali F.1. dato samo nekoliko vrednosti koje kvantifikuju tri najčešća stanja pokazatelje) često zanemarljiva pa ni u dostupnoj literaturi nema

Skala F.1.

ne postoje	zanemarljivi su	značajni su
0,00	0,50	1,00

dovoljno podataka za objektivnije vrednovanje. Stoga je u skali dato samo nekoliko *opsih* stanja za koja uvek možemo formirati makar grubu *procenu velicine* troškova.

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Performanse instalirane opreme za obradu i ubrzano sazrevanje betona mogu biti takve da (u cilju efikasnog iskorišćenja njenih mogućnosti) zahtevaju skidanje i premeštanje na druge radne tačke

Skala G.1.

nepotrebna	minimalna	potrebna	pojačana	intenzivna
0,00	0,35	0,70	0,90	1,00

ubrzo nakon završetka (npr. termičke) obrade ugrađenog materijala. Stoga se zaštita od termo-šoka javlja kao primarni uslov za dalje odvijanje procesa a kako angažuje dopunski rad i razne izolacione materijale skalom ocena se jako kažnjava svaki rad veći od nekog *minimalno potrebnog*. Pojam minimalno potrebnog se u praksi dovodi u vezu sa radom u normalnim uslovima ali mere na nivou minimalnih

za rad u posebnim uslovima mogu biti i nešto obimnije obzirom da je prisutan određeni diskontinuitet (skok) u dinamici očvršćavanja betona.

### g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Bilo da je izostanak aktivne ljudske ("žive") kontrole posledica automatizma procesa sazrevanja (u kome dinamika očvršćavanja nije toliko osetljiva na faktore poremećaja), bilo da je kontrola delom poverena automatima, izvođači preferiraju postupke kod kojih nije

Skala G.2.

nepotrebna	retka	povremena	česta	neprekidna
0,00	0,15	0,50	0,85	1,00

potrebno ciklično vraćanje na iste pozicije betoniranja. Zahtev da se smanji ljudski rad ima osnovu u nepovoljnim klimatskim uslovima u kojima se kontrola (a i sav drugi ljudski rad) vrši. Vrednosti u skali snažno favorizuju metode (po principu što viša *ocena* - to niži rang) kod kojih se kontrola dešava u okviru obilaska opreme i provere ispravnosti njenog funkcionisanja.

### g.3. Kontrolabilnost postupka

Kao što je navedeno u tački 10.8. kontrolabilnost će biti posmatrana kao spoj *adaptabilnosti* tehnološkog procesa i stepena *automatizovanosti* koji odražava brzinu reakcije na spoljne uticaje

Skala G.3.1.

minimalna	mala	znacajna	velika	ogromna
0,25	0,55	0,75	0,90	1,00

i nezavisnost tehnološke podrške od veštine rukovaoca opreme. Tako i skala G.3.1. *kaznjava* krutost posmatrane metode dodeljujući vrlo visoke ocene prilagodljivim postupcima koji su prilagođeniji onom

okruženju koje stvarno prati izvođenje radova i ekstremne uslove a skala G.3.2. odražava sličan pristup ali u znatno oštrijoj formi

Skala G.3.2.

ne postoji	minimalna	značajna	velika	kompletna
0,00	0,40	0,75	0,90	1,00

obzirom da svaka metoda prirodno poseduje određenu adaptabilnost ali nije nužno da uopšte postoji automatizovani deo procesa obrade betona. I u jednom i u drugom slučaju se ocenom *vrlo velika* (0,95) može vrednovati metoda sa određenim imperfekcijama koje ne moraju uvek biti plod nemogućnosti realizacije maksimalnih efekata parametra već češće nedostatka obimnijih poslova kao podsticaja da se određeni nedostaci tehnologije otklone.



## 11. ODREĐIVANJE VREDNOSTI KRITERIJUMSKIH FUNKCIJA

### 11.1. METODE BETONIRANJA U ZIMSKIM USLOVIMA

Da bi analiza ovog problema dala adekvatno rešenje neophodno je na verodostojan način prikazati mnoge aspekte pojave karakterističnih vrednosti relevantnih atributa. Ovim poglavljem dat je kondenzovan prikaz takvog pristupa pa su iz obrazloženih i ilustrovanih celina lako izvučene relevantne vrednosti i primenjene za argumentovano rangiranje grupe varijantnih postupaka. Kao podloga za prikaz ovog modela i njegovo testiranje izdvojen je set od 7 metoda rada:

- I. Metoda primene aditiva ("hladni beton")
- II. Metoda "termosnog" održavanja toplote
- III. Metoda prethodnog elektro-zagrevanja betona
- IV. Metoda elektro-dubinskog zagrevanja betona
- V. Metoda zagrevanja infra-crvenim zračenjem
- VI. Metoda zagrevanja betona indukcijom
- VII. Metoda zagrevanja betona termo-oplatom

Kao što se iz liste metoda vidi vođeno je računa da se uporedna analiza bavi prevashodno izvornim oblicima metoda rada u zimskim uslovima a ostavljena je mogućnost njihovog daljeg kombinovanja i sagledavanja kvaliteta hibridnih metoda. Sam pristup je nametnut potrebom za obiljem relevantnih podataka koji se, u poznatoj literaturi, daju najčešće u kontekstu analize opisanih "klasičnih" postupaka. Ostali, izvedeni oblici metoda betoniranja, zbog gotovo neograničenih mogućnosti kombinovanja, se u literaturi pominju uglavnom kao ilustracija realizacije projekata uspešnih firmi i ne daju kvalitetnu podlogu za analizu ovde navedenih kriterija. Stoga kriteriji nemaju i preciznu procenu karakteristične vrednosti koja bi ušla u vektor pridružen metodi jer je kod svih takvih kriterija potrebno dati neke dopunske odrednice primene metode: temperaturne uslove, vrstu konstrukcije i slično.

Na kraju pojedinačnih obrazloženja date su numeričke ocene koje su usklađene sa skalama datim u okviru poglavlja 10.9.

### 11.1.1. METODE „HLADNOG„ BETONA

#### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

##### A.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Primena "hladnog" betona, spravljenog sa aditivima iz grupe akceleratora i antifrizna, nalazi mesta prevashodno kod elemenata sa malim modulom površine ali je polje primene ograničeno i nekim preporukama poznatih istraživača koji zabranjuju ovaj postupak pri izradi *armiranih* konstrukcija. U ovom radu su osporeni neki od argumenata takvih stavova ali se u praksi i dalje radi u skladu sa preporukama i tako će biti još vrlo dugo. Prevashodno stoga što nema adekvatnih (efikasnih a jeftinih) zamena za poznate materijale, kao i zbog čestog nemara prilikom ugrađivanja betona, primena "hladnih" betona ostaje uvek kao alternativna metoda u nedostatku efikasnijih ili se primenjuje u okviru izvedenih, hibridnih postupaka. Tako se betoni sa nehloridnim aditivima mogu primenjivati prilikom zalivanja montažnih veza nosača i to kao alternativa indukcijom postupku ili "vrućem termosu". Sa stanovišta opreme ne postoje nikakve prepreke za masovnu izradu betona ovom tehnikom: u pogledu procedure nema razlike u odnosu na izradu klasičnih betona. doziranje rastvora čvrstih aditiva je vrlo precizno, nema pratećih negativnih posledica dužeg držanja neupotrebljenog rastvora, montaža-demontaža opreme je brza itd.

( 1,00 )

##### A.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Relativno blagi klimatski uslovi na većini domaćih gradilišta utiču na retku primenu ove metode ali se može smatrati da ne postoje objektivne smetnje za njenu adekvatnu primenu u uslovima u kojima je ona ekonomična (to su prevashodno fundamenti i slični nosači čiji je  $M_p = 3-6$ ) ili nužna. Pritom se treba držati svih trenutno važećih preporuka iz *RILEM recommendations for concreting in cold weather*. Ukratko, kod izrade prednapregnutih nosača sa

pritisnutom armaturom sme se koristiti samo  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a u ostalim slučajevima  $\text{NaNO}_2$  ili  $\text{NaNO}_3$ . Klasično armiranim nosačima smetaju hloridni joni pa se takve vrste soli ( $\text{CaCl}_2$  ili kombinacija  $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}_2$ ) smeju primenjivati isključivo u funkciji akceleratora. U slučaju nosača koji su nekad izloženi dejstvu naizmenečne struje (stubovi dalekovoda) svi pomenuti aditivi nisu uopšte dopušteni.

( 1,00 )

### A.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Shodno prirodi metode promene ili modifikacije klasične opreme su minimalne a takode i ulaganja u edukaciju radne snage, čime se metoda svrstava u red onih za čije je osvajanje potrebno više "dobre volje" nego materijalnih sredstava. Ocena je:

( 0,35 )

## B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

### B.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Iz svega rečenog jasno proizilazi zaključak da ne postoje tehnička ni tehnološka ograničenja u pogledu primene "hladnih betona" za sve tipove nosača. Pomenuta ograničenja u oblasti prednapregnutih nosača mogu se zanemariti tako da zbog neophodne razlike u odnosu na ostale metode usvojamo ocenu po kriterijumu:

( 1,00 )

### B.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Metoda se vrlo efikasno primenjuje i u vrlo surovim ambijentalnim uslovima - do  $-25^{\circ}\text{C}$  prosečne temperature vazduha. Pritom oprema sa lakoćom prelazi iz jednog režima rada u drugi.

( 0,10 )

### B.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

Koncepcija tehnološkog postupka ne dozvoljava uticaj primenjene opreme na praktični učinak planiran za posebne uslove rada.

( 0,00 )

## C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

C.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće  $\beta_{krit}$ 

Relevantne vrednosti ovog kriterija se moraju tražiti kao funkcija primene konkretnog aditiva u datim ambijentalnim uslovima pa u tu svrhu može poslužiti i sledeća tabela Mironova (106):

Tabela 11.1

vrsta aditiva u mešavini	$t_{b, sr}$ (°C)	relativna čvrstoća betona starosti			
		7 dana	14 dana	28 dana	90 dana
NaCl	- 5	35	55	80	100
	- 10	25	35	45	70
	- 15	15	25	35	50
NaNO <sub>2</sub> *)	- 5	30	50	70	90
	- 10	20	35	55	70
	- 15	10	25	35	50
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	- 5	50	60	75	100
	- 10	30	50	70	90
	- 15	25	40	60	80
	- 20	20	30	50	75
	- 25	15	25	40	65

\*) Napomena: Iste efekte daju i mešavine akceleratora kao što su:

a.- 70% NaCl + 30% CaCl<sub>2</sub> ,ili

b.- 60% NaCl + 40% CaCl<sub>2</sub>

Iako su vrednosti date orijentaciono (zaokruženo na 5<sup>0</sup>C) pokazuju efikasnost pojedinih poznatih aditiva i, za neku projektovanu osetljivost matematičkog modela, daju mogućnost za dovoljno dobru ocenu vrednosti kriterija. Savremene preporuke (57) insistiraju na uslovu da beton sa NaNO<sub>2</sub> ne sme, u trenutku dostizanja  $t_{b, sr}$  imati čvrstoću manju od 20%  $R_{28}$  a za potašu je taj uslov upola blaži (10%  $R_{28}$ ). Među ovde pomenutim aditivima treba dati prednost natrijum-nitritu (posebno pri izradi mešavina aditiva) obzirom da svojim prisustvom supstituiše hloridne soli i neutrališe agresivno dejstvo slobodnih jona na armaturu. Ukoliko se, iz bilo kojih razloga, prisustvo kalcijum-hlorida sme tolerisati od posebne su važnosti podaci Mironov-a (41) o uticaju količine aditiva na rast



Tabela 11.2

starost betona u danima	količina dodatka u odnosu na masu cementa			
	0 %	1 %	2 %	3 %
1	15	20	23	27
2	27	40	45	50
3	40	50	55	60
5	55	65	70	80
7	70	77	85	90
14	85	95	100	105
28	100	110	115	-

Napomena: Za spravljanje betona je primenjen portland cement PC40

čvrstoće na pritisak (dat u odnosu na 100%  $R_{28}$ ). Kao što prethodna tabela pokazuje "ležeći" beton (nearmirani) nakuplja 40% računске čvrstoće za 2 dana (1-2% CaCl). Za vrednovanje ove metode usvajamo betonsku mešavinu sa potašom ( $K_2CO_3$ ) pri  $t_{b,sr} = 5^{\circ}C$  pa je vrednost metode po ovom kriteriju:

( 0,00 )

### C.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće $\beta_{28}$

Kao što se iz prethodne tabele vidi računsku čvrstoću je moguće realizovati isključivo dugotrajnim odležavanjem ugrađenog betona što "maturity" koncept adekvatno objašnjava. Kada su neophodne visoke rane čvrstoće betona jasno je da treba izbegavati "hladne" betone, ali u slučaju masivnih betonskih blokova (hidrotehnički i slični objekti) kod kojih, zbog sporog ritma rada, dolazi do postepenog prijema eksploatacionog opterećenja gradijent rasta čvrstoće na pritisak nije bitan. Pritom treba voditi računa da je u pogledu ubrzavanja vezivanja redosled akceleratora po efikasnosti sledeći:  $CaCl_2$ ,  $NaCl_2$ ,  $Na_2SO_4$ , KCl,  $Ca(NO_3)_2$

( 2,00 )

### C.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

Besser konstatuje da se kod uzoraka betona spravljenih sa  $NaNO_2$ , i negovanih na temperaturi od  $-10^{\circ}C$  javlja pad računске čvrstoće  $R_{28}$  od čitavih 15%. Pored ovog on napominje da se betonima sa nitritom

natrija javljaju prsline ukoliko se  $\text{NaNO}_2$  primeni u količini od 10% u odnosu na masu cementa. Ukoliko se kombinuje sa aditivima na bazi organskih jedinjenja natrijuma nitrit daje zadovoljavajuću otpornost na dejstvo mraza čak i kod betonskih uzoraka koji su prvih nekoliko dana bili negovani na temperaturama od  $-20^{\circ}\text{C}$ . Iz ovoga se mogu sagledati potrebne preventivne mere za zaštitu od pada čvrstoće a preporučuju se i postupci "termosnog" održavanja "hladnih" betona. Za usvojenu vrstu aditiva je ocena:

( 0,00 )

#### D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

##### D.1. Ukupni utrošak radne snage

Ne ulazeći u detaljnu razradu angažovanja radne snage na izradi nosača od betona spravljenog sa propisanom dozom akceleratora treba naglasiti da su ocenim obuhvaćeni svi nezaobilazni radovi na ugrađivanju mase i manipulaciji oplatom pa je tražena vrednost:

( 3,90 )

##### D.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Može se sa sigurnošću reći da je, kod svih obučenih operatera u fabrikama betona, prelazak na rad sa "hladnim" betonom neosetan a takav je i kod obučenih betoniraca na mestu ugrađivanja pa se kao precizna usvaja ocena:

( 0,00 )

##### D.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Iako se savremenim tehnološkim postupcima dobijaju sredstva sa minimalnom opasnošću po zdravlje radnika uočeno je da se pri primeni nekih aditiva javljaju prateći efekti. To se odnosi prevashodno na primenu rastvora jakih koncentrata gde dolazi do pojava crvenila na koži i osećaja peckanja. Adekvatne, ne tako skupe mere HTZ-a eliminišu ove efekte primene aditiva

( 0,35 )

**E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE****E.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona**

U toku primene metode ima troškova i za ovu vrstu zagrevanja jer je neophodno održati komponente mešavine na temperaturi od bar  $0^{\circ}\text{C}$  što prema tabeli 11.9 za temperaturu vazduha od  $-20^{\circ}\text{C}$  podrazumeva utrošak energije od oko  $13 \text{ kWh/m}^3$  pa je i ocena:

( 13,00 )

**E.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona**

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja.

( 0,00 )

**E.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona**

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja.

( 0,00 )

**F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA****F.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator**

Specifični uslovi za ostvarenje ranih čvrstoća betona nameću potrebu za dodatnim količinama cementa koji bi se u prvih 24 sati sazrevanja javio kao izvor dopunske, egzotermalne toplote i postao katalizator procesa hidratacije. Kao karakterističnu vrednost možemo uzeti podatke koje je objavio *Topčij* 1977.god (109) čime se ostvaruje isti nivo tačnosti za niz analiziranih metoda a pokazuju da je utrošak dodatnog cementa zanemarljivo mali.

( 0,50 )

**F.2. Troškovi za aditive specijalne namene**

Odavno je poznato da optimalna količina aditiva koja i obezbeđuje najintezivnije sazrevanje betona ne zavisi toliko od ambijentalnih uslova očvršćavanja već od W/C odnosa i sastava cementa koji, preko kompozicije odnosa mineraloških činilaca, utiče na dinamiku razvoja hidratacione toplote pa time i na brzinu hlađenja. Iako se

cene aditiva menjaju, kao i dozaža, neophodno je naći vrednosti (troškove) koje se mogu smatrati relevantnim za odlučivanje. Autor kao referentan rad preporučuje tekst *Besser-a* (87) a za neku precizniju tehno-ekonomsku analizu je neophodan konkretan projekat betona. Prema analizi i skali ocena usvojeno je:

( 1,00 )

### F.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

Čak i "hladan" beton podrazumeva adekvatno smanjenje koeficijenta termo-propustljivosti oplata a minimalna ulaganja doprinose oceni:

( 0,50 )

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

### G.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Može se smatrati da nisu potrebne posebne mere zaštite ugrađenog betona u toku njegovog sazrevanja u ambijentalnim uslovima.

( 0,00 )

### G.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Jednom ugrađen, beton sa antifriznim dodacima i akceleratorima sazreva bez potrebe za bilo kakvim dopunskim aktivnostima. Merenje spoljne temperature vazduha služi za ocenu stepena realizacije "prolaznih" vrednosti čvrstoće na pritisak do trenutka skidanja oplata i smatra se delom uobičajenih aktivnosti.

( 0,00 )

### G.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Komentar uz prethodni kriterij govori o minimalnim mogućnostima da se u toku građenja regulišu ritam rada i parcijalni rokovi radova ali se sam postupak izrade mešavine mora smatrati u potpunosti kontrolabilnim obzirom da je u celini automatizovan. Sumarno dejstvo ovih odlika postupka daje opravdanje za usvajanje sledećeg para karakterističnih vrednosti (0,00 + 1,00):

( 1,00 )



### 11.1.2. „TERMOS,, METODA

#### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

##### A.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Postojeća literatura potvrđuje stav da je "termos" metoda prestala biti predmetom istraživanja obzirom da su svi mehanizmi sazrevanja betona i procedura njihovog proračuna u numeričkom smislu vrlo pojednostavljeni a postupak za pripremu i izradu kvalitetne oplata je postao deo svakodnevne prakse.

( 1,00 )

##### A.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Može se smatrati da su principi i praktična primena ove metode u potpunosti osvojeni od strane domaćih građevinskih organizacija. Starost metode i jednostavnost postupka garantuju pouzdanu primenu i savremenih termo-izolacionih materijala tako ne postoji nijedan "inženjerski" razlog za izbegavanje metode - tamo gde je efikasna.

( 1,00 )

##### A.3. Stepeni materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Jedina tehnički opravdana ulaganja odnose se na nabavku i primenu kvalitetne i trajne termo-izolacije sposobne da izdrži veliki broj proizvodnih ciklusa ali je to deo kalkulativnih troškova projekta tako da primeni metode prethodi samo nabavka kompleta termometara za kompleksno praćenje stanja ugrađenog betona.

( 0,00 )

#### B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

##### B.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Polazeći od želje da procentualno izrazimo učešće svih tipova nosača (za koje je "termos" racionalna metoda) u odnosu na ukupan broj izvedenih nosača moramo se složiti sa generalnom podelom po kojoj se ova metoda *prevashodno* primenjuje za konstrukcije sa

malim modulom poprečnog preseka. Prema skali ocena:

( 0,90 )

### B.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Brojni podaci o ovoj metodi pokazuju njenu značajnu osetljivost na temperaturama nižim od  $-20^{\circ}\text{C}$ . Praktično samo nosači sa  $M_p \approx 8$  mogu na temperaturama nižim od navedene ostvariti očekivane efekte i to ukoliko imaju odlično termoizolovanu oplatu ( $1,3 \text{ W/m}^2\text{C}$ ).

( 0,85 )

### B.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

U kvantitativnom smislu primena "termos" oplate ne donosi poremećaje usvojene dinamike rada. Predviđene količine betona se ugrađuju onom brzinom kojom dospevaju do već pripremljene oplate.

( 0,15 )

## C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

### C.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće $\beta_{\text{krit}}$

Polazeći od zahteva da se u ovoj metodi realizacija čvrstoće od 70%  $R_{28}$  može smatrati relevantnim parametrom ocene usvajaju se sledeće polazne veličine: beton je spravljen od portland cementa (PC 40), početna temperatura betona je  $t_{b,p} = 25^{\circ}\text{C}$  ili  $t_{b,p} = 50^{\circ}\text{C}$ , krajnja temperatura betona  $t_{b,k} = 5^{\circ}\text{C}$ . Uz ove uslove moguće je koristiti tabele Mironov-a (106) gde se za različite ambijentalne

$$M_p = 4 \quad t_{b,p} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tabela 11.3

MB	količina cementa	ambijentalna temperatura $t_v$				
		0	-10	-20	-30	-40
20	226	152	139	130	126	123
	400	132	110	100	96	94
30	300	138	125	117	114	113
	500	117	98	91	88	87

temperature daju trajanja (u satima) režima očvršćavanja a odnose se na manje ( $M_p = 4$ ) i više ( $M_p = 10$ ) razudene nosače (videti Tabele 11.3 i 11.4). U slučaju značajnijeg povećanja početne temperature betona mogu se dobiti znatno brži režimi očvršćavanja.

$$M_p = 4 \quad t_{b,p} = 50^{\circ}\text{C}$$

Tabela 11.4

MB	količina cementa	ambijentalna temperatura $t_a$				
		0	-10	-20	-30	-40
20	226	100	80	73	71	71
	400	84	67	63	62	56
30	300	90	73	67	65	61
	500	82	63	58	55	52

Kod razudnijih oblika poprečnog preseka merodavne su vrednosti:

$$M_p = 10 \quad t_{b,p} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tabela 11.5

MB	količina cementa	ambijentalna temperatura $t_a$				
		0	-10	-20	-30	-40
20	226	136	125	119	117	84
	400	110	100	95	93	91
30	300	128	113	109	107	104
	500	106	94	85	84	83

Karakteristična vrednost se usvaja za konkretan tip konstrukcije.

U okviru analize ovog aspekta metode "vrućeg termos" (videti tačku 11.1.9.) dat je dobar pristup procesima koji se u okviru ove metode razvijaju jer, polazeći od dimenzija manje strane nosača, uslova očvršćavanja (datih preciznije nego ovde jer ambijentalne prilike prikazuje kroz brzinu vetra i temperaturu vazduha) i zahtevane čvrstoće betona ( $\% R_{28}$ ) propisuje početnu temperaturu betona poznatog sastava (količine zamešanog cementa). Kako je

$$M_p = 10 \quad t_{b,p} = 50^{\circ}\text{C}$$

Tabela 11.6

MB	količina cementa	ambijentalna temperatura $t_a$				
		0	-10	-20	-30	-40
20	226	84	74	64	60	59
	400	71	58	52	50	49
30	300	77	64	58	56	55
	500	62	52	46	45	44

jedan od ciljeva analize kriterija i propisivanje neophodnih mera i postupaka za optimalan razvoj mehaničkih karakteristika betona to izloženi pristup ima i veliku praktičnu vrednost. Za početno vrednovanje je usvojen podatak o vremenu (73 h) koje betonskom bloku ( $M_p = 4$ , sa  $t_{b,p} = 50^{\circ}\text{C}$ , pri  $t_a = -10^{\circ}\text{C}$ ) treba za neophodno očvršćavanje. Odgovarajuća ocena metode je:

( 0,50 )

### C.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće $\beta_{28}$

Nema mogućnosti za jednoznačno određivanje relevantne vrednosti obzirom da se pored temperature vazduha mora definisati i brzina vetra, a naročito karakteristike oplata, vrsta i dozaža cementa... ali se (u skladu sa rasponom ocena u skali) može usvojiti da svoju računsku čvrstoću beton dostiže u roku od 4 nedelje, pa je prema skali ocena:

( 1,00 )

### C.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

Može se smatrati da pod kontrolisanim uslovima rada i režima sazrevanja nema značajnijih padova čvrstoće betona. Ovo je posledica i činjenice da, u suštini, i nije rec o "ubrzanom" očvršćavanju već o nekom veštačkom dovodenju proizvodnog sistema beton-oplata-sredina u odnos koji će minimizirati uticaj "posebnih uslova" izvođenja radova.

( 0,00 )



**D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE****D.1. Ukupni utrošak radne snage**

Za utopljavanje standardne oplata, kako bi mogla dobiti atribut termos-oplate, neophodno je (za nosač sa  $M_p = 3,5$ ) oko 0,55 NČ što sa 2,45 NČ na montaži delova klasične oplata i 0,25 NČ neophodnih za njenu demontažu predstavlja najznačajnije utroške ljudskog rada koji opredeljuje (109) karakterističnu vrednost atributa na:

( 3,65 )

**D.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage**

Postupak izrade oplata željenog sastava i kvaliteta je deo redovne obuke kvalifikovanih radnika (tesara) pa se za neku minimalnu dopunsku obuku može usvojiti ocena:

( 0,20 )

**D.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika**

Nema potrebe da se prilikom primene "termos" metode strahuje za zdravlje radnika. Ono je ugroženo u istoj meri kao kod postupaka u normalnim temperaturnim uslovima i štiti se na isti način pa je za takvu, zanemarljivu opasnost pri radu ocena:

( 0,00 )

**E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE****E.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona**

"Termos" metoda polazi od principa konzervacije toplotnog stanja sveže ugrađene betonske mase pa je, u skladu sa očekivanim temperaturnim uslovima sredine, neophodno izvršiti adekvatno zagrevanje betonske mešavine. Prema *Mironov*-u takva minimalna (preporučena) temperatura betona u trenutku ugrađivanja je data Tabelom 11.7 pri čemu se kao neophodan uslov navodi obavezno dopunsko utopljavanje uglova oplata kod kojih je gradijent pada temperature (zbog graničnih uslova) znatno veći. Precizan proračun toplotnog bilansa moguće je izvršiti samo za konkretan projekat

Tabela 11.7

$t_a$	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
$t_{b,p}$	8	10	12	14	16	18	20	23	25

betona i očekivane temperature svih ingredijenata u vreme pripreme mešavine. Za potrebe rangiranja metoda koje svoje brojne prednosti iskazuju na različitim tipovima nosača potrebno je usvojiti nosač koji će biti *reprezent* nosača za koje je metoda preporučljiva, kao i sklop uslova (ambijentalnih, tehnoloških) u kojima dolazi do tog utroška energije. U te svrhe je iskorišćena Tabela 11.9 iz koje se za uslov  $\Delta t = 16 - (-20) = 36$  °C interpolacijom dobija utrošak od 22,2 KWh/m<sup>3</sup>. Ovaj utrošak se može smatrati ekvivalentom utrošku energije kojom se zagrevaju komponente mešavine a ne zavisi od tipa nosača u koji se beton ugrađuje, pa je merodavna vrednost:

( 22,20 )

### E.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja.

( 0,00 )

### E.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja.

( 0,00 )

## F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

### F.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

Obzirom da se beton prepušta sazrevanju pod kompleksnim dejstvom unete (vlastite) toplote i egzotermalne toplote ugrađenog cementa jasno je da se, u tehnološkom smislu, *mora* intervenisati većom količinom cementa koja realno smanjuje vodo-cementni faktor ali pospešuje reakciju i stvaranje vezivnog materijala podizanjem radne temperature mladog betona.

( 1,00 )

### F.2. Troškovi za aditive specijalne namene

U principu svaka mešavina sadrži određenu količinu aditiva, ali se mešavine betona (za negu "termos" postupkom) često spravlja sa 2% neke akceleratorne supstance koja daje primarnu čvrstoću i olakšava prijem napona zatezanja u fazi hlađenja betona. Neki od domaćih izvora (32) daju uporednu analizu troškova za "termos" metodu sa dodacima (do 2%) i klasičnu "termos" metodu. Podaci pokazuju da aditivi toj hibridnoj metodi donose povećanje materijalnih troškova od 20-25%. Obzirom na usvojeni koncept analize i vrednovanja metoda usvaja se ocena:

( 0,00 )

### F.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

Polazeći od potrebe da se klasičnoj oplati mora obezbediti deblji ili kvalitetniji sloj termo-izolacije i ulaganja na ovom području direktno utiču na dužinu tehnološkog ciklusa (a time i na ritam obrta oplata) ali i na dobijeni kvalitet betona obzirom na potrebu za uspostavljanjem uniformnog (t.j. kvazi-uniformnog) toplotnog polja unutar bloka ugrađenog betona. Vrednost vanrednih troškova na utopljanju bloka ( $M_p = 2$ ) je zanemarljivo mala:

( 0,50 )

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

### G.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Može se smatrati da nisu potrebne posebne mere zaštite ugrađenog betona u toku njegovog sazrevanja u radnim ambijentalnim uslovima. Za razliku od ostalih metoda u ovoj je postojanje kvalitetno termo izolovane oplata preduslov rada.

( 0,00 )

### G.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Beton ugrađen u "termos" oplatu sazreva bez mogućnosti da se utiče na njegov kvalitet ali se merenjem spoljne temperature vazduha, kao parametra uslova očvršćavanja, dobija mogućnost za dovoljno

tačnu procenu zrelosti betona ("maturity" funkcija). Kako je ocena stepena realizacije kritične čvrstoće izuzetno važna jasno je da je permanentna kontrola nakon ugrađivanja nužna ali i početna temperatura betona zavisi od redukcije neizbežnih gubitaka toplote prilikom transporta i ugrađivanja sveže betonske mase.

( 0,15 )

### G.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Korektno sproveden tehnološki postupak ostavlja male mogućnosti za grubu grešku. Ono što ovu metodu čini nepopularnom je opasnost da se, usled neplaniranog pada spoljne temperature, mora odstupiti od projektovane dinamike radova. Eventualne brze intervencije u smislu smanjenja koeficijenta termo-propustljivosti oplata su vrlo nepraktične i skupe obzirom da su iznudene pa time i neplanirane u listi kalkulativnih troškova. Koristeći usvojeni princip o sumarnoj oceni usvajaju se vrednosti (0,90 + 0,00) t.j.

( 0,90 )

## 11.1.3. METODA ELEKTROTERMIJSKOG ZAGREVANJA

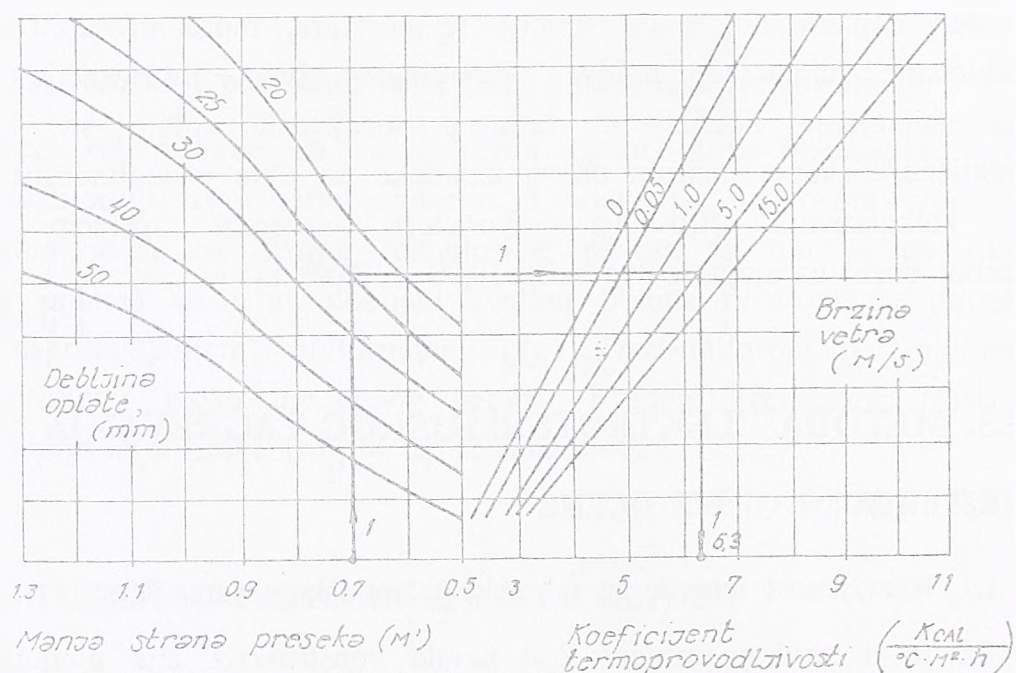
### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

#### A.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Metoda je u širokoj primeni kod izrade konstrukcija čije elemente odlikuje moduo površine  $M_p = 3 \text{ --} 15$ . Obzirom da se u tom širokom intervalu nalazi velika većina nosača u visokogradnji jasno je da se na razvoju ove metode dugo i intenzivno radi(10). Popularnost metode nije u srazmeri sa stepenom razvijenosti pa iako metoda spada u red (među stručnjacima) široko prihvaćenih njena je primena relativno retka. Primena različitih režima zagrevanja ne dopusta konzistentan stav o tehno-ekonomskim efektima zagrevanja mase pre ugrađivanja obzirom da se i malim izmenama režima drastično debalansira uočeni odnos troškova i stvarne koristi. Hidratacijom stvorena elastična opna oko cementnog gela javlja se



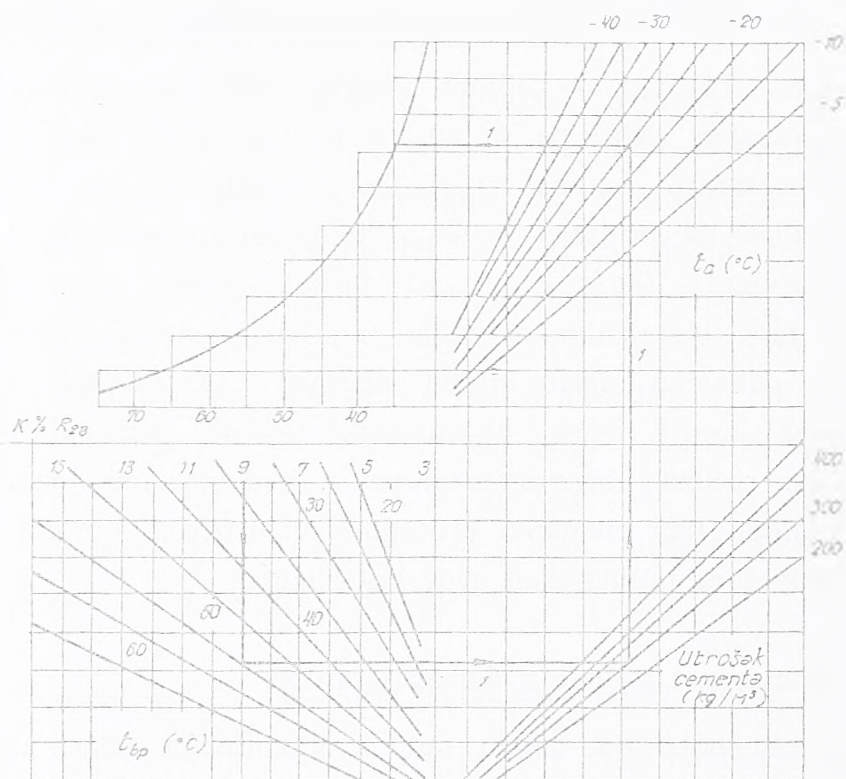
kao usporivač prodora vlage u dublje slojeve aktiviranog zrna vezivnog materijala pa narasta problem uravnoteženja brzine hidratacije i zahteva za što većim brojem obrta angažovane oplate. Naime, ukoliko se rapidnim zagrevanjem mase stvore uslovi za rano ubrzavanje hidratacije, kao posledicu toga imamo i rano dostizanje relativno visokog stepena čvrstoće, ali i "vrlo" dug period do ostvarenja neophodnog nivoa kritične čvrstoće, neophodne za vadenje elementa iz kalupa - oplate, a sličan pristup stoji i iza podatka da se u 80% pogona za prefabrikaciju u ZND-a kalupi koriste samo jednom (?) u 24 sata.



slika 11.1 - Nomogram za određivanje koeficijenta toplotne provodljivosti drvene oplate (104)

Prisutni problem lažnog vezivanja u velikoj meri rešava pauza od 15-20 minuta, gde se nakon izrade mešavine odlaže početak zagrevanja i masa povremeno meša kako bi se omogućilo što dublje prodiranje vlage i olakšala potpuna hidratacija cementne paste. Metode iz ove grupe metoda se razvijaju u pravcu smanjenja utroška energije po jedinici proizvoda i u pravcu skraćanja roka obrta oplatnih formi. Dosadašnji rezultati pokazuju da se u prvom krije rezerva od oko 30% odnosno u drugom oko 50% odgovarajućeg stepena

uštete. Jedna od prepreka na putu skraćenja radnog ciklusa metoda sa intenzivnim zagrevanjem betonske mase je vrlo veliki toplotni kapacitet metalne oplata koja, zagrejana do temperatura od 70-90°C ostaje topla i nakon rašalovanja pa bi dejstvo te toplote u vreme ugrađivanja nove sveže mase moglo dati efekte naglog vezivanja.



slika 11.2 - Nomogram za određivanje oblasti i uslova primene metode (104)

Savremeni postupci zato teže kombinovanju postupka prethodnog zagrevanja mase i kratkog elektro-zagrevanja nakon ugrađivanja betona u oplatu. Ovo zagrevanje ima karakter impulsnog toplotnog "udara" ili kratkotrajnog, izotermnog zagrevanja. Takve hibridne metode jedine i mogu da otvore put racionalizaciji tehnoloških postupaka. One su višestruko (2-3 puta) efikasnije od klasičnih tretmana betona zasićenom vrelom parom ali (zbog inertnosti sredstava za zagrevanje) zahtevaju znatno više energije od sličnih "čistih" postupaka - indukcijskog i infra crvenog zračenja. Jasno je da se izbor metode rada vrši za prevladavajući moduo površine poprečnog preseka klase nosača pa je neophodno za poznatu širinu

nosača (kod objekata visokogradnje ta dimenzija se obično izvodi iz zahteva za modularnom koordinacijom) dati generalne odrednice tehnološkog postupka. U tom smislu dragocena je pomoć i para nomograma (sl. 11.1, 11.2) koje su *Sizov*, *Vegener* i *Mihajličenko* dali još 1975. godine. Oni su koeficijent toplotne provodljivosti ( $k$ ) posmatrali u svetlu uticaja manje dimenzije preseka nosača ( $a$ ) i udara vetra. Za zadatu debljinu oplata dobijamo koeficijent ( $k$ ) a time i parametar ( $k/a$ ) pa se iz nomograma (11.1) lako propisuje početna temperatura betona ( $t_{bp}$ ). Neophodno je za zahtevanu kritičnu čvrstoću na pritisak ( $\% R_{28}$ ), temperaturu vazduha  $t_a$  ( $^{\circ}C$ ) i utrošak cementa ( $kg/m^3$ ) pronaći presek pravih i očitati  $t_{bp}$  ( $^{\circ}C$ ). Iako nisu eksplicitno navedeni u nomograme su ugrađene i promene u odlikama oplata usled migracije vlage pod dejstvom toplog betona kao i razvoj hidratacione toplote portland cementa pod dejstvom režima ubrzanog zagrevanja i dugotrajnog izotermnog hlađenja. Metoda ima elemente procedure industrijske obrade betona pa je ocena metode prema skali ovog kriterijuma:

( 0,80 )

### A.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Obzirom da su neke od velikih radnih organizacija imale ugovorne obaveze u SSSR-u koje su iziskivale velike količine sveže betonske mase, istraživači na čelu sa dr. S. Otovićem (IMS) su razvili opremu za zagrevanje betonske mase velike efektivne moći što je omogućilo i uspešan završetak posla i prikupljanje iskustva iz praktične primene tehnologije. Metode ove familije su proučavane vrlo studiozno pa se može dati generalna ocena:

( 0,50 )

### A.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Metoda se u ZND-a primenjuje gotovo u svim oblastima gde se javlja potreba za betoniranjem u zimskim uslovima. Nažalost, prepreka njenoj ekspanziji je vrlo visok stepen ulaganja u specijalnu opremu za zagrevanje što je samo pozadina izuzetno neravnomernog angažovanja elektro-uredaja velike snage čije uključivanje, kod



napojnih mreža slabije propusne moći, može podrazumevati rad u trećoj smeni kada su ostali potrošači isključeni.

( 0,90 )

## B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

### B.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Koliko je poznato ne postoje nikakva ograničenja tehnološke prirode kojima bi primena bila svedena samo na određene tipove nosača. Optimalni uslovi se dobijaju za konstrukcijske elemente čiji je moduo površine manji od 10. Nešto slabiji rezultati kod razuđenijih preseka ne utiču na visok stepen primenljivosti samog postupka. Metoda ima najveću perspektivu razvoja kod pogonske proizvodnje nosača zato što se, u radu na samom objektu, javlja problem efikasnog ostvarivanja režima dopunskog zagrevanja ugrađenog betona. Pomenuti "čisti" postupci su pravi odgovor za linijske i pločaste nosače ali se kod "blok" nosača lakše radi uz "termosno" negovanje betona u oplati.

( 1,00 )

### B.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

U najvećoj meri metoda zadovoljava potrebe rada na temperaturama i do  $-20^{\circ}\text{C}$  ali se na nižim temperaturama smatraju obaveznim primene drugih postupaka za zaštitu betona i konzervaciju toplote kojom raspolaže ugrađeni beton. Oblast rada u takvim klimatskim uslovima je relativno mala pa je i uticaj na ocenu neznatan:

( 0,70 )

### B.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

Oprema za ubrzano zagrevanje betona utiče na produktivnost samo ukoliko se ne usklade kapaciteti elektro uređaja i planirana brzina ugrađivanja. U suprotnom, obzirom da postoji mogućnost "neograničenog" povećanja broja kada za izradu toplog betona, nema opasnosti od zastoja u radu. Naravno, povoljnije je zagrevati beton van oplata jer se time dobija i na brzini i na količini (a moguće je i instalirati moćnije elektro-grejače) ali se termo-kade



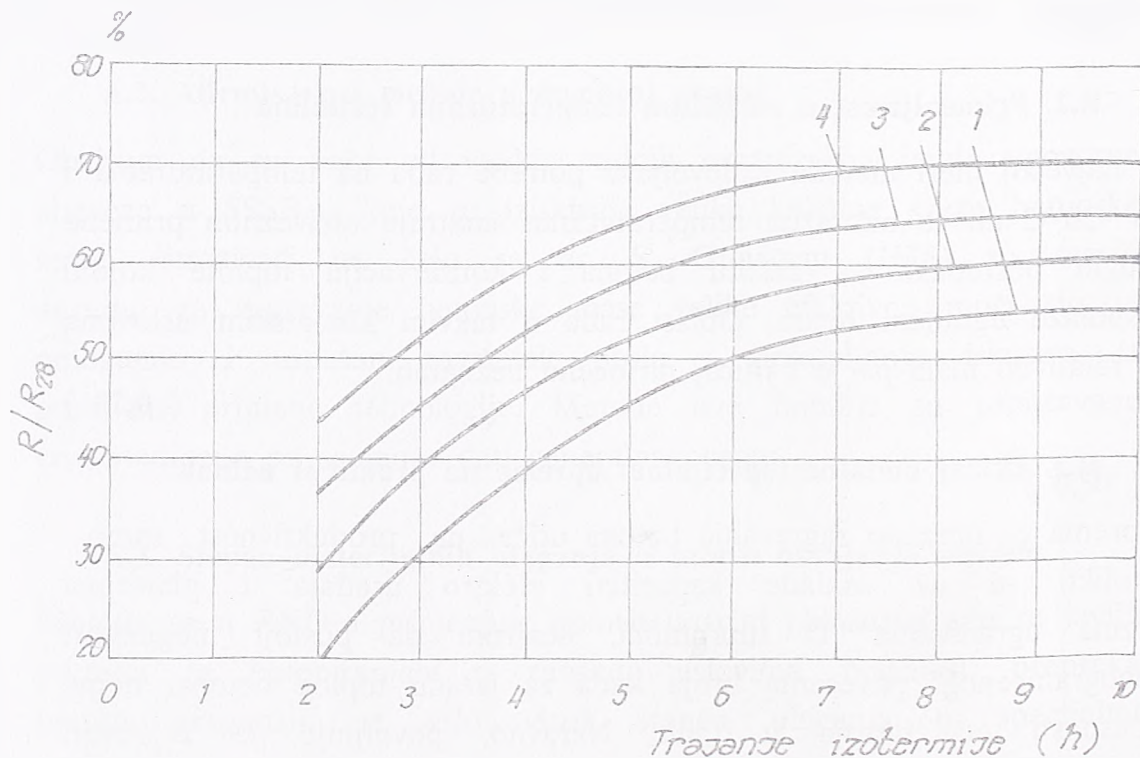
moraju maksimalno izolovati kako bi gubici toplote bili redukovani na razumnu meru. Poznato je (32) da se kod manjih praktičnih učinaka, do  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , primenjuje oprema (elektro-kade) za ciklično zagrevanje betona, a za veće učinke je neophodna primena uređaja za kontinualno zagrevanje. Obzirom da je oprema za ciklično zagrevanje daleko jednostavnija, a povećanjem broja baterija dobija se željeni učinak, to je u primeni daleko češće od ostalih varijanti. Obzirom da se učinak zadat dnevnim planom ostvaruje uz dodatne tehnološke mere ovoj metodi odgovara ocena:

( 0,50 )

### C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

#### C.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće $\beta_{\text{krit}}$

Do danas izvršena eksperimentalna istraživanja govore da kod ove metode nema uzročno-posledične veze između trenutka početka zagrevanja mešavine i konačne čvrstoće na pritisak. *Mihanovskij*



slika 11.3 - Dijagram brzine narastanja čvrstoće betona od PC pri izotermnoj obradi na  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (106)

tvrdi da start zagrevanja može biti, bez posledica, odložen i 60 minuta pa zato sugerije da mešavine sa nižim W/C faktorom "sačekaju" 15-20 minuta. Poznato je da beton, kao termički vrlo inertan materijal zahteva relativno dug period (15-20 min) za ravnomerno zagrevanje tretirane mase. Zato je najefikasniji brzi režim zagrevanja od oko  $100^{\circ}\text{C/h}$  dok se za pločaste betonske oblike primenjuju i nešto sporiji režimi ( $70-100^{\circ}\text{C/h}$ ). Pod uslovom da se postigne adekvatna brzina podizanja temperature, njeno dovoljno dugo izotermno održavanje i lagano hlađenje mogu se očekivati izvanredni rezultati. To pokazuje i dijagram (sl.11.3) kojim je *Mironov* obuhvatio ponašanje betona (na početku zagrevanja starog par sati) koji je izložen višerasovnoj izotermiji na temperaturi od  $80^{\circ}\text{C}$ . Očito je da betonu MB 30 do dostizanja kritične čvrstoće od 40%  $R_{28}$  treba samo 3 sata izoternog tretmana (ukupno ciklus traje oko 12 sati, odnosno 0,5 dana, uključujući i hlađenje) što omogućava brz obrt oplata i proizvodnju 2 nosača dnevno. Podatak možemo usvojiti za vrednovanje metode a Tabela 11.8 pokazuje neke

Tabela 11.8

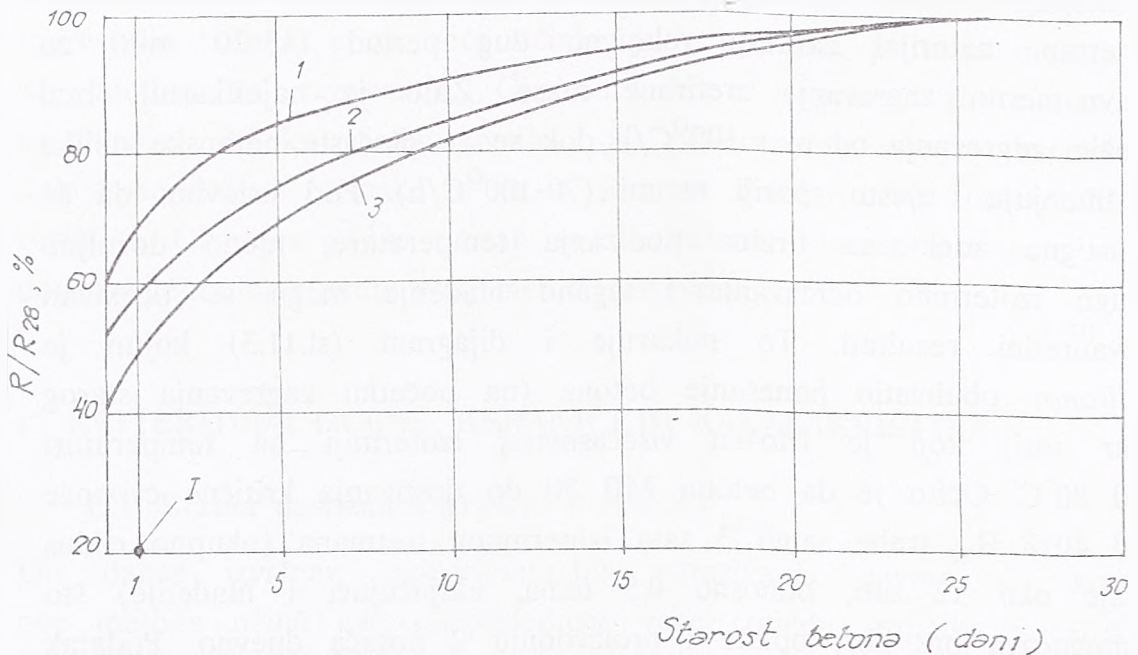
temperatura		vreme realizacije čvrstoće betona od					
$t_b$	$t_{izot.}$	50% $R_{28}$			70% $R_{28}$		
		300	400	500	300	400	500
40	60	15,0	10,5	9,0	24,0	11,0	10,0
50	60	11,5	8,5	7,5	18,0	9,5	8,5
60	60	7,0	6,5	6,0	13,0	8,0	7,0
70	70	6,5	5,5	5,0	11,0	6,5	6,0
80	80	5,5	4,5	4,0	9,0	5,5	4,5

značajnije podatke koji se odnose na brzinu dostizanja kritične čvrstoće (50%  $R_{28}$ ) i čvrstoće neophodne za manipulaciju i prijem osnovnih radnih opterećenja (70%  $R$  ).

( 0,85 )

### C.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće $R_{28}$

Jasno je da je brzina sazrevanja materijala funkcija režima toplotne obrade a rezultati *Besser*-ovih istraživanja govore da se



slika 11.4 - Dijagram rasta čvrstoće betona  
zagrevanih 5 sati na temperaturi 85°C

nakon 28 dana ostvaruju čvrstoće nekad znatno veće od  $R_{28}$  (čak 28-48% veće od  $R_{28}$ ) ali funkcija čvrstoće na pritisak može nekad imati i padove usled zakasnelih manifestacija efekata ubrzane hidratacije. Dijagram *Mihanovsk-og* (sl. 11.4) daje osnove da se za ocenu usvoji samo:

( 1,00 )

### C.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

Usled nepravilnog izbora režima obrade sveže betonske mase (ili poremećaja u radu) može doći do pada  $R_{28}$ . Tako se kod smesa (čije je sleganje konusa 6-7 cm) sporije zagrevanje (30-50°C/h) odražava u vidu gubitka čak 30%  $R_{28}$ . Ovo je usled razaranja grupe primarnih kristala vezivnog materijala pod dejstvom termičkih napreznja rano vezanog materijala pa se preferiraju postupci većih brzina

kod kojih se do  $100^{\circ}\text{C}$  stiže najduže za 1,5-2 sata. Međutim, i tada se javlja pad čvrstoće od 2-4%. Gubitaka ove vrste nema pri brzinama zagrevanja od  $100 - 150^{\circ}\text{C/h}$ , ili su oni srazmerno mali (prema (32) na čvrstoći posle 28 dana se zapaža neznatan pad od 4 - 6%) i mogu se lako kompenzirati malim periodom izotermije kojim se vrši kompenzacija toplotnih gubitaka nastalih usled sporog zagrevanja jezgra krupnijeg agregata, kao i povećanom kontrolom proizvodnje svežeg betona i faze ugrađivanja zagrejene mase čime se dobijena čvrstoća "zadržava" u oblasti dozvoljenih standardnih odstupanja.

( 0,50 )

#### D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

##### D.1. Ukupni utrošak radne snage

Ukoliko se beton zagreva u sudovima ("kadama") potrebno je  $0,6 \text{ NČ}$  za montažu elektro-opreme, odnosno  $1,2 \text{ NČ}$  za njenu demontažu. Sam radni takt traje oko 20 minuta (ne duže od 25 min) pri čemu na zagrevanje otpada 10 minuta. U toku tog vremena se betonu podiže temperatura do najviše  $70^{\circ}\text{C}$  (optimalno je  $50^{\circ}\text{C}$ ). Nakon ugrađivanja ovakvog betona, i njegovog regularnog hlađenja beton dobija 50-70% računске čvrstoće  $R_{28}$ . Kao parametar za ocenu metode može poslužiti utrošak rada na oplati i zagrevanju betona za element sa

Tabela 11.9

rast temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	10	20	30	40	50
utrošak rada (NČ)	0,39	0,49	0,59	0,67	0,76

modulom površine 2,5 pri čemu, kao orijentaciju treba uzeti utrošak rada na zagrevanju iste kade ( $V = 0,90 \text{ m}^3$ ) do različitih radnih temperatura koji je Besser (87) dao gore datom tabelom. Dobija se vrednost izražena u norma-satima merodavna za analizu:

( 3,85 )



### D.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Kako se u procesu zagrevanja angažuje električna energija velike snage a procesi hidratacije su ubrzani do gotovo maksimalnog stepena, jasno je da se oprema koja sve to kontroliše mora poveriti obučanim radnicima sposobnim da u svakom trenutku i na tehnološki najcelishodniji način reaguju na eventualne poremećaje u sistemu *oprema-beton*. Iskustvo pokazuje da te poslove moraju raditi - tehničari elektro struke uz pomoć (kontrolu) specijaliste za ovu vrstu tehnologije. Stoga je ocena:

( 1,00 )

### D.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Prisustvo visokog napona zahteva posebne mere opreza i zaštite rukovalaca nezavisno od nezaobilaznih mera izdvajanja postrojenja iz kompleksa ostalih postrojenja, ograđivanja itd. Odredene štetne posledice rada sa postrojenjem ne mogu se izbeći.

( 1,00 )

## E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

### E.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona

Kao i kod primene metode "hladnih" betona troškovi za ovu vrstu zagrevanja su nezaobilazni. Oni su prateći efekti primene resursa čija obradljivost ne sme nijednog trenutka dolaziti u pitanje. Taj uslov ( $t_a = -20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{bp} = 0^{\circ}\text{C}$ ) ovde "košta" prema tabeli 11.9 oko  $13 \text{ kWh/m}^3$  (izraženo kao ekvivalent).

( 13,00 )

### E.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona

Prema podacima *Mironov*-a za zagrevanje jednog kubnog metra betona se troši 40-70 kWh struje radnog napona od 380 V. Dosta preciznije podatke daje *Besser* (87) u tablici 11.10. Treba naglasiti da se značajne uštede energije postižu primenom adekvatnih super plastifikatora koji mogu maksimalnu temperaturu zagrevanja od  $80^{\circ}\text{C}$  da redukuju na samo  $60^{\circ}\text{C}$  a da se to ne odrazi na dužinu

tehnološkog ciklusa proizvodnje. Posebna pažnja tehnologa mora se posvetiti čistoći agregata obzirom da se već i zbog male količine glinovitih primesa (do 5%) elektro-otpor uvećava za čitavih 15% a

Tabela 11.10

$\Delta t_b$ (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
(kWh/m <sup>3</sup> )	7,1	10,0	13,0	15,9	18,9	21,9	24,9	27,9	30,9

samim tim i efikasnost postupka drastično pada. Ukoliko se usvoji da se do temperature od 60°C beton zagreje za 10 minuta može se ekstrapolacijom vrednosti Tabele 11.10 dobiti i utrošak energije za nosač M = 6 ukupno 6,15 kWh/m<sup>3</sup> pa je i ocena:

( 6,15 )

### E.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona

Ovde razmatrani slučaj elektro-termije je *izotermnog* karaktera pa je utrošak energije za izotermno održavanje betona na temperaturi od 60°C a u toku 3 sata obrade 1,3 kWh/m<sup>3</sup> (Tabela 11.12) t.j.

( 3,90 )

## F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

### F.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

Ako se oslonimo na podatke koji su dostupni a daju pregled iskustava istraživača iz ZND-a može se reći da u ovoj metodi povećanim doziranjem cementa može znatno biti skraćen postupak sazrevanja a time i omogućen brži obrt oplate. Podaci jasno pokazuju da beton (sleganje konusa 6-8 cm) pre ugrađivanja zagrejan do  $t_b = 40^\circ\text{C}$ , i u fazi izotermije držan na temperaturi od  $t_{\text{izot.}} = 60^\circ\text{C}$ , nakuplja 70% svoje računске čvrstoće u prvih 24 sata ali bi ceo proizvodni ciklus mogao biti prepolovljen (24 h  $\Rightarrow$  10 h) ukoliko bi doza cementa sa 300 kg/m<sup>3</sup> porasla na 500 kg/m<sup>3</sup>.

( 1,00 )

### F.2. Troškovi za aditive specijalne namene

Obzirom na stepen ubrzanja hidratacionog procesa neophodna je primena retardera, čiji je zadatak usporenje procesa vezivanja kako bi beton u trenutku ugradivanja imao željenu obradljivost, i superplastifikatora koji betonu održavaju viskoznost. Međutim, kako je prisustvo aditiva nezaobilazni deo fabrički proizvedenih vrsta betona tada je lako prihvatiti stav da ovde aditivi nemaju posebnu ulogu pa je ocena:

( 0,00 )

### F.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

Priroda metode nameće potrebu da se kod razudenijih poprečnih preseka ( $M_p = 6$ ) i oštrijih režima sazrevanja ( $t_{vaz} = -20^{\circ}C$ ) vrši dodatno "utopljanje" uglova oplatnih formi kako bi se sprečile pojave "temperaturnog šoka" usled ubrzanog hlađenja betona. Ovakvi uslovi imaju potporu u zahtevu da oplata ima koeficijent toplotne provodljivosti manji od  $5,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ .

( 1,00 )

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

### G.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Može se smatrati da nisu potrebne posebne mere zaštite ugrađenog betona u toku njegovog sazrevanja u ambijentalnim uslovima, međutim obzirom da se zagrejan beton u surovim ambijentalnim uslovima ubrzano hladi neophodno ga je, u toj fazi rada, zaštititi od pada temperature koji je prema *Besser*-u:

$$\Delta t = \frac{(l_1 F_0 + l_2 F_3) (j t_{sr} - t_{vaz}) t_1}{0,0024 \text{ C g V}} \quad (11.2)$$

i gde navedene promenljive imaju sledeću prirodu ili vrednosti:

- $l_1$  - koeficijent termoprovodljivosti otkrivene površine oplata  $F_0$  koji ima vrednost  $35 \text{ kW/m}^2\text{K}$
- $l_2$  - koeficijent termoprovodljivosti pokrivene površine oplata  $F_3$  koji ima vrednost  $9,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$

Napomena: Vrednosti koeficijenata  $I_j$  odgovaraju brzini vetra od samo 1 m/s pa ih, za fazu ugradivanja, treba uvećati srazmerno stvarnoj brzini množenjem sa  $(1,4 \sqrt{v_{\text{vetra}}})$

C - toplotni kapacitet betona, usvaja se 1,045 kJ/kg<sup>o</sup>K

j - koeficijent neujednačene zagrejanosti mase (0,75)

$t_{sr}$  - srednja temperatura zagrejane betonske mase (°C)

t - vreme proteklo od trenutka pražnjenja kade do trenutka toplotne zaštite ugrađene mase (h)

g - zapreminska masa betonske mešavine (kg)

V - zapremina betona u kadi za zagrevanje (m<sup>3</sup>)

Jedan od pratećih efekata svih metoda je značajan gubitak vlage iz mešavine. U ovom slučaju se, usled elektro-zagrevanja, gubi oko 1-1,5% unete količine vode (što je u poređenju sa gubicima u toku transporta i ugradivanja dosta manje) pa treba preduzeti mere zaštite, npr. pokrivanje termo-kada pri radu.

( 0,70 )

### G.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Visoka mehanoopremljenost uslovljava adekvatan stepen kontrole mada je, zahvaljujući bimetalnim sklopkama i sličnim delovima opreme ostvaren zadovoljavajući oblik profilaktike. Proces je zato (ali i zbog prisustva struje visokog napona) u velikoj meri van direktne vizuelne kontrole operatera ali je nadzor nad opremom u svakom slučaju neprekidan.

( 1,00 )

### G.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Postupak zagrevanja do željene temperature nije moguće potpuno kontrolisati jer je zavisnost opreme od neprekidnog snabdevanja potrebnom količinom energije faktor poremećaja pa se zahtevaju posebni uslovi napajanja. Razvojem metode došlo se do pouzdanih sklopki, grejača i izolatora. Kako postoje merni instrumenti adekvatne osetljivosti pouzdanost postupka se može oceniti ocenom 0,95 dok je procenjeni stepen automatizacije 0,80.

( 1,75 )



## 11.1.4. METODA ELEKTRO-DUBINSKOG ZAGREVANJA BETONA

### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

#### a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Široka rasprostranjenost ove metode (posebno u SSSR-u) proizilazi iz podatka da se tehnološkim postupkom premošćava period spravljanja, transportovanja i ugradivanja betona koji je kod betona zagrevanih u termo-kadama prinudno kratak (beton brzo gubi obradljivost, čak i uz dovoljno prisustvo plastifikatora) jer se transformacija električne u toplotnu energiju odvija direktno na mestu očvršćavanja materijala. Elektrode različitih oblika uspešno vrše zagrevanje mase ali se zbog male vlastite mase i velike termičke inertnosti materijala javlja značajna neravnomernost u rasprostiranju toplote a samim tim i velika varijacija u pogledu mehaničkih karakteristika materijala u toku očvršćavanja. *Topčij* napominje da se problem komplikuje tehničkom nemogućnošću da se razmak elektroda realizuje na projektovani način tako da rastojanje varira i do 10%. Pomenuti problemi praktične primene ne umanjuju visoku ocenu stepena razvijenosti metode:

( 0,90 )

#### a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Metoda zagrevanja betona primenom dubinskih elektroda nije našla značajnije polje primene u našim klimatskim uslovima a iskustva domaćih izvođača na inostranim gradilištima su zanemarljiva pa je i to delovalo kao inhibitor za učešće na licitacijama poslova u subarktičkoj zoni. Stoga ni ocena nije veća od:

( 0,00 )

#### a.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Potrebna su relativno mala materijalna ulaganja u novu opremu i to prevashodno u uređaje za tehnički bezbednu vezu elektroda i izvora energije. Deo opreme može biti nabavljen u ZND-a.

( 0,35 )

**B. KRITERIJUMI PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI****b.1. Primenljivost za različite tipove nosača**

Sama metoda je tako koncipirana da je moguće obradivati kako obične, armirane nosače tako i prethodno-napregnute. Pritom treba imati u vidu da se kod *linijskih* nosača većeg poprečnog preseka pored podužne armature (iz statičkih razloga raspoređene po konturi preseka) mora primeniti i određeni broj bočnih uronjenih elektroda kojima se poboljšava ravnomernost zagrevanja dubljih slojeva. Prethodno pomenuta ograničenja polja primene na deblje površinske elemente ( $d \geq 12$  cm) nije od posebnog uticaja ali je zato nemogućnost ostvarenja kvazi-homogenih temperaturnih uslova sazrevanja kod vrlo razudjenih preseka odlučujuća pri izboru.

( 1,00 )

**b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima**

Metoda u ustaljenim temperaturnim uslovima okruženja pokazuje visok stepen zavisnosti od pouzdanosti angažovane opreme. Ukoliko je ona u stanju da obezbedi pravilno praćenje promene otpora usled očvršćavanja mase rezultati primene metode su jednaki očekivanim. Međutim, kod sredina u kojima je varijacija dnevne temperature izražena metoda pokazuje malu osetljivost obzirom da ne postoji automatsko prilagodavanje režima rada promenama u okruženju. Doza termičke inertnosti ugrađenog betona (pod zaštitom makar osnovne oplata) ublažava opasnost od anomalija ove prirode. Nezaobilazan uslov kod svih metoda elektro-obrade betona je minimalna temperatura betona od  $5^{\circ}\text{C}$ . Ovaj uslov u određenoj meri sužava polje primene na blage i srednje hladne ambijentalne režime rada.

( 0,70 )

**b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak**

Primenom ove metode izvođač brzo dolazi u opasnost da svede dnevnu količinu ugrađenog betona na vrlo nizak nivo. Kao kod primene indukcionog zagrevanja visoko učešće ljudskog rada na postavljanju

elektroda, njihovom povezivanju i kontroli promene otpora dovodi u pitanje opravdanost primene dubinskog elektro-zagrevanja prilikom izvođenja radova koji nameću potrebu za visokim praktičnim učinkom što se može ublažiti povećanjem broja angažovanih ekipa ali bez značajnijeg uticaja na ocenu po ovom kriteriju. Poseban problem je zabrana betoniranja konstrukcije čiji je jedan deo pod naponom. Ni kontrola temperature nije dozvoljena dok je masa pod naponom a armatura (neubetonirana) u fazi zagrevanja mora biti uzemljena.

( 0,85 )

### C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

#### c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće $\beta_{krit}$

Prilikom određivanja trajanja faze zagrevanja, a u cilju dobijanja potrebne kritične čvrstoće u zadatom roku, treba uzimati u obzir i fazu hlađenja nakon isključivanja grejača. Ovo stoga što se proces očvršćavanja odvija sve vreme a *maturity* funkcija ima svoj prirast srazmeran temperaturi betona. Što je moduo preseka  $M_p$  manji to je faza hlađenja važnija za racionisanje utroška energije. Masivniji elementi konzerviraju toplotu veštački unetu u masu i dugo nakon prestanka zagrevanja održavaju intenzivan proces zagrevanja. Kako je optimalna brzina zagrevanja  $15-20^{\circ}\text{C/h}$  to se, kod primene brzo vezujućih cemenata, do temperature od  $60-70^{\circ}\text{C}$  za oko 4 sata tako da ukupno vreme očvršćavanja do nivoa kritične čvrstoće (sa fazom izotermnog zagrevanja) ne računajući opisani proces hlađenja traje oko 8 sati te je i ocena metode visoka:

( 1,00 )

#### c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće $\beta_{28}$

Činjenica da se elektro-otpor žitke betonske mešavine održava na skoro istom nivou u prvih 7-8 sati a potom se višekratno uvećava ne dozvoljava značajniji uticaj tehnologa na brzinu očvršćavanja nakon isključenja grejanja. Jer, obzirom da se metoda primenjuje na masi koju odlikuje sleganje konusa od 2-5 cm, faza "termosnog"

održavanja predstavlja jedinu alternativu dopunskom uključivanju struje pa obzirom da je ekonomičnija to proces mora žrtvovati deo vremena neophodnog za ostvarenje projektovane čvrstoće. Metodom se ostvaruje skraćenje roka od oko 25% pa je ocena:

( 0,70 )

### c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

U situacijama kada se brzina zagrevanja (gradijent) ne prilagodi u potpunosti *kapacitetu* vezivne komponente betona može doći do narušavanja kvaliteta veze čestica i pojave mikro-prslina iz čega proističe i pad čvrstoće materijala. Prema *Saul-* ovim preporukama u prva 2 sata nakon izrade mešavine ne treba preći 50°C a nivo od 100°C se nikako ne sme preći za prvih 6 sati. Kako su incidentne situacije ovakve prirode vrlo retke ocena metode je:

( 0,00 )

## D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

### d.1. Ukupni utrošak radne snage

Polazeći od etalonskog nosača sa modulom površine preseka  $M_p = 3,5$  dolazimo do činjenice da se utrošak "živog" rada na montaži oplata kod sličnih metoda ne razlikuje mnogo, osim ako nisu u pitanju veći, prefabrikovani komadi tipske oplata standardnih dimenzija tako da se mogu (vezama u vidu kopči) lako montirati-demontirati. Prave razlike nastaju zbog dela rada izvršenog na postavljanju specifičnih delova opreme karakterističnih za dotičnu metodu. U ovom slučaju montaža elektroda i neophodnog pribora uzima skoro 1,50 NČ odnosno (prema navedenim referencama) ukupno:

( 5,15 )

### d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Primena opisane tehnologije podrazumeva kompleksnu edukaciju svih angažovanih radnika kako u pogledu primene opreme ili korišćenja merno-regulacionih instrumenata tako i u pogledu tehnoloških aspekata termičke obrade betona. Ovako visok stepen dopunske obuke



podrazumeva i posebne kurseve zaštite na radu. Kako kvalitet košta to i ulaganja u obuku moraju biti sistematska uključujući provere obučenosti pre početka svake gradnje.

( 0,90 )

#### d.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Iz opisa primenjene opreme i karakteristika tehnologije rada proizilazi da se mora posebno voditi računa o izolaciji zone rada od pristupa neosposobljenih radnika, kao i potpunom odsustvu ljudi u vreme aktivne termo-obrade betona. Nažalost, svi ovi naponi ne mogu neutralisati štetne efekte lutajućih struja koje se, naročito u gusto armiranim betonskim konstrukcijama, javljaju kao razlog za odbacivanje ovakvog tehnološkog pristupa. Stoga je ocena:

( 0,90 )

### E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

#### e.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona

Kao kod pripreme "hladnih" betona i ovde je neophodno održati bar  $0^{\circ}\text{C}$  sveže mase neposredno pre ugradivanja kako bi se obezbedila adekvatna ugradljivost. Stoga je ekvivalent utrošene energije ovde zadržan na nivou od  $13 \text{ kWh/m}^3$  te je stoga i ocena:

( 13,00 )

#### e.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja pa ni ocena ne može biti veća od:

( 0,00 )

#### e.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona

Procene troškova su vrlo nezahvalne obzirom da se mogu značajno menjati sa promenom opreme i režima rada. *Topcij* (109) daje vrlo korisnu preporuku da se u slučaju prethodnog zagrevanja armature (sprečava se termo-šok betona) dodaju troškovi za oko  $20 \text{ kWh/m}^3$ . Kako o troškovima ove vrste nije vođeno računa ni kod ostalih metoda to će i u ovom slučaju oni biti stavljeni u drugi plan.

Tabela 11.11

$t_a$	$\Delta t_b$	$M_p = 6$			$M_p = 10$		
		40	60	80	40	60	80
-10	5	3,5	3,7	3,8	4,0	4,3	4,6
	10	7,4	7,5	7,6	8,0	8,3	8,6
	15	11,0	11,2	11,4	12,0	12,2	12,5
-20	5	3,7	3,8	4,0	4,3	4,6	4,9
	10	7,4	7,6	7,8	8,3	8,6	8,9
	15	11,2	11,4	11,7	12,2	12,5	12,8
-30	5	3,8	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	10	7,6	7,8	7,9	8,6	8,8	9,1
	15	11,4	11,6	11,7	12,5	12,8	13,1

(nastavak)

$t_a$	$\Delta t_b$	$M_p = 15$			$M_p = 20$		
		40	60	80	40	60	80
-10	5	4,7	5,1	5,6	5,4	5,9	6,5
	10	8,9	9,3	9,7	9,7	9,8	10,9
	15	13,0	13,5	13,9	14,2	14,7	15,3
-20	5	5,1	5,5	6,0	5,9	6,5	7,1
	10	9,3	9,7	10,1	10,3	10,9	11,5
	15	13,5	13,9	14,3	14,7	15,3	15,9
-30	5	5,5	6,0	6,4	6,5	7,0	7,6
	10	9,7	10,1	10,6	10,9	11,1	12,0
	15	13,9	14,3	14,7	15,3	15,8	16,4

Obzirom na datu prirodu kriterijuma uputnije je utrošak energije koristiti kao parametar a troškove (cenu) upoređivati samo kada su raspoloživi podaci svedeni na zajednički datum procene. Stoga se u praksi mogu koristiti podaci dobijeni iz ruskih priručnika kojima se (Tabela 11.11) utrošak električne energije ( $\text{kWh/m}^3$ ) u fazi podizanja temperature izražava u funkciji temperature vazduha ( $t_a$ ), brzine podizanja temperature betona ( $\Delta t_b$ ), modula površine  $M_p$  i krajnje temperature progresa sveže mase. Sličnim postupkom se dobija (Tabela 11.12) utrošak energije u fazi naknadne izotermije a smatra se da je sastav oplata standardan. Pretpostavimo da je predmet naše analize i dalje nosač ( $M_p = 6$ ) za koji su

Tabela 11.12

$t_a$	$M_p = 6$			$M_p = 10$		
	40	60	80	40	60	80
-10	0,8	1,1	1,4	1,4	1,9	2,4
-20	1,0	1,3	1,6	1,7	2,1	2,7
-30	1,1	1,4	1,8	2,0	2,4	2,9

(nastavak tabele)

$t_a$	$M_p = 15$			$M_p = 20$		
	40	60	80	40	60	80
-10	2,0	2,3	3,6	2,8	3,7	4,8
-20	2,4	3,2	4,0	3,2	4,3	5,3
-30	2,8	3,6	4,4	3,7	4,8	5,9

ambijentalni uslovi  $t_a = -20^{\circ}\text{C}$ , brzina zagrevanja  $15^{\circ}\text{C/h}$ , krajnja temperatura  $60^{\circ}\text{C}$  i ukupna dužina izoternog zagrevanja od 8 sati definisali ukupni utrošak od  $21,80 \text{ kWh/m}^3$  - tada je i ocena:

( 21,80 )

## F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

### f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

Prema raspoloživim podacima neophodno povećanje količine cementa kao osnove za formiranje kvalitetnog elektrolita iznosi 20-25 kg (za beton MB20). Stoga kriterijumu pridružujemo ocenu:

( 1,00 )

### f.2. Troškovi za aditive specijalne namene

U toku primene metode nema potrebe za aditivima specijalne namene ali je primena uobičajenih aditiva (u nešto većim dozama) potrebna radi očuvanja neophodne doze elektrolita i u fazi sekundarnog očvršćavanja kada se unete vode gubi usled hidratacije.

( 0,50 )

### f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

U slučajevima kada se poduzna armatura koristi kao elektroda preporuke predviđaju i rad na dopunskom povezivanju (zavarivanju) poprečne i podužne armature. Pritom se uvek troši i manja količina žice i elektroda za zavarivanje. Međutim, posebno veliki rashod predstavljaju elektrode koje se ugrađuju u beton obzirom da bi, nakon faze termičke obrade betona, bilo izuzetno teško njihovo izvlačenje (a ostavilo bi i tragove u materijalu) pa desetostruko manji troškovi za kvalitetnije termo-izolovanje oplata ne utiču značajnije na vrednost atributa, ona je:

( 1,00 )

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

### g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Sve metode rada koje podrazumevaju veštačko podizanje temperature mase iznad ambijentalne imaju "slabost" u smislu obavezne zaštite obradene mase od prebrzog pada temperature - "termo-šoka". Metoda ima *ugraden* mehanizam prevencije u vidu postavljenih dubinskih elektroda koje mogu (uz značajan utrošak energije) biti angažovane i u odmakloj fazi početnog očvršćavanja, ali je i adekvatna oplata (minimalan) garant očekivanog tempa sazrevanja.

( 0,90 )

### g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Prethodno pomenuta istraživanja *Besser*-a govore da se na obavezno dežurstvo, prilikom dubinske obrade, troši  $0,34$  čovek dana/ $m^3$ . Ako se usvoji radna smena od 8 sati to bi značilo vrlo mnogo "živog" rada -  $2,72$  h/ $m^3$ . U odnosu na metodu "vrućeg termososa", trebalo bi skoro 5 puta više angažovanja radnika, pa je i ocena:

( 0,85 )

### g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Željene rezultate obučena ekipa radnika sa lakoćom, i visokim stepenom sigurnosti, ostvaruje u različitim radnim uslovima. Mana



metode je direktna zavisnost od pouzdanog izvora električne energije jer ugrađeni beton i u standardnoj oplati dosta brzo troši rezerve elektrolita tehnološki neophodnog za primenu metode. Kako su takvi uređaji uglavnom kvalitetno održavani ocena je 0,90 a stepen automatizacije je oko 0,50 pa je ukupno:

( 1,40 )

## 11.1.5. METODA ZAGREVANJA BETONA INFRACRVENIM ZRAČENJEM

### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

#### a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Sa sigurnošću se može reći da su tehnički i tehnološki problemi u vezi sa primenom metode razrešeni. Proizvođači opreme su u stanju da izvrše kvalitetnu i brzu obuku ljudstva za uspešnu primenu a kroz oblike konsaltinga pruže i druge vrste usluga. Sama metoda je dovoljno dugo u primeni da postoje brojna iskustva sa betonima različitih kvaliteta i namena tako da su iznenađenja u pogledu odstupanja od očekivanih rezultata minimalna.

( 1,00 )

#### a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Danas gotovo sve značajnije organizacije iz građevinske operative raspolazu opremom i ljudstvom sposobnim za obradu mase zračenjem. Nedostatak kvalitetnih domaćih proizvođača pojedinih uređaja, kao i cena njihove nabavke na stranom tržištu demotivisu deo operative za osvajanje metode; naročito se oseća kod srednje velikih izvodača.

( 0,85 )

#### a.3. Step en materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Nezavisno od grupe problema koji proističu iz obuke radnika kroz *praktičnu* primenu metode (pa u početku donose i troškove popravke nekvalitetno obradenog betona) stvarni problem je potreba firme da angažuje vlastita finansijska sredstva za kupovinu specifičnih ali

i tehnološki nezamenljivih uređaja. Prema skali ocena:

( 0,70 )

## B. KRITERIJUMI PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

### b.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Metoda obrade betona infra-crvenim zračenjem je projektovana za površinsku obradu nosača (zidova i ploča) pa je za stubove i grede neracionalna jer drastično smanjuje stepen iskorišćenja energije emitovane grejalicama. Nemogućnost obezbeđivanja različitih oprema za negu nameće i neracionalnu primenu pa je ocena:

( 0,95 )

### b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Efikasna je primena metode do temperature  $-20^{\circ}\text{C}$  do koje ide i sama (bez kombinovanja sa drugim postupcima) a na nižim temperaturama nije dobra jer zbog potrebe za kvalitetnim prodorom zračenja kroz tanak sloj metal(izira)ne oplata podrazumeva relativno nezaštićenu površinu betona koja se brzo hladi. Prema skali ocena:

( 0,70 )

### b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

Koncepcija tehnološkog postupka ne dozvoljava uticaj primenjene opreme na praktični učinak planiran za normalne uslove rada. Zadat praktični učinak zavisi samo od raspoloživosti potrebnog broja grejača, njihovog rasporeda i specifične snage, pa iako ti faktori ostavljaju utisak o velikom značaju njihov stvarni uticaj je mali:

( 0,15 )

## C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

### c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće $\beta_{\text{krit}}$

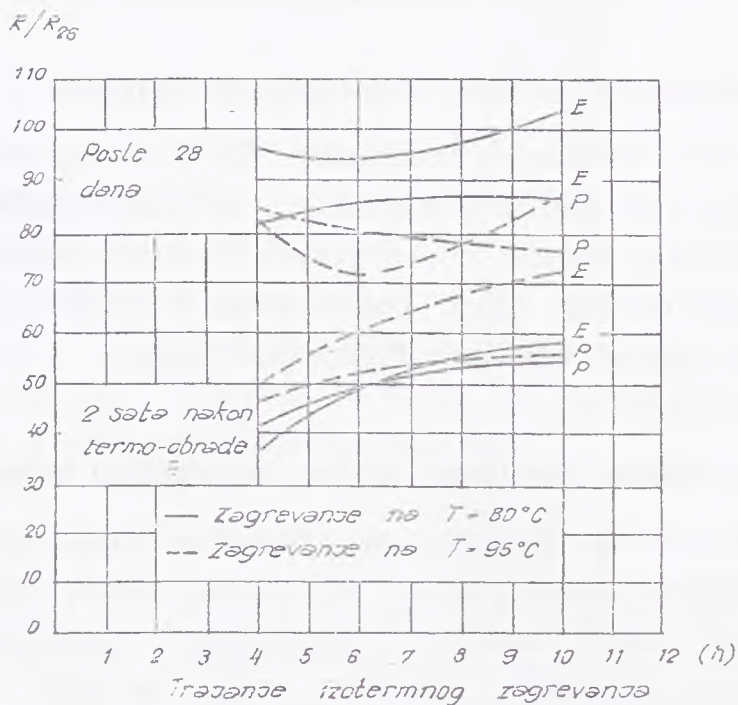
Prema raspoloživim podacima (32) posle 6 sati ubrzanog sazrevanja na temperaturi od  $80^{\circ}\text{C}$  može se dobiti očekivanih 70% marke betona.

betona. Prema usvojenoj skali ocena metode je:

( 1,00 )

c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće  $R_{28}$

Računsku čvrstoću beton dostiže nakon 28 dana ali je neophodan uslov primeren režim obrade koji podrazumeva da se izotermna temperatura od  $95^{\circ}\text{C}$  održava u trajanju od 5-6 sati, odnosno blaži režim sa  $t_{\text{izot}} = 70-80^{\circ}\text{C}$  traje 7-8 sati. Ovi uslovi obezbeđuju realizaciju bar 50%  $R_{28}$  već nakon 8-10 sati sazrevanja tako da se obrt oplata može zasnivati na ovako definisanom ritmu rada.



slika 11.5 - Uporedne krive rasta čvrstoće betona sa brzovezujućim cementom nakon izotermne faze metode brzog zagrevanja sa naknadnim vibriranjem ugrađene mase (krive E) ili metode obrade parom (104)

Razumljivo je da se nakon ovakvog tretmana betonski nosač mora zaštititi od termičkog šoka pa se proces hlađenja mora odvijati nekoliko sati (zavisno od temperature izotermije i ambijentalnih uslova) a gradijent pada temperature (zavisno od oblika i debljine

nosača) ne bi trebao preći 25-30 °C/h. I u ovom slučaju treba naglasiti da se naponi zatezanja koji nastaju pri hlađenju lakše kompenziraju ukoliko je procenat armiranja preseka nosača veći.

( 1,00 )

### c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

Stvaranje kvazi homogenog temperaturnog polja na površini betona omogućava ravnomeran rast čvrstoće materijala i samo u slučajevima nepravilne primene grejalica (udaljenost od površine nosača manja od propisane) može doći do "pečenja" zaštitnog sloja.

( 0,00 )

## D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

### d.1. Ukupni utrošak radne snage

Prema istraživanjima koja su na temu *cold weather concreting*-a sa domaćim materijalima bila izvedena (32) može se reći da je ukupan utrošak rada oko 3,50 NČ/m<sup>3</sup> pa je i ocena metode:

( 3,50 )

### d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Ostvarenje željenih efekata metode je u direktnoj zavisnosti od pravilno i precizno postavljenih infra-grejača. Kako je za njihovu gustinu rasporeda, intenzitet zračenja i dužinu rada važan faktor tip i sastav oplata i temperatura vazduha jasno je da kompleksan zadatak rukovanja opremom može biti poveren samo radnicima visokog nivoa znanja iz oblasti ubrzanog očvršćavanja.

( 0,50 )

### d.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Pravilno instalirana oprema ne rasipa nekontrolisano zračenje pa je mali porast opasnosti registrovan prevashodno kao pratilac rada sa opremom koja zahteva stručno rukovanje. Kod primene grejalica na propan-butan potrebne su dodatne mere obezbeđenja zbog velike zapaljivosti i opasnosti od eksplozije, ocena:

( 0,35 )



**E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE****e.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona**

Može se reći da je deo energije, utrošen za zagrevanje komponenata betonske mešavine, (nužan) tehnološki gubitak koji nastaje tokom hlađenja ugrađenog betona pre nego što je aplicirano infragrejanje površine nosača. Ako se pri  $t_a = -20^{\circ}\text{C}$  i  $t_{bp} = 16^{\circ}\text{C}$  troši energije oko  $22,2 \text{ kWh/m}^3$  (kao za "termos" metodu) onda je i ocena:

( 22,00 )

**e.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona**

U toku primene metode nema troškova za ovu vrstu zagrevanja.

( 0,00 )

**e.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona**

Uzimajući u obzir rezultate koje je ova metoda pokazala na nekim objektima u Beogradu može se reći da je utrošak energije za obradu ploča ( $M_p = 3-6$ ) oko  $1,20 \text{ kWh/m}^3$  (grejači od 2 kW) što za ukupno vreme obrade od 6 sati zagrevanja i 8 sati izotermije donosi oko  $16,8 \text{ kWh/m}^3$ . Utrošak energije u ovoj metodi je funkcija i brojnih parametara ali će za analizu biti zadržano:

( 16,80 )

**F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA****f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator**

U toku primene ove metode nema troškova za cement koji bi, doziran u većoj količini, ubrzavao proces hidratacije.

( 0,00 )

**f.2. Troškovi za aditive specijalne namene**

U toku primene ove metode nema troškova za aditive koji bi imali posebne efekte po proces ubrzanog očvršćavanja betona. Kao i u drugim metodama aditivi su u standardnoj primeni:

( 0,00 )

**f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije**

Specifičnost ove metode je intenzivna kontrola i zaštita površine betonskog elementa koja je izložena intenzivnom zagrevanju pa time i isušivanju usled čega može doći do "pečenja" betona i prekida hidratacionog procesa. PVC folije mogu biti dobra zaštita samo ako su elastične (dobro naležu na površinu) i imaju malu refleksiju zračenja. Stoga možemo usvojiti ocenu:

( 0,00 )

**G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE****g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode**

Nakon termičke obrade beton mora biti zaštićen od termo-šoka na jedan od pasivnih načina, uglavnom prekrivanjem termo-izolacionim materijalima u vidu tabli ili fleksibilnih pokrivača.

( 1,00 )

**g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode**

Povremena kontrola pravilnosti rada infra-grejalica, temperature vazduha... omogućuje korekciju parametara procesa i obezbeđuje sve preduslove za precizno definisanje *trajanja* obrade. Ovo je važno stoga što se u "popularnim" preporukama dužina grejanja definiše kao (gotovo proizvoljna) vrednost unutar intervala čiji je red veličine pola sata do sat. Ekonomičan rad ne dozvoljava tu vrstu proizvoljnosti pa je kontrola nezaobilazna.

( 0,50 )

**g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka**

Relativno visok stepen automatizacije proizvodnog procesa (nakon postavljanja grejača na projektovanu razdaljinu i uključenja u rad sazrevanje betona teče po ustaljenoj proceduri) prati dosta visoka pouzdanost instalirane opreme. Obzirom da je raspored i udaljenost grejača od površine tretiranog nosača definisana posebnim elaboratom tehnički je teško izvodljivo ubrzavanje očvršćavanja

povećanjem temperature izotermije. Kako je ona vrlo blizu nekim tehnološkim maksimumima (80-95<sup>0</sup>C) takvo povećanje je praktično i nepotrebno pa metoda uglavnom daje svoj praktični maksimum. Imajući u vidu prirodu ovog kriterija sumarna ocena bi proizašla iz ocene fleksibilnosti opreme (0,20) i ocene automatizacije koja je ostvarena instaliranom opremom (0,90):

( 1,10 )

## 11.1.6. METODA INDUKCIONOG ZAGREVANJA BETONA

### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

#### a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Proistekla kao imitacija metalurških postupaka za zagrevanje metala metoda indukcionog zagrevanja se primenjuje od 1940.god. kada ju je *Komissarov* (SSSR) i uveo u praksu. Specifična priroda postupka zagrevanja betonske mase nameće selektivnu primenu metode pri čemu je radni uslov "ispupčena" kontura poprečnog preseka koja može biti obuhvaćena "kalemom" provodnika elektriciteta (u slučaju nešto razuđenijih preseka metalna oplata može poslužiti kao "grejač" koji funkcioniše kao termo-oplata). Pritom moduo površine mora biti najmanje  $M_p = 5$  pa sve to sa tehničke strane u mnogome sužava polje primene i svodi je na oblast veza montažnih nosača koje se rade po mokrom postupku, na izradu dobro i gusto armiranih stubova i slične slučajeve. Za sve njih je karakteristična efikasna primena armature kao "dubinskih" grejača heterogene betonske mase što tehnološki pojednostavljuje problem ravnomernog zagrevanja materijala ali ostavlja problem "kuvanja" kontaktne zone oko armaturnog gvožda. Sam proces zagrevanja materijala (elektroda , a putem njih i betona) daje više varijanti ubrzanog sazrevanja. Kod svih je zajednička faza podizanja temperature ali razlike nastaju u stepenu ostvarivanja maksimalno dopuštene (90-100<sup>0</sup>C) kao i u postojanju i trajanju faze izotermije nakon

dosezanja temperaturnog pika. Balansiranjem ovih parametara tehnološkog procesa teži se umanjenju gubitaka u čvrstoći na pritisak usled procesa ubrzanog zagrevanja i sazrevanja. Dok je dozvoljena brzina hlađenja oko  $5^{\circ}\text{C}$  brzina zagrevanja zavisi od razuđenosti poprečnog preseka nosača:

Tabela 11.13

vrsta oplata	moduo površine preseka		
	$M_p = 5 - 6$	$M_p = 7 - 9$	$M_p = 10 - 11$
klasična oplata	3	5	8
metalna oplata	5	8	10

Iako su vrednosti u tabeli date vrlo precizno treba ih staviti u kontekst stepena armiranja poprečnog preseka tako da se prikazane vrednosti prihvataju samo za  $\mu \leq 1$ , dok kod većih vrednosti (zbog udela mase armaturnog gvožđa) treba preploviti date brzine zagrevanja. Neki okvirni pokazatelji da se racionalan tehnološki proces dobija zagrevanjem u trajanju do 1 sata uz 5-9 sati održavanja na temperaturi  $50-70^{\circ}\text{C}$ . U poredenju sa klasičnom obradom betona vrelom parom ovaj postupak je dvostruko ekonomičniji. Sa druge strane metoda je utoliko atraktivnija što ne zahteva rekonstrukciju postojećih oplatnim modula već ih primenjuje bez ikakvih intervencija koristeći ih isključivo kao "čeličnu masu" a i induktorska žica se pri radu ne troši pa može biti korišćena gotovo neograničeno mnogo puta.

( 0,80 )

#### a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Predhodno opisano polje primene i relativno blagi klimatski uslovi na domaćim gradilištima nisu dali adekvatne uslove za razvoj i primenu ove metode u nas. Eventualna iskustva domaćih izvođača nisu na nivou koji bi se mogao smatrati značajnijim za kompletniju procenu osposobljenosti firme za primenu postupka u (za njega) optimalnim temperaturnim uslovima. Posebno interesantan aspekt primene ove metode je fabrička proizvodnja linijskih nosača



tipiziranih dimenzija ("kataloška proizvodnja") gde postoji mogućnost ugradnje kvalitetne, pouzdane opreme visoke efikasnosti.

( 0,00 )

### a.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Jednostavnost opreme i prilično pojednostavljen radni ciklus omogućavaju relativno brzo osvajanje ove tehnologije rada što podrazumeva i nabavku nisko-naponskog transformatora sa dovoljnom količinom induktorskih provodnika.

( 0,35 )

## B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

### b.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Ograničenja u pogledu polja primene su delom navedena u objašnjenju ocene po kriterijumu A.1. ali ga treba dopuniti uslovom da su obavezno vitki ( $M_p > 5$ ) preseki pritom i gusto armirani ili je (bar) u primeni metalna oplata. Procenat konstrukcija koje zadovoljavaju takve uslove a pritom je i obim radova takav da je primena metode racionalna - nije veliki.

( 0,05 )

### b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Efikasnost primene samog postupka gotovo da ne zavisi od nivoa ambijentalne temperature. Njegova "elastičnost" se zasniva na tehničkim mogućnostima regulacije intenziteta i trajanja procesa zagrevanja ugrađene mase. Tehnološki razlozi, međutim, eliminišu ovaj postupak iz grupe racionalnih za rad pri  $t_a < -30^{\circ}\text{C}$ , a čine ga problematičnim već pri  $t_a < -20^{\circ}\text{C}$ . Razlozi leže u činjenici da se beton (uprkos određenoj "inertnosti") na tim temperaturama, a ugrađen u vrlo tanke forme, hladi toliko brzo da ga je vrlo teško kvalitetno ugraditi ukoliko nema veću dozu odgovarajućih aditiva i visoku  $t_{bp}$  dobijenu zagrevanjem komponenata mešavine.

( 0,30 )

**b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak**

Može se sa sigurnošću reći da je jedan od osnovnih razloga uske i retke primene ovog postupka veliki utrošak "živog" rada koji proističe iz potrebe pravilnog (ručnog) formiranja "kalema". Tako se za prosečan stub poprečnog preseka 40/40 i visine 3,00 m<sup>1</sup> troši ceo jedan norma-čas na montaži induktora, ili oko 2 NČ/m<sup>3</sup>. Kod većeg broja nosača problem nastaje zbog nedostatka dovoljnog broja kvalifikovanih za ovakav rad.

( 1,00 )

**C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA****c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće  $b_{krit}$** 

Nezavisno od tipa oplate (metalna, drvena) ali u zavisnosti od vrste nosača, režima zagrevanja i karakteristika poprečnog preseka može se reći da se za 12-28 sati dostiže 50-70% računске čvrstoće. Precizniji podaci pokazuju da se 40% marke betona, pri  $t_a = -15^{\circ}\text{C}$ , dostiže zagrevanjem do  $50^{\circ}\text{C}$  u toku 10-12 sati i hladenjem do  $0^{\circ}\text{C}$  za 25-30 sati, što je ukupno 1,50-1,75 dana.

( 0,50 )

**c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće  $b_{28}$** 

Indukciono zagrevanje u vrlo kratkom intervalu vremena podiže kritičnu čvrstoću betonskog nosača omogućavajući prijem i osnovnog opterećenja ali se za prijem računskog opterećenja moraju sačekati bar tri nedelje, pa i to pod uslovom da su termička svojstva date oplate na visokom nivou. Stoga je ocena metode:

( 0,70 )

**c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja**

Obzirom da se indukcionim zagrevanjem postižu gradijenti rasta temperature koji omogućavaju pravilan razvoj produkata hidratacije nisu zabeleženi padovi čvrstoće. Proces može ugroziti samo potreba da se skraćenjem ciklusa i porastom temperature ubrza sazrevanje.

( 0,00 )

## D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

### d.1. Ukupni utrošak radne snage

U ovom slučaju se možemo osloniti na procenu *Besser*-a (87) da sam utrošak ljudskog rada kod indukcionog zagrevanja nije viši od onog koji se utroši pri dubinskom elektro-progrevu. Kako je odstupanje odgovarajućih vrednosti nekih drugih kriterija za ove metode bilo relativno malo možemo sa zadovoljavajućom tačnošću usvojiti ocenu:

( 5,15 )

### d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Indukciona metoda se sve više primenjuje u fabričkim uslovima kao postupak za ubrzanje sazrevanja elemenata. Čak i za osoblje koje je obučeno za primenu polu-automatizovanih procedura važno je adekvatno doobučavanje. Usvojena ocena predstavlja kompromis kojim je uprosečen stepen dopunske edukacije radnika u fabrikama i na gradilištima uz akceptiranje značajne razlike u broju radnika koji se u takvim uslovima angažuju.

( 0,80 )

### d.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Potreba da se radnici u najvećoj meri zaštite od vlastitog nemara je dovela do primene niskonaponskih transformatora koji daju struju od 50-120 V i time eliminišu pogubne incidente pri radu. Jednostavnost u radu i bezbednost izvršilaca mogu se smatrati važnim uporednim prednostima ovog postupka. On eliminiše direktni kontakt izvora energije i betonskog nosača ali ostaje opasnost od opekotine nižeg stepena pri zadržavanju u zoni grejača.

( 0,35 )

## E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

### e.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona

U toku primene ove metode se takode javljaju troškovi za ovu vrstu zagrevanja jer iako se indukciono obrađuje beton ugrađen u oplatu

dobrih termičkih osobina sveža masa mora imati bar  $0^{\circ}\text{C}$  te je stoga nivo utrošene energije na njenoj pripremi bar  $13 \text{ kWh/m}^3$ . Kako se u RILEM-ovim preporukama savetuje da pre početka tretmana beton ima određenu čvrstoću neophodno je, tokom prvih 2-3 sata nakon izrade mešavine ugrađeni beton održavati na  $3-5^{\circ}\text{C}$  povremenim (na svakih 5-10 minuta) uključivanjem induktorskog grejača.

( 13,00 )

### e.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona

U toku primene metode nema troškova ove vrste zagrevanja betona.

( 0,00 )

### e.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona

Podaci do kojih se došlo u toku istraživanja pokazuju (u zavisnosti od tipa nosača koji se obrađuje) primetnu šarolikost utroška energije. Ono što se, za klasične stubove, može uzeti kao reper je utrošak od  $110-120 \text{ kWh}$  električne energije po  $1\text{m}^3$ , odnosno za izradu montažnih ("mokrih") veza (količina betona od oko  $0,125 \text{ m}^3$ ) oko  $75 \text{ kWh}$ . Kod obrade betona fundamenata možemo, pri temperaturama  $t_a = -15^{\circ}\text{C}$  i višim, očekivati utrošak od oko  $50 \text{ kWh/m}^3$ . Odnos između utroška električne energije i stepena povećanja temperature sveže betonske mase je linearan i karakteriše ga odnos:

$$\Delta t = 1,68 X - 1,85 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (11.1)$$

u kome je promenljiva  $X$  izražena po jedinici obrađenog materijala ( $\text{kWh/m}^3$ ). Ovakav odnos se mora posmatrati u kontekstu brzine podizanja temperature pa je tabelom 11.14 dat rashod energije ( $\text{kWh/m}^3$ ) u zavisnosti od trajanja režima. Posebno je važno istaći činjenicu da se, za razliku od drugih metoda iz ove "porodice", zagrevanje ugrađenog betona izvodi u uslovima potpune nezavisnosti režima rada od varijacije elektro-fizičkih karakteristika svežeg betona koje su izuzetno velike i brze tako da u metodama sa direktnim kontaktom grejača i mase nameću kratka vremena obrade. U ovom slučaju beton se može zaštititi od dejstva temperaturnog



šoka, uzrokovanog kontaktom sa hladnom metalnom oplatom ili armaturom, jednostavnim uključivanjem induktora nekoliko minuta pre unošenja mase u opladne forme. Za ocenu može da posluži i *Besser*-ova procena da su pri istom trajanju elektro-progrevanja i indukcionog postupka rashodi energije ovog drugog neznatno veći.

Tabela 11.14

neophodno $\Delta t$ betona ( $^{\circ}\text{C}$ )	dužina zagrevanja sveže betonske mase (min)			
	5	10	15	20
30	312	156	105	78
40	415	208	140	105
50	520	260	173	130
60	625	312	215	156
70	730	365	245	183

Ukoliko usvojimo da je  $\Delta t = 36^{\circ}\text{C}$  temperaturna razlika koju treba savladati (ista kao za "termos" metodu), a zagrevanje ( $t_{bp} - t_a$ ) traje 10 minuta (preporuka je 10 - 15 minuta) prema Tabeli 11.14 se interpolacijom dobija utrošak energije  $31,20 \text{ kWh/m}^3$  koji se (32) zbog gubitka toplote (rad na gradilištu) uvećava za 25%. Sama procedura proračuna je ovde značajno pojednostavljena (u odnosu na RILEM-ova uputstva) prevashodno zbog, za tehnologa/analitičara, komformnijeg rada a veličina učinjene greške (na usvojenom nivou tačnosti računskih veličina) ne utiče bitnije na ocenu metode:

( 39,00 )

## F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

### f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

U toku primene ove metode nema troškova za cement koji bi, doziran u većoj količini, ubrzavao proces hidratacije.

( 0,00 )

### f.2. Troškovi za aditive specijalne namene

U toku primene metode nema utroškova specijalnih aditiva koji bi imali posebne efekte na proces očvršćavanja.

( 0,00 )

**f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije**

Kao što je u analizi prethodnih kriterija rečeno nema potrebe za izradom oplate posebnih termičkih svojstava. Ono što, u vezi sa oplatom, predstavlja problem je različita dužina perioda hlađenja betona u njoj. Nema raspoloživih podataka koji bi dali mogućnost za celovitiju analizu uticaja tipa i karakteristika oplate na kvalitet betona očvrslog pri standardnom režimu zagrevanja. Sa druge strane, zbog drastično bržeg režima hlađenja krajeva nosača koji se obrađuje treba povećati nominalnu dužinu indukcionog kalema za 15-20 cm (na obe strane) tako da dejstvo polja bude ravnomernije. Slične efekte daje progušćenje namotaja u krajnjim petinama dužine nosača. Prednost metode leži u činjenici da se oprema može primeniti veliki broj puta. Na temperaturama nižim od  $-15^{\circ}\text{C}$  klasičnu oplatu treba zaštititi sa bar 40 mm mineralne vune (ekvivalent) a za metalnu oplatu sloj izolacije se penje na 60 mm. Zbog svega ovoga ocena nije veća od:

( 0,00 )

**G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE****g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode**

U pogledu zaštite zagrejanog betona od dejstva termo-šoka postoji potreba za istim nivoom i načinom zaštite kod svih metoda u kojima dolazi do veštačkog zagrevanja ugrađenog betona; ocena:

( 0,35 )

**g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode**

Poznate efekte primarnog očvršćavanja na niskim temperaturama ( $5^{\circ}\text{C}$ ) metoda koristi veštačkim održavanjem željenog nivoa  $t_b$ . Ovo se ostvaruje povremenim uključivanjem induktora na svakih 10 - 15 minuta u toku prvih sati nakon ugrađivanja betona. Iako postupak donosi više krajnje čvrstoće i manje prslina termički obrađene mase tih 10-15 uključivanja podrazumeva gotovo neprekidno prisustvo tehničkog osoblja što nesumnjivo poskupljuje rad. Pored toga kontrola temperature betona mora biti obavljena za svaki

radni ciklus oko 15-20 puta: u fazi zagrevanja svaki sat (ukoliko je brzina zagrevanja iznad  $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$  kontrolu treba vršiti svakih pola sata) i u fazi hlađenja na svaka 3 sata.

( 0,85 )

### g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Indukciono zagrevanje kao najvažniji deo operativne faze obuhvata izotermno održavanje ugrađenog betona. Periodično uključivanje i isključivanje *grejača* u toj fazi može biti automatizovano u cilju održavanja režima zagrevanja-hlađenja u dopuštenim granicama ali bi takvi uredaji bili vrlo skupi jer bi, osim temperature betona, morali meriti i stalne promene temperature vazduha i na osnovu ustanovljenog gradijenta donosili korektivne odluke. Stoga je prisustvo kvalifikovanih radnika nezamenljivo ali i generator određenog broja grešaka u radu. Polazeći od *maturity* koncepta može se ipak varirati dužina zagrevanja i temperatura zagrevanja čime se u velikoj meri obezbeđuje elastičnost procesa i neosetljivost na neke nepreciznosti u radu. Stoga je sumarni indeks pouzdanosti odraz odlika procesa (1,00 + 0,80) odnosno:

( 1,80 )

## 11.1.7. METODA PRIMENE TERMO-OPLATE

### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

#### a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta

Razvoj metode je u SSSR-u bio relativno brz obzirom da se od prvih ideja do industrijski pravljenе opreme (1965-70.god) čekalo samo nekoliko godina. Danas postoji preko 20 konstruktivnih oblika niskotemperaturnih *grejača* a usavršavanje je deo svakodnevne prakse. Tako se i došlo do formi kod kojih se u perifernoj oblasti panela (promenom razmaka grejnih žica) ostvaruje 15-20% viša temperatura u odnosu na centralnu zonu i time kompenziraju gubici nastali na spojevima termoaktivnih ploča. Sam napor da se

oplata iskoristi kao izvor toplote proizilazi iz činjenice da kod betonskih konstrukcija cena oplata ide i do 15% od ukupne cene konstrukcije, pa je neophodno smanjiti sve dopunske radove na utopljavanju nosača (klasičan "termos"), odnosno instaliranju opreme za unošenje toplote putem "dubinskih" elektroda - grejača. Čak i u takvim slučajevima se, pri oštrijim ambijentalnim uslovima javlja potreba za kombinovanjem pomenutih sa drugim metodama. Tako kao alternativne kombinacije dolaze (termos + elektro-zagrevanje betona pre ugrađivanja) ili (elektro-zagrevanje mase sa akceleratorima i antifrizima) ili neka slična, hibridna metoda. Utrošak energije po jedinici mere zagrevane površine nije samo funkcija termičkih karakteristika ugrađenog betona već i dimenzija i oblika grejne ploče. Ne ulazeći u detaljnija objašnjenja i analize poznatih eksperimentalnih rezultata treba reći da su pravougaone forme (odnos dimenzija 1:2) malo efikasnije od ostalih ali se iz tehničkih razloga uglavnom primenjuju ploče dužine 120 cm i 180 cm, čija širina varira od 50-60 cm ( $\Delta = 10$  cm) pa se komparativne prednosti donekle gube. Za razliku od sličnih postupaka ovde je dozvoljena temperaturna razlika betona (u trenutku skidanja termo oplata) i vazduha najviše  $20^{\circ}\text{C}$  (za  $M_p \leq 5$ ), odnosno  $30^{\circ}\text{C}$  (za  $M_p \geq 5$ ). Međutim, da bi se beton uopšte smeo ugraditi mora se zagrejati podloga (obično od nearmiranog betona MB15) za šta se troši značajno dug period vremena i velika količina toplote. Tabela (11.15) daje pregled ovih veličina za različite temperature vazduha ( $t_a$ ) i module površina:

Tabela 11.15

$t_{\text{vaz}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	brzina zagrevanja ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )			$t_{\text{max}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	trajanje zagrevanja (h)		
	$M_p \leq 4$	$4 \geq M_p \leq 8$	$M_p \geq 10$		$M_p \leq 4$	$4 \geq M_p \leq 8$	$M_p \geq 10$
-15	8	10	15	45	4	3	2
-25	6	8	12	35	8	5	3
-35	4	6	10	25	12	7	4

Ono što predstavlja posebnu komparativnu prednost ove u odnosu na slične metode je mogućnost maksimalno efektivnog uključenja



egzotermalne toplote u proces termičke obrade, kao i mogućnost ravnomernog emitovanja toplote usled čega dolazi do iskorišćenja svih efekata ubrzane hidratacije pod dejstvom povišene temperature a tome se i teži. Metoda zaslužuje visoku ocenu:

( 1,00 )

#### a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi

Primena pločastih, prenosnih, grejnih tela nije u domaćoj praksi dobila adekvatan tretman. Ovo najviše stoga što su, za primenu metode, neophodna velika investiciona ulaganja u oplatne grejače a domaće firme nisu (zbog niske akumulativnosti) spremne da uđu u proces osvajanja i unapređivanja postupka kroz svakodnevnu praksu.

( 0,00 )

#### a.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

Svaka radna organizacija koja bi krenula u nabavku potrebne opreme mora računati sa izuzetnim teškoćama kako u pogledu obezbeđenja potrebnih sredstava tako i u pogledu realizacije kupovine. Poznata oprema je sa područja SSSR-a i u principu je proizvodi više proizvođača ali je poseban problem prilagođavanje primenjenih standarda materijala i režima rada domaćim uslovima. Većina vitalnih delova termo-ploča je patentirana pa bi i pribavljanje prava na korišćenje, za slučaj ulaska u proizvodnju vlastitih formi, zahtevalo dodatna ulaganja. Činjenica je da na domaćem tržištu postoji većina alternativnih materijala ali je složenost same opreme (posebno merno-kontrolnih uređaja) obeshrabrila sve eventualne pokušaje.

( 1,00 )

### B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

#### b.1. Primenljivost za različite tipove nosača

Sama metoda ne pokazuje značajnije tehničke probleme kod obrade različitih tipova nosača ali *Besser* preporučuje da se pri zagrevanju debljih nosača temperatura perifernih slojeva ne podiže

iznad  $40^{\circ}\text{C}$ , odnosno maksimalna temperatura bude  $\max t_b = 80^{\circ}\text{C}$ . On posebno važnim smatra gradijent porasta temperature u zaštitnom sloju betonskog nosača i limitira ga na  $0,15^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  kako bi sprečio pojavu prslina.

( 0,95 )

### b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima

Metoda je dobra u relativno blažim klimatskim uslovima (do  $-20^{\circ}\text{C}$ ), ali već i u graničnoj zoni ovog područja (koje je usvojeno kao merodavno za rangiranje) treba preduzimati brojne profilaktičke mere zaštite sveže betonske mase (primena aditiva, zagrevanje smeše...), što metodu gura u grupu "hibridnih" kojima se ovde ne bavimo, ali na nižim temperaturama dopunske mere postaju gotovo nezaobilazne pa je ocena metode:

( 0,30 )

### b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

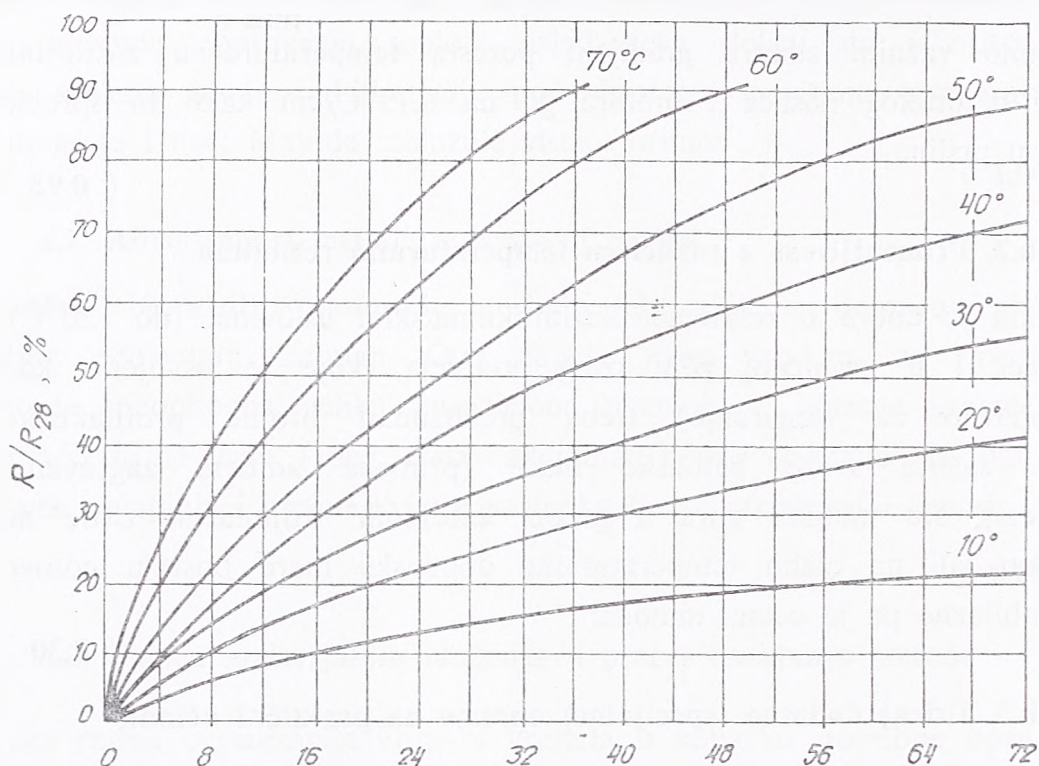
Jedna od slabijih strana ove veoma atraktivne metode je njena zavisnost od sposobnosti opreme za zagrevanje da obradi željenu količinu ugrađenog betona. Za razliku od metoda elektro-zagrevanja sveže mase u specijalnim kadama, gde se na promenu praktičnog učinka može reagovati relativno lako, ovde se zbog dugog režima zagrevanja reaguje samo nabavkom novih količina termo-oplatnih elemenata i instaliranjem dodatnih uređaja za napajanje. Određena redundantnost svih složenijih tehnoloških sistema, pa time i ovog, umanjuje samo delimično opisane negativne efekte.

( 0,50 )

## C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

### c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće $b_{krit}$

Funkcionalnu zavisnost brzine očvršćavanja od vremena termičke obrade i radne temperature daje familija krivih na slici 11.2. koje važe za beton MB20 spravljen od portland cementa. Očito je da se nisko-temperaturnim režimima ne mogu, u tehnološki opravdanom period zagrevanja, ostvariti adekvatni stepeni čvrstoće. Tako je



slika 11.6 - Dijagram brzine očvršćavanja betona (MB 20) pri različitim temperaturama termo-obrade (109)

betonima MB30 pri  $t_b = 20^{\circ}\text{C}$  potrebno 44 sati sarevanja, što oplati dozvoljava samo 100 radnih ciklusa godišnje, a za MB40 se vreme zrenja skraćuje na 26 sati (realizuje se 30%  $R_{28}$  neophodnih za početak skidanja oplata) ali nas ni to ne zadovoljava iz istih razloga. Treba reći da je metoda, u tehno-ekonomskom pogledu, vrlo osetljiva na promenu radnih parametara. Tako, sniženje temperature obrade dovodi do određenog produženja proizvodnog ciklusa čime nameće potrebu da se, u cilju očuvanja željenog dnevnog učinka, dodatno investira u nove komplete oplata i oplatnih grejača. Prema tome svaka, pa i naizgled minorna, tehnološka promena mora biti kompleksno vrednovana pre neposrednog sprovođenja u delo.

( 0,50 )

### c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće $b_{28}$

Ekstrapolacijom vrednosti datih prethodnim dijagramom dobijaju se orijentaciona vremena realizacije računskih čvrstoća ali se to, na



žalost, odnosi isključivo na režime termalne obrade sa visokim temperaturama ( $t_b \geq 50^{\circ}\text{C}$ ). Prema brzini sazrevanja materijala (sve u skladu sa maturity funkcijom za zadatu vrstu cementa) može se zaključiti da se ova čvrstoća može dostići za oko 2 nedelje nege a to donosi ocenu:

( 0,45 )

### c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

Primena termo-oplate stvara vrlo uravnoteženo temperaturno stanje u samom nosaču koje zbog primenjenih gradijenata rasta temperature u kontaktnoj zoni nemaju neželjenih propratnih efeketa ove vrste.

( 0,00 )

## D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

### d.1. Ukupni utrošak radne snage

Metoda zahteva da se pre početka ugrađivanja sveže betonske mase izvrši zagrevanje podloge pa je i udeo ljudskog rada time uvećan. Obzirom da je utrošak radne snage u direktnoj zavisnosti od strukture oplate i opreme angažovane tehnološkim postupkom to se

Tabela 11.16

POKAZATELJI	ZAGREVANJE TERMO-OPLATOM		DUBINSKO ZAGREVANJE ELEKTRODAMA	
	$M_p = 5$	$M_p = 2$	$M_p = 5$	$M_p = 2$
Utrošak energije	100	112	117	112
Utrošak radne snage	100	59	169	125
Trajanje ciklusa *	100	113	62	97
Troškovi izvođenja	100	51	225	120

) - Bez uračunavanja troškova za beton i armaturu

može reći da je rad na postavljanju oplate za 20% manji nego kod sličnih metoda (recimo "termos" metode). A kada su u pitanju radovi na demontaži, oplatne ploče za termo-obradu traže 2,5 puta manje rada od prosečne "termos" oplate. Uporedni odnos (pri čemu je za etalon uzeto 100%) nekih karakterističnih parametara dveju



alternativnih metoda daje i Tabela 11.16. Karakteristična vrednost ovog atributa je povezana sa utroškom norma-časova za oplatu nekog nosača koji ima moduo površine  $M = 3,5$  pa je "ocena":

( 3,05 )

#### d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage

Praktična primena tehnološke opreme može biti racionalna jedino ukoliko se radnici prethodno, na kraćem kursu, upoznaju sa karakteristikama procesa proizvodnje. Naglasak mora pritom biti stavljen na pažljivu manipulaciju termo-elementima (tablama) koje usled neadekvatnog deponovanja i održavanja mogu brzo izgubiti upotrebnu vrednost. Ovi elementi su, zbog svoje slojevitosti, daleko osetljiviji na udar od klasične oplata pa ne sme biti dopušteno grubo odvajanje. Opisani odnos prema opremi mora postati deo svakodnevne prakse, u protivnom metoda postaje krajnje neracionalna i nekonkurentna.

( 0,50 )

#### d.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika

Obzirom da se primenjuje radni napon od samo 60 V nema neposrednih opasnosti po zdravlje radnika a dimenzije grejača i težina termo aktivnih panela (oko  $40 \text{ kg/m}^2$ ) dozvoljava laku manipulaciju.

( 0,35 )

### E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

#### e.1. Troškovi energije za zagrevanje komponenata betona

Kao i u toku primene drugih sličnih metoda kod kojih se sveža masa priprema u fabrici od prethodno zagrejanih komponenata i ovde ima troškova ove vrste. Usvojicemo, na osnovu opisanih relacija, da je utrošak energije kao za "hladne" betone:

( 13,00 )

#### e.2. Troškovi energije zagrevanja svežeg betona

U toku primene metode nema ove vrstetroškova.

( 0,00 )

## e.3. Troškovi energije zagrevanja ugrađenog betona

Po analogiji sa ostalim postupcima zagrevanja i ovde se javlja potreba za intenzivnijim zagrevanjem pri oštrijim temperaturnim uslovima. Da se pritom mora voditi računa i o obliku nosača, odnosno modulu površine njegovog preseka pokazuje i tabela:

Tabela 11.17

$t_a$ (°C)	snaga angažovanog grejača ( $W/m^2$ ) ukoliko je $M_p$				
	2-4	4-6	6-8	8-10	$\geq 10$
-20	600	700	800	900	1000
-25	650	750	850	950	1100
-30	700	800	900	1000	1100
-35	800	900	1000	1100	1200

Ruski autor navodi da se (pri  $t_a = -19^\circ C$ ) za zagrevanje debelih zidova ( $d = 60-80cm$ ) troši  $45 kWh/m^3$ , za temelje samce  $35 kWh/m^3$  i za pločaste nosače oko  $25 kWh/m^3$ . Kao "zajednički imenitelj" datih podataka treba uzeti podatak da *termoreaktivna grejuća oplata* koja se koristi u Rusiji ima snagu  $0,4 - 1,5 KW/m^2$ . Ovu veličinu treba množiti modulom površine preseka da bi se dobio utrošak energije po jedinici zapremine ( $m^3$ ). Koliko je parametara koji utiču na cenu (utrošak) energije pokazuje i Tabela 11.18 u kojoj je data i

Tabela 11.18

TROŠKOVI	BROJ CIKLUSA OBRTA OPLATE					
	25	35	45	50	55	60
$M_p = 2$	18	23	25	26	27	28
$M_p = 6$	70	80	90	95	100	105

promena troškova zagrevanja (obračunata za  $10^3 m^3$  betona) u odnosu na povećanje broja obrta oplata na nosaču određenog poprečnog preseka (zadato  $M_p$ ). Troškovi su dati u indeksnim poenima pa ih je lako upoređivati. Očit je drastičan skok cene obrade pri prelasku iz grupe *masivnih* u grupu *razudenijih* poprečnih preseka ali ne treba zaboraviti da se usled proporcionalnog pada troškova za ovde

primenjenu oplatu zbir indeksnih pokazatelja zadržava (za određeni tip preseka i visok broj ciklusa) na gotovo istom nivou. Stoga se procena vrednosti metode po ovom kriterijumu zasniva na podatku da se pri  $t = -20^{\circ}\text{C}$  za ploče troši oko  $25 \text{ kWh/m}^3$ .

( 25,00 )

## F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

### f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator

Iako se primenom specijalnih vrsta cemenata i pojačanim doziranjem mogu ostvariti određeni pozitivni efekti ne može se smatrati da oni u slučaju ove metode imaju svoje značajnije tehnološko opravdanje. U literaturi (87) ima i preporuka koje za sve masivne konstrukcije (čiji proces hladenja prati dostizanje 20% projektovane marke betona) određuju cemente sa 50-60%  $\text{C}_3\text{S}$ , 4-6%  $\text{C}_3\text{A}$  i dodacima zgure i pepela u količini ne većoj od 10%. Primenu pucolanskih portland cemenata treba ograničiti samo na slučajeve kada je to nedvosmisleno zatraženo projektom.

( 0,00 )

### f.2. Troškovi za aditive specijalne namene

U toku primene ove metode nema troškova za aditive koji bi imali posebne efekte po proces ubrzanog očvršćavanja betona.

( 0,00 )

### f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

Rashodi za pomoćne materijale su gotovo zanemarljive ako se ima u vidu relativno kratak eksploatacioni vek termoaktivnih ploča kod kojih se, usled cikličnog zagrevanja-hladenja, javlja korozija grejača. Naime, ovakav režim rada uzrokuje migraciju vlage i pojavu nekih hemijskih reakcija koje u sprezi sa neuravnoteženim toplotnim koeficijentima linearnog širenja izazivaju razaranja grejnih tela.

( 0,50 )

## G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

### g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode

Nakon primerene termo-obrađe beton je u velikoj meri sposoban da primi sva opterećenja uzrokovana termo-šokom ili velikim gradijentom promene temperature. Međutim brzina hlađenja mora biti u granicama koje zavise od opredeljujućeg modula površine:

- za konstrukcije sa  $M_p > 10$   $t_b < 12^{\circ}\text{C/h}$
- za konstrukcije sa  $6 \leq M_p \leq 10$   $t_b < 5^{\circ}\text{C/h}$
- za konstrukcije sa  $M_p < 6$   $t_b < 2^{\circ}\text{C/h}$

U svakom slučaju sazrevanje se mora nastaviti u uslovima koji ne ugrožavaju ostvarenje projektovane čvrstoće na pritisak  $R_{28}$

( 0,35 )

### g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode

Ravnomernost zagrevanja dopušta veliki stepen komoditeta izvršilaca jer ne iziskuje periodičan rad na aktiviranju grejača pa time u potpunosti opravdava epitet "samoregulirajućeg".

( 0,15 )

### g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Kod ove metode je značajan problem regulacija temperaturnog režima rada termo-oplate obzirom da se zbog izloženosti vetru intenzivne promene njegovog pravca i intenziteta odražavaju na neravnomernom zagrevanju betona. Zato treba izvršiti dodatnu, sekundarnu zaštitu fronta rada ili suziti polje primene na konstrukcijske elemente manje osetljivosti t.j. manjeg modula površine. Pored toga, kao važno pitanje pouzdanosti opreme ostaju bimetalne sklopke kojima se prekida rad u trenutku dostizanja neke maksimalno dopuštene temperature. U ZND-a se mogu nabaviti kvalitetni prekidači (izdržavaju preko 10000 ciklusa) ali problem potrebe za većom pažnjom ostaje. Sumarna ocena stepena "elastičnosti" ritma rada i automatizacije procesa je (0,90 + 0,95) odnosno:

( 1,85 )



U okviru poglavlja 11.1 su dati prošireni prikazi postupka primene skupa uredenih skala procene alternativa u *cold weather concreting* varijanti. Time je model dobio jednu od najvažnijih komponenti jer su datim skupom preslikane kvalitativne karakteristike tehnologija rada u kvantitativne veličine. No, iako skale u najvećoj meri teže objektivnom odražavanju interesa firme i njenog okruženja (a nose i neizbežnu dozu subjektivnosti) vidljiva je potreba širih zahvata i istraživanja prirode socijalnih, ekonomskih, ekoloških i drugih aspekata kriterija iz prikazanog skupa. Takva multidisciplinarna istraživanja su preduslov "objektivizacije" skala kako u oblasti tehnologija građevinskih radova tako i u svim drugim prilikama gde višekriterijumski problem treba analizirati u cilju izbora jedne, ili selekcije podskupa prihvatljivih varijanti rešenja. Zadatak te veličine i takvog društvenog značaja prevazilazi okvire teme koju je autor imao kao formalno ograničenje u toku rada, ali su pravci istraživanja trasirani kao deo neophodnih komentara u Poglavlju 10 i u sklopu obrazloženja usvojenih ocena u Poglavlju 11.

Metodološki prikaz systemske analize skupa zimskih metoda rada je iscrpan i dovoljan, pa bi takva analiza "letnjih" tehnologija bila nepotrebno ponavljanje. Pored toga, *hot weather concreting* zahteva određenu korekciju skupa kriterija i to kako u pogledu broja tako i u pogledu važnosti nekih među njima.

## 11.2. METODE BETONIRANJA U LETNJIM USLOVIMA

Kao podloga za vrednovanje nizova alternativnih metoda betoniranja betoniranja u posebnim uslovima usvojeno je "sito" od 21 kriterija grupisanih u 7 opisanih podskupova:

### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

- a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta
- a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi
- a.3. Stepem materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode

**B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI**

- b.1. Primenljivost za različite tipove nosača
- b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima
- b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak

**C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA**

- c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće  $R_{28}$
- c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće  $R_{28}$
- c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja

**D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE**

- d.1. Ukupni utrošak radne snage
- d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage
- d.3. Stepен opasnosti po zdravlje radnika

**E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE**

- e.1. Troškovi energije za grejanje komponenata betona
- e.2. Troškovi energije za grejanje svežeg betona
- e.3. Troškovi energije za grejanje ugrađenog betona

**F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA**

- f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator
- f.2. Troškovi za aditive specijalne namene
- f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije

**G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE**

- g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode
- g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode
- g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka

Hemizam procesa očvršćavanja u posebnim ambijentalnim uslovima se odlikuje odstupanjima od uobičajenih predstava o ponašanju većine komponenata betonske mešavine. Razlike se pokazuju kako promenama konzistencije mase tako i izmenom brzine realizacije projektovanog nivoa mehaničkih karakteristika. Stoga je faza nege betona ta koju treba tehnološki uobličiti da bi se moglo obezbediti pravovremeno skidanje oplata i održati projektovani ritam gradjenja. Međutim da bi se nega mogla primeniti neophodan je niz prethodnih postupaka u kojima se daje odgovor na pitanje međusobnog odnosa temperature betona, vrste i količine unetog cementa, odlika oplata i oblika

poprečnog preseka betoniranog nosača. Metode rada na niskim temperaturama su posebno osetljive na ograničenja brzine podizanja temperature i zahtevaju punu kontrolu režima zagrevanja u uslovima naglih promena hemijskih i fizičkih osobina betona. Za razliku od njih metode rada na visokim temperaturama zahtevaju širok spektar profilaktičkih mera i postupke aktivne regulacije sadržaja vlage u svežoj betonskoj masi. I pored naizgled nepremostivih razlika koje metode rada u posebnim uslovima dele na pomenute dve velike grupe prisutne su brojne, suštinske sličnosti tih tehnoloških postupaka. To su, pre ostalih:

- činjenica da se u metodama radi prevshodno o pokušaju *kontrole* termičkih procesa u i oko betonske mase,

- činjenica da se promene režima očvršćavanja odvijaju u kvazi-regularnim uslovima (proces je pod kontrolom neke tehnološke opreme koja pomaže da se dobije zadati "output" ),

- činjenica da se ipak najčešće kao medijum za aktivnu kontrolu pomenutog režima koristi *voda* u različitim agregatnim stanjima koja u procese očvršćavanja osim zapreminski ulazi i kao pokretač njegovog hemizma ali i kao nosač dopunske toplote,

- činjenica da su opisane metode *relativno kontrolabilne* jer se kao nezaobilazna komponenta mešavine javljaju i kompleksni hemijski dodaci, kao i

- činjenica da se svim tim tehnološkim postupcima želi brže i jeftinije dobijanje *pouzdanih* betonskih konstrukcija.

Iz ovoga je jasno da je komplet kriterija, koji bi bili relevantni kako za metode "cold weather concreting-a" tako i za "hot weather concreting", vrlo teško odrediti ukoliko se zahteva da se podrobno opišu različite prirode tih grupa metoda. Sa druge strane, gore prikazanih 7 podskupova obuhvata na zadovoljavajući način gotovo sve oblasti koje se u toku selekcije mogu učiniti interesantnim za razmatranje. Stoga je interesantna i analiza postojećih kriterija u svetlu zahteva "letnjih" metoda kao i eventualna formulacija novih ukoliko procena pokaže odgovarajuću potrebu. Ukratko, analiza bi se mogla svesti na sledeće:



### A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE

Ocena *razvijenosti metode sa tehničko-tehnološkog stanovišta* se relativno lako može dati za nekolicinu alternativnih postupaka mada se u regionima sa visokom dnevnom temperaturom vazduha i niskom relativnom vlažnošću razvoj tehnološke opreme za ove metode kreće velikom brzinom a ne postoje podaci ili analize koje bi njenu primenu (i rezultate) stavilo u kontekst ambijentalnih uslova i očekivanih učinaka. *Afirmisanost metoda u domaćoj praksi* je inače vrlo mala i svodi se na iskustvo koje su velike firme stekle radeći u projektima na Srednjem Istoku i severu Afrike tako da (imajući u vidu i prethodno rečeno) *stepen materijalnih ulaganja* ne može sa pouzdanošću biti procenjen.

### B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI

Kriterijum B.1 je ocenjivao *primenljivost za različite tipove nosača* a kako ovde imamo tretman komponenti i/ili sveže betonske mase ne postoji neka međuzavisnost metode i nosača. Kada je u pitanju *primenljivost u različitim temperaturnim režimima* podela intervala od 20 - 60°C se mora svesti na dva podintervala; od 20 - 40°C i od 40 - 60°C jer u oblasti tehnologije rada na visokim temperaturama i nema izraženih razlika u efektima primenjenih metoda. Ono što se na temperaturama iznad 40°C gotovo neminovno sledi je "blendiranje" metoda čime se (kao i kod "zimskih" postupaka) izlazi iz okvira tzv. "diskretnih" prelazaka iz jedne u drugu grupu i ulazi u zonu iterativnog izbora najbolje i to na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja. Što se tiče *uticaja dodatne opreme na praktični učinak* mora se reći da je on izuzetno veliki kod postupaka koji rade na bazi supstitucije vode ledom, a da je zanemarljiv kod metoda sa isključivom primenom aditiva i metoda sa tečnim nitrogenom.

### C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Kriterijum *brzine dostizanja kritične čvrstoće* nije od značaja a isto tako se ni *brzina dostizanja računске čvrstoće* ne može



prihvatiti kao neki parametar relevantan za vrednovanje. Poznato je, naime da se negom pod uslovima vrlo bliskim žarkim klimatima ( $t_a \geq 40^{\circ}\text{C}$ , r.v. = 95%) dobija najmanje 40%  $R_{28}$  već nakon jednog dana nege (83) a da se celih 70% sigurno dobija nakon 7 dana. Što se tiče *pada čvrstoće* on se može očekivati kao posledica i tehnoloških imeperfekcija pa treba zadržati ovaj kriterijum i njegovu već datu skalu. Podaci iz literature (radovi *Gauthier*-a i *Regourd*-a) pokazuju da se najveći pad (oko 30%  $R_{28}$ ) može očekivati pri temperaturama očvršćavanja od  $60^{\circ}\text{C}$ , ali i na nešto nižim treba računati sa podbačajem čvrstoće pa skalu kriterijuma možemo prilagoditi oceni efekata primene date metode u različitim ambijentalnim uslovima.

#### D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE

Svi kriterijumi iz ove grupe treba da zadrže svoje mesto a i skale, formirane za ovde detaljnije razmatrane "zimske" postupke, mogu biti prihvaćene kao dovoljno precizne.

#### E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE

Očito je da se posmatrana tehnologija ne oslanja na značajniji utrošak "energije" ali ona se ipak troši kako za *hlađenje komponenata* tako i za *hlađenje svežeg i/ili ugrađenog betona* pa bi kao "utrošak" i deo tehno-ekonomskog bloka kriterija morala zadržati svoje mesto u strukturi ali bi je trebalo svesti na jedinstvenu meru - utrošak energije. Ovo stoga što se rad ne može ograničiti na određeno doba dana (noći) gde bi, recimo nega, bila obavljena u doba niže tarife a i inače se teži organizaciji betoniranja u noćnim smenama kada je ambijentalna temperatura niža a nema i pogubnog uticaja kratkotalasnog zračenja dnevne svetlosti na tamne delove oplata.

#### F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA

U okviru ove grupe se mora zadržati samo *utrošak za aditive specijalne namene* (gde bitnu razliku u odnosu na "standardnu namenu" čini *količina* utrošena za ostvarenje željenih efekata -

njihova primena je i inače neophodna pri radu u standardnim uslovima) i *utrošak pomoćnih materijala* gde se misli prevashodno na folije koje smanjuju evaporaciju i pomoćna sredstva za zaštitu fabrike betona, deponije agregata i silosa za cement od prekomernog zagrevanja. Cement se "ne koristi" kao vrsta katalizatora jer on to "već jeste" obzirom da se blendiranjem PC-a zgurom dobijaju vezivne komponente niske toplote hidratacije čijom *standardnom* primenom počinju sve metode "*hot weather concreting-a*" a i efikasnost ostalih faza tehnologije je značajno veća. Poznato je i da "kod temperatura negovanja od 40°C, dakle kod povišenih temperatura, čist Portland cement u betonu daje brži rast čvrstoće samo do starosti od 1,5-2 dana; daljim povećanjem starosti brzina rasta čvrstoće kod ovog betona osetno pada u odnosu na beton sa Portland cementom sa dodatkom" (83).

#### G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE

I u letnjim metodama su *zaštita betona, kontrola* i naravno *pouzdanost procesa* važni kod ocene kvaliteta posmatrane varijante pa je neophodno zadržati kako kriterijume tako i sve njihove skale za ocenu metoda rada. Priroda kriterija iz ove grupe je gotovo nezavisna od ambijentalnih uslova u kojima se rad izvodi. Kako je rast čvrstoće funkcija i kvaliteta nege u prvim satima očvršćavanja to treba favorizovati onu metodu koja *podrazumeva* intenzivnu kontrolu u prvih 6-12 sati negovanja. Treba konstatovati da se tretman agregata (izuzetno važnog činioca za dobijanje trajnog, kvalitetnog betona male vodopropustljivosti) ne pominje navedenim kriterijumima, ali upravo zato što jako utiče na svojstva sveže betonske mase agregat zahteva posebnu tehnološku liniju sposobnu da kontroliše njegove tehnološke parametre. Tako u upotrebu ne sme biti pušten agregat čija je apsorpcija vode veća od 2,5% , kao ni mešavine koje sadrže frakcije značajno različitih koeficijenata termičkog širenja. Stoga se može smatrati da se sve metode "*hot weather concreting-a*" uporeduju pod uslovima koji vodu i agregat, kao komponente mešavine, podrazumevaju istim kao što su

u "normalnim" uslovima rada. U tom okviru nalazi se i ograničenje u pogledu maksimalne količine rastvorenih neorganskih sastojaka, a posebno je važno u uslovima gde se tehnička voda priprema posebnim u postrojenjima za prečišćavanje.

Generalno posmatrajući neke metode "letnjeg" betoniranja su daleko osetljivije na tzv. "sitne" nekorektnosti izvodača radova ili neke zahteve Projektanta objekta nego što su to "zimске". Tako recimo u CIRIA preporukama (75) stoji da treba sprečiti "ugradivanje betona u debelim slojevima, primenu armiranog betona koji se može kvasiti u toku eksploatacije, nagle promene poprečnog preseka nosača... pa čak i sve nepotrebno komplikovano" ! Ovakav pristup značajno obara značaj tehnologije same metode betoniranja a u korist kompleksnih mera pripreme i razrade projektne dokumentacije i izvođenja grupe pripremnih radova. Stoga višekriterijumsko vrednovanje metoda rada i rangiranje alternativa mora biti stavljeno u kontekst projektnog zadatka za razradu tehničke dokumentacije i predstavljati podlogu za pisanje "uputstava o merama koje moraju biti preduzete u toku izvođenja radova". Relativno uzak opseg uticaja metode rada ne sme uticati na inženjersku spremnost da analitičkim postupkom izdvoji onu - koja najviše odgovara. I kada se radi o broju alternativa "hot weather concreting" donosi manji izbor. U optičaju je uglavnom pet osnovnih varijanti, sa:

1. - hladenjem vode (i/ili agregata) za izradu mešavine,
2. - supstitucijom dela (ohladene) vode usitnjenim ledom,
3. - primenom tečnog nitroгена za hladenje vode i/ili agregata
4. - direktnim ubrizgavanjem tečnog nitroгена u mešalicu,
5. - primenom aditiva za rad na visokim temperaturama,

a kao podvarijante se javljaju kombinacije prve i četvrte metode, i druge i četvrte metode. Za pripremu vode se prevashodno koriste *chiller*-i sa vazdušnim hladenjem. Utrošak energije za hladenje (po prvoj metodi) u velikoj meri zavisi od postrojenja za hladenje. Za hladenje agregata postoji nekoliko postupaka (videti sl.7.1) a svi



za oduzimanje toplote koriste vodu kao medijum. Primena nitrogena je sve rasprostranjenija obzirom da je cena dosta povoljna (prema cenama iz 1989. god. oko 1,5 \$/m<sup>3</sup>°C) pri čemu u analizi troškova treba voditi računa da se utrošak tečnog nitrogena drastično menja u zavisnosti od toga da li se radi u dnevnoj ili noćnoj smeni, u zimskim ili letnjim mesecima žarke klime, jer je on srazmeran padu temperature koji se želi ostvariti. Ovo još jednom potvrđuje ulogu kompleksnih organizaciono-tehničkih mera kod redukcije troškova za realizaciju investicionog projekta.

Ogromne količine leda koje se u toku dana moraju proizvesti traže adekvatnu opremu za čuvanje i distribuciju obzirom da veličina sa kojom zrna leda ulaze u mešalicu definiše vreme njegovog topljenja i reagovanja sa cementom. Za ovu vrstu opreme je pouzdana američka "North star" tehnologija no zahteva znatnija investiciona ulaganja pa se problem ponekad rešava i postrojenjima u vlastitoj izvedbi. Bez obzira u kom obliku ulazio u mešavinu led usporava formiranje kvalitetne mase pa taj efekat treba adekvatno vrednovati u okviru kriterijuma B.3. Pored toga ukupna cena može primenom nitrogena za oko 40% biti smanjena u odnosu na varijantu sa ledom, pa se balans može postići samo srazmerno nižim troškovima za nabavku opreme. Na smanjenju troškova se mogu postići značajniji rezultati ukoliko se za hlađenje primene *toplotne pumpe*. One za razmenu toplote mogu da koriste bilo rečni tok (ili jezero, ili podzemne vode) bilo vazduh a za svoj rad angažuju jeftinu električnu energiju u toku noći (to bi, u slučaju uvođenja u analizu takve alternativne metode betoniranja imalo za posledicu razdvajanje kriterija grupe E). Pumpe su, prema nekim podacima objavljenim u časopisu *Concrete construction* (feb., 1992) spustile troškove hlađenja na samo 1,5% cene koju traži tehnologija na bazi tešnog nitrogena, a u slučaju primene za zagrevanje one su skoro 4 puta jeftinije od kotlova koje zagreva prirodni gas.

Svesni da sva dodatna oprema, na određeni način, remeti pouzdanost



procesa tehnolozi su dosta davno usmerili napore ka dobijanju onih aditiva koji delimično ili u potpunosti mogu neutralisati probleme betonskih radova na temperaturama iznad 35°C. U početku je pokušao napor sa poznatim retarderima i plastifikatorima ali je vrlo brzo istraživanje usmereno ka testiranju nove generacije aditiva. Njima su postignuti izvanredni rezultati tako da se primenom Z/33 dobija masa obradljiva i na temperaturama višim od 50°C. Testiranjem ovih aditiva u američkim i arapskim pustinjama dobijeni su impresivni rezultati koje nijedna od opisanih tehnologija nije ni pokušavala da dosegne:

- dozvoljena je upotreba morske vode i morskog agregata,
- dozvoljena je upotreba svih, pa i običnog Portland cementa,
- razvoj procesa hidratacije se usporava 12 sati tako da masa svežeg betona kvalitetno očvršćava na temperaturi višoj samo par stepeni od ambijentalne,
- skupljanje takvog betona je za oko 50% manje od klasičnog,
- jedna od 18 različitih neorganskih komponenti ovog hemijski modifikovanog cementa Z/33 uklanja i površinsku rđu i vrši zaštitu nanošenjem neorganskog polimera koji sprečava razvoj korozije,
- nega takvog betona je posle prva 24 sata - nepotrebna,
- čvrstoća na pritisak ( $R_7$ ) je oko 40% veća od čvrstoće koju ima beton bez Z/33, a i računaska čvrstoća ( $R_{28}$ ) je blizu 20% veća,
- trajnost betona je povećana zahvaljujući između ostalog i smanjenoj površinskoj apsorpciji koja je posledica razvoja procesa sporije hidratacije ali i malog *slump*-a svežeg betona (do 20 mm) u kome nakon ugrađivanja ne ostaje puno pora.

Na osnovu svega rečenog postaje jasno da se dalji razvoj metoda iz grupe za *hot weather concreting* može očekivati u oblasti primene tečnog nitroгена i specijalnih cemenata pa se u tom smislu i skale za vrednovanje stepena zadovoljenja uslova postavljenih kriterijem moraju tako formirati da favorizuju ove postupke; ili se može dati novi kriterijum u grupi A koji bi u proces selekcije uneo i uticaj *sposobnosti za brzu primenu tehnoloskih inovacija*.

## 12. IZBOR OPTIMALNE METODE RADA

### 12.1 ALGORITAM ZA SELEKCIJU METODA

Na osnovu izloženih mogućnosti selekcije i rangiranja metoda rada u posebnim uslovima formiran je algoritam koji, na osnovu analize međusobnih odnosa parova alternativnih metoda izdvaja one među njima koje dominiraju po većini zadatih kriterijuma. Algoritam je obuhvatio osnovne principe ELECTRE metode ali im je nadogrudio i mogućnost uvođenja preference donosilaca odluke. Time je metoda iz oblasti višekriterijumske optimizacije dobila mogućnost preciznog izdvajanja i onih tehnoloških postupaka koji zadovoljavaju širok spektar zahteva različitih priroda pojave. Algoritam ima nekoliko koraka i ostavlja mogućnost iterativnog rada uz izmenu (korekciju) strukture preference a oblikovan je kao program pogodan za obradu na personalnim računarima.

1. Pre početka formalne analize program daje formalno obaveštenje o svojim performansama i efektima primene, uz neophodnu ogradu da je rezultat u velikoj meri pod uticajem subjektivne procene samog analitičara koji i unosi osnovne podatke, ocene... Na početku proračuna treba formirati matricu odlučivanja ( $P$ ) u skladu sa skalama vrednosti odgovarajućih kriterija. Ovaj deo proračuna može ići i direktno u vidu matrice koja se učitava a može biti generisana na osnovu unete grupe skala kod kojih se (u vidu maski) postavlja niz pitanja na koja se odgovara unošenjem oznake koja stoji uz prihvaćenu opisnu i/ili kvantitativnu ocenu iz skalom predviđene liste mogućnosti. U konkretnom slučaju biće 7 "radnih" alternativa sa 21-im kriterijem a formiran je sistem za 10 alternativnih metoda. Članovi matrice ( $P$ ) su dati sa dve decimale.

2. Naravno, da bi program "znao" koji je kriterijum "cost" (3, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) a koji "benefit" (1, 2, 4, 5, 7, 8, 21) prirode to mu treba reći već na početku,

pri učitavanju rednog broja kriterija. Ova odrednica je suštinske važnosti za kasniji rad i prilikom modifikovanja skala ili pojave novih kriterijuma mora dosledno biti poštovana. Razlika "benefit" i daleko brojnijih "cost" kriterija je u postupku normalizacije za koji je posebno važno da li za članove matrice  $P$  važi "što više to bolje" ili "što više to gore".

3. Da bi se u toku rada mogla vršiti simulacija izostanka podataka proverene tačnosti (jedne vrednosti ili grupe vrednosti za neki od kriterija) predviđena je mogućnost "markiranja" tih veličina čime se eliminišu iz proračuna za tu kombinaciju parametara. Ovim se postupak rangiranja svodi na skraćenu matricu  $E$ , samo sa članovima ujednačenog nivoa tačnosti, i dobija mogućnost kontrole uticaja izostavljenih podataka na rang vrednovanih metoda.

4. Prema poznatim pravilima se vrši normalizacija članova matrice odlučivanja  $P$  kako bi se dobila bezdimenzionalnost vektora a to su

$$\bar{p}_{ji} = p_{ji} (\sum p_{ji}^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\bar{p}_{ji} = 1 - \frac{p_{ji}^- - p_j^-}{p_j^+ - p_j^-}$$

Ovim korakom selektira se najveća ( $p_j^+$ ) i najmanja ( $p_j^-$ ) vrednost među članovima koji pripadaju istom kriteriju. Pomenuta razlika u postupku normalizacije podrazumeva da je prvi izraz za *benefit* dok drugi važi za *cost* kriterije.

5. Za dobijanje radnog vektora ( $w$ ) težinskih koeficijenata treba uspostaviti hijerarhijski red među alternativama dodeljivanjem ocena njihovom međusobnom odnosu (vidi 8.6.3.). Alternative su već poznate a ocenjuju se ocenama 1 - 9 pri čemu ocena 1 odgovara samo slučaju podjednake važnosti posmatranih alternativa, a ocena 9 odgovara slučaju kada nam je jedna od alternativa apsolutno bolja od druge. Postupak daje simetričnu matricu. Da bi se olakšalo ovo

uporedivanje parova alternativa formira se maska u kojoj su dati nazivi alternativa (sa rednim brojem iz spiska), spisak ocena prema Saaty-ovoj metodologiji (uz napomenu da parne, meduvrednosti služe za kompromisne odluke) zajedno sa opisom odnosa i oznakom člana pored koga treba uneti usvojenu ocenu. U okviru programa se na isti način formiraju težinski koeficijenti zadanog skupa kriterija. Na taj način se preferenca, koju *decison maker* unosi u postupak vrednovanja odražava na relativnoj važnosti kriterija a moguća je analiza težinskog udela pojedinih podskupova kriterija (ima ih ukupno sedam) na celokupan stav pri odlučivanju.

6. Na osnovu Saaty-evog principa formira se matrica odnosa (F) i uz pomoć Lagrange-ove funkcije (8.42) "preslikava" u matricu (G). Svi njeni članovi se formiraju prema sledećim poznatim pravilima:

$$G \cdot w = m$$

gde su:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n, \lambda)^T$$

$$m = (0, 0, \dots, 0, 1)^T$$

G - matrica  $(n+1)/(n+1)$  čiji su članovi:

$$\text{za } i = j : \quad g_{ij} = (n + 1) + \sum_{j=i}^n a_{ji}^2 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{za } i \neq j : \quad g_{ij} = - (a_{ij} + a_{ji}) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{odnosno} \quad g_{k, n+1} = g_{n+1, k} = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

$$g_{n+1, n+1} = 0$$

a iz sistema homogenih jednačina se izdvajaju vrednosti težinskih koeficijenata. Za korektan proračun treba prethodno normalizovati članove matrice (F). Dakle, rešavanjem sistema jednačina dobijamo vrednosti članova vektora (w) koje odgovaraju položaju "idealne" tačke. Sam vektor težinskih koeficijenata seta metoda ima oblik:

$$w_n^T = (w_{n1}, w_{n2}, \dots, w_{nm})^T \quad (m = 10)$$



a u tom obliku se dobijaju i težinski koeficijenti skupa kriterija

$$w_x^T = (w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn})^T \quad (n = 21)$$

Neka dublja analiza stava *decision maker*-a prema oblasti celokupne tehnologije rada u ekstremnim klimatskim uslovima bi mogla dati uzročno/posledične veze težinskih koeficijenata metoda i vrednosti članova matrice odlučivanja ( $p_{ij}$ ) za "najteže" kriterijume. Autoru ona nije bila "direktno na putu" tako da taj aspekt uticaja nije u radu detaljnije razmatran. Takode je interesantan odnos težinskog koeficijenta neke metode ( $w_{mj}$ ) i težinskih koeficijenata kriterija ( $w_{kj}$ ) koji takvu metodu najviše favorizuju ili je čine inferiornom unutar skupa razmatranih alternativa. U tom kontekstu se javlja i mogućnost za istraživanje *najjeftinijih* poboljšanja tehnologije za koja određena metoda rada postaje podjednako vredna (istog ranga) ili čak bolja od od neke druge, sada superiorne metode. Očigledno je da se time ulazi u *novi nivo* optimizacije koji direktno koristi rezultate ovog rada i služi za generisanje upravljačkih akcija. Ta vrsta optimizacije zahteva podrobnije (naravno i eksperimentalno) istraživanje ekonomskih posledica mogućih akcija obzirom da čitavi podskupovi kvalitativnih kriterija moraju imati *cenovnik kvaliteta* koji će eksplicitno pokazati veličinu ulaganja u njegov rast. Ovaj postupak bi verovatno stavio pod sumnju predložene skale ocena jer su one i date kako bi izrazile *ocenu* kvaliteta, ali bi rezultati i te provere najverovatnije potvrdili utvrđeni (i u skale ugrađeni) nelinearan odnos ocene i kvaliteta pa bi *kalibracija skala* postala najvažniji rezultat tog istraživanja. Sve ove analize pokazuju da su mogućnosti razvoja aplikacija ovog rada veoma velike.

7. Da bi se u slučaju pojave više ( $r$ ) lica, sa takvom odgovornošću da je njihov stručni stav o važnosti datih težinskih koeficijenata potrebno uzeti u obzir, svakome od njih treba dodeliti koeficijent relativne važnosti ( $\alpha_r$ ) a rezultujuću vrednost koeficijenata daje:

$$w_{ij}^* = \sum_r \alpha_r w_{ij}$$

Na osnovu dobijenih vrednosti sledi postupak množenja članova  $p_{ij}$  matrice  $P$  odgovarajućim težinskim koeficijentima ( $w_{ij}$ ) tako da se dobijaju vrednosti:

$$p_{ij}^* = p_{ij} w_{ij}^*$$

U programu su kao težinski koeficijenti korišćeni koeficijenti  $w_{ij}$  iz vektora  $w^T$  jer je smatrano da o skupu kriterija mogu biti dati precizniji sudovi nego o kvalitativnom odnosu unutar skupa metoda rada. Argument je da donosiocima odluke, u zavisnosti od položaja na hijerarhijskoj lestvici, ne moraju biti nužno poznate tehničke i/ili tehnološke karakteristike tehnologija rada ali im mora biti definisan *vlastiti stav* o tome koji od kriterija (unutar nekog od mogućih parova kriterija) smatraju važnijim.

8. Na osnovu pomenutog pravila određuju se svi indeksi saglasnosti

$$c_{kl} = \sum_{j \in C} w_j$$

što znači da je indeks saglasnosti  $c_{kl}$  jednak zbiru svih težinskih koeficijenata pridruženih članovima skupa saglasnosti  $C_{kl}$  a u tom skupu su samo kriteriji po kojima je alternativa (k) bolja od neke alternative (i) i što je on brojniji to je alternativa (k) bolja (u normalizovanom kriterijumskom prostoru) od alternative (i).

$$\begin{bmatrix} - & c_{12} & \cdots & c_{1I} \\ c_{21} & - & \cdots & c_{2I} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{I1} & c_{I2} & \cdots & - \end{bmatrix} = C$$

Svaki član matrice zadovoljava uslov da je  $0 \leq c_{kl} \leq 1$  jer su sve vrednosti  $w_j$  normalizovane, a elementarna je činjenica da zbir dva simetrična člana ( $c_{kl}$  i  $c_{lk}$ ) daje jedinicu. Matrica saglasnosti je odraz preference *decision maker-a* pa vrlo precizno pokazuje odnose metoda proistekle iz stepena zadovoljenja *najtežih* kriterija.

9. Na adekvatan način se formira i matrica nesaglasnosti koristeći pravila 8.23 i 8.24 ali prethodno za svaki kriterijum treba odrediti  $d_j^{\max}$  kao najveću razliku vrednosti dobijenih upoređivanem članova matrice  $P$  koji su proizašli iz vrednovanja skupa metoda po nekom kriterijumu ( $j$ ) iz skupa nesaglasnosti  $D_{kl}$  u kome su samo ti kriterijumi po kojima je metoda  $k$  manje poželjna od metode  $l$ , ili:

$$d_{kl} = \max_j \frac{|p_{jk} - p_{jl}|}{d_j^{\max}} \quad (j \in D_{kl})$$

$$d_j^{\max} = \max |p_{jk} - p_{jl}| \quad (k, l = 1, 2, \dots, 10)$$

I ovde je ispunjen uslov da je  $0 \leq d_{kl} \leq 1$  a matrica nesaglasnosti ima oblik:

$$\begin{bmatrix} - & d_{12} & \dots & d_{1I} \\ d_{21} & - & \dots & d_{2I} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{I1} & d_{I2} & \dots & - \end{bmatrix} = D$$

10. U ovom koraku treba utvrditi koje su vrednosti pragova indeksa saglasnosti ( $\bar{c}$ ) odnosno indeksa nesaglasnosti ( $\bar{d}$ ) koristeći izraze

$$\bar{c} = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}} c_{kl}}{I(I-1)}$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}} d_{kl}}{I(I-1)}$$

ili ih usvojiti vodeći računa da "visok prag" podrazumeva manji broj selektiranih metoda. Iz ovoga proizilazi mogućnost variranja vrednosti praga u cilju dobijanja onog koji broj rangiranih metoda smanjuje za jedan, odnosno svodi skup na par dominantnih metoda.

11. Da bi se odredili svi članovi matrice agregatne dominacije (E) treba formirati dve matrice: dominantne saglasnosti (A), odnosno dominantne nesaglasnosti (B) tako da njihovi članovi zadovoljavaju gore zadate pragove, i odrediti presek ovih skupova. Pravila za određivanje članova matrice (A) su:

$$\begin{aligned} a_{kl} &= 1 && \text{ukoliko je } c_{kl} \geq \bar{c} \text{ , odnosno} \\ a_{kl} &= 0 && \text{ukoliko je } c_{kl} < \bar{c} \end{aligned}$$

a na isti način se na osnovu uslova:

$$\begin{aligned} b_{kl} &= 1 && \text{ukoliko je } d_{kl} < \bar{d} \text{ , odnosno} \\ b_{kl} &= 0 && \text{ukoliko je } d_{kl} \geq \bar{d} \end{aligned}$$

dobijaju članovi matrice (B) dok se članovi matrice (E) određuju prema pravilu "proizvoda" skupova:  $e_{kl} = a_{kl} \cdot b_{kl}$

Na osnovu pravila da vrednost člana matrice  $e_{kl} = 1$  znači da je za par alternativa (k,l) karakterističan odnos *dominacije* alternative k nad alternativom l, možemo lako izdvojiti set metoda čiji status dominacije nad bar jednom metodom ukazuje na njihovu - poželjnost. Struktura matrice E dopušta izdvajanje podskupa metoda podjednake, najveće poželjnosti i rangiranje unutar posmatranog skupa metoda.

## 12.2 ANALIZA NEKIH DOBIJENIH REZULTATA

Kod utvrđivanja težinskih vrednosti pojedinih kriterija su jako favorizovane one metode kod kojih se, nakon ugrađivanja betona, zahteva minimalna intervencija ljudske radne snage čime se utiče na viši rang metoda koje nemaju "petlji" u okviru tehnologije rada a prednost je data i postupcima sa minimalnim utroškom energije za ubrzano očvršćavanje betona. Kao podloga za zaključivanje izdvojen je set od 8 metoda:

- I. Metoda primene aditiva ("hladni beton")
- II. Metoda "termosnog" održavanja toplote
- III. Metoda prethodnog zagrevanja betona ("vrući termos")



- IV. Metoda elektro-dubinskog zagrevanja betona
- V. Metoda zagrevanja infra-crvenim zračenjem
- VI. Metoda zagrevanja betona indukcijom
- VII. Metoda zagrevanja betona termo-oplatom

za koje je opisanim postupkom vrednovanja na bazi skupa skala data Tabela 12.1 karakterističnih vrednosti usvojenih kriterija:

K O D	KRITERIJUM	METODA ZIMSKOG BETONIRANJA						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
A	a. 1.	1,00	1,00	0,80	0,90	1,00	0,80	1,00
	a. 2.	1,00	1,00	0,50	0,00	0,85	0,00	0,00
	a. 3.	0,35	0,00	0,90	0,35	0,70	0,35	1,00
B	b. 1.	1,00	0,90	1,00	1,00	0,95	0,05	0,95
	b. 2.	0,10	0,85	0,70	0,70	0,70	0,30	0,30
	b. 3.	0,00	0,15	0,50	0,85	0,15	1,00	0,50
C	c. 1.	0,00	0,50	0,85	1,00	1,00	0,50	0,50
	c. 2.	2,00	1,00	1,00	0,70	0,70	0,70	0,45
	c. 3.	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
D	d. 1.	3,90	3,65	3,85	5,15	3,50	5,15	3,05
	d. 2.	0,00	0,20	1,00	0,90	0,50	0,80	0,50
	d. 3.	0,35	0,00	1,00	0,90	0,35	0,35	0,35
E	e. 1.	13,00	22,20	13,00	13,00	22,20	13,00	13,00
	e. 2.	0,00	0,00	6,15	0,00	0,00	0,00	0,00
	e. 3.	0,00	0,00	3,90	21,80	16,80	39,00	25,00
F	f. 1.	0,50	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	f. 2.	1,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00
	f. 3.	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00	0,50
G	g. 1.	0,00	0,00	0,70	0,90	1,00	0,35	0,35
	g. 2.	0,00	0,15	1,00	0,85	0,50	0,85	0,15
	g. 3.	1,00	0,90	1,75	1,40	1,10	1,80	1,85

Kada su unutar skupa kriterija izvršena upoređivanja i vrednovanja prema Saati-ovoj metodologiji autor je u okviru testiranja modela formirao listu (vektor) vlastitih ("sirovih") ocena kriterija koja je imala celobrojne ocene u intervalu 1 - 10. Ova lista, iako nije dovoljno pročišćena ili eventualno data kao odraz šireg dijapazona ocena, precizno daje strukturu preference u odnosu na dati skup K i radi bolje preglednosti daje se sa podelom na grupe kriterija sa približno istom relativnom važnošću.

Tabela 12.2

b.1. Primenljivost za različite tipove nosača .....	10
b.2. Primenljivost u različitim temperaturnim režimima .....	10
a.3. Stepen materijalnih ulaganja u proces osvajanja metode ...	9
c.1. Brzina dostizanja kritične čvrstoće R KRIT .....	9
a.1. Razvijenost metode sa tehničko-tehnoškog stanovišta ....	8
c.2. Brzina dostizanja računске čvrstoće R 28 .....	8
d.1. Ukupni utrošak radne snage .....	7
g.3. Pouzdanost metode kao mera kontrolabilnosti postupka .....	7
c.3. Pad čvrstoće kao posledica ubrzanog očvršćavanja .....	7
b.3. Uticaj dodatne (specijalne) opreme na praktični učinak ...	6
e.3. Troškovi energije za grejanje ugrađenog betona .....	6
d.3. Stepen opasnosti po zdravlje radnika .....	5
e.1. Troškovi energije za grejanje komponenata betona .....	5
e.2. Troškovi energije za grejanje svežeg betona .....	5
g.2. Intenzitet kontrole tokom primene metode .....	5
g.1. Neophodnost zaštite betona nakon primene metode .....	4
d.2. Neophodan stepen dopunske edukacije radne snage .....	4
f.3. Troškovi pomoćnih materijala i dopunske termoizolacije ...	3
a.2. Afirmisanost metode u domaćoj praksi .....	3
f.2. Troškovi za aditive specijalne namene .....	2
f.1. Dopunski troškovi za cement primenjen kao katalizator ....	1

Očita je "naklonjenost" metodama koje se mogu primeniti u gotovo svim klimatskim uslovima, na gotovo svim konstrukcijskim sistemima i pritom, uz relativno mala finansijska ulaganja, mogu obezbediti brz ritam rada (kratak radni ciklus za oplatu). Kriterijumi kojima se prate dopunski troškovi imaju generalno malu važnost a u nešto boljem položaju je par kriterija koji se odnose na obuku i zaštitu angažovanih radnika. Ovaj stav ima svoje opravdanje u činjenici da se sistemskim merama (kursevima i proverama znanja) mogu održavati dovoljno dobre HTZ mere a za razvijene metode je obuka radnika pod nadzorom stručnjaka ionako svedena na period pripreme za građenje prvog objekta. Svedena po grupama kriterija prethodna tablica daje

Tabela 12.2

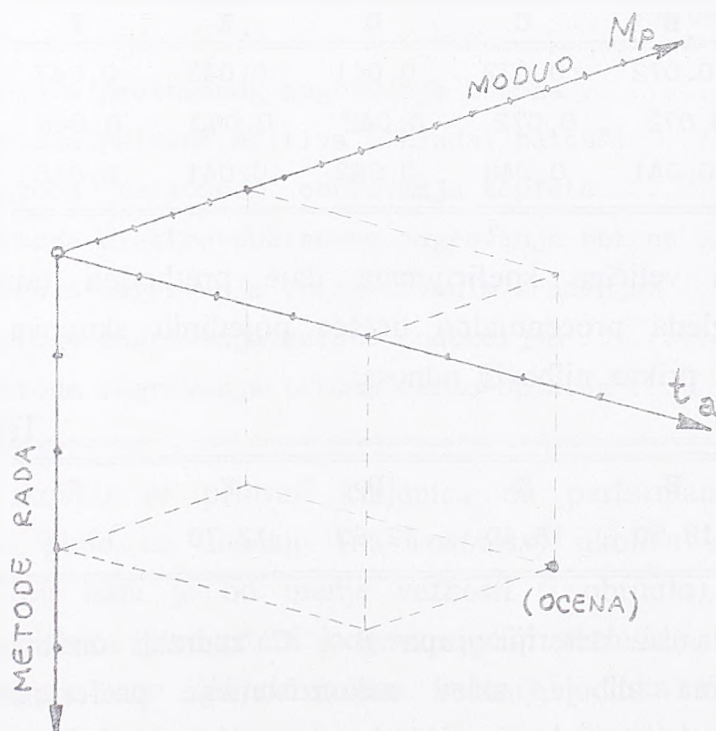
A. KRITERIJUMI OPŠTE OCENE .....	20
B. KRITERIJUMI OCENE PRIMENLJIVOSTI U PRAKSI .....	26
C. KRITERIJUMI OCENE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA .....	24
D. KRITERIJUMI O ANGAŽOVANJU RADNE SNAGE .....	16
E. KRITERIJUMI O UTROŠKU ENERGIJE .....	16
F. KRITERIJUMI O DOPUNSKIM TROŠKOVIMA .....	6
G. KRITERIJUMI PRATEĆIH EFEKATA METODE .....	16

novu tabelu koja ukazuje na činjenicu da *opšta ocena* metode može biti i važnija od kontrole "energetskih" troškova. Ovo proizilazi iz stava da se troškovi angažovane energije mogu valorizovati brzo (kroz cenu jedinice proizvoda) dok početna investiciona ulaganja moraju sačekati obimnije poslove kako bi se primenjena tehnologija otplatila. Visok rang kriterija grupe C je logična posledica stava autora (građevinskog inženjera) ali bi rang ove grupe verovatno bio zadržan i kod analize stavova drugih članova iz grupe *decision maker-a*, recimo nekog tehnologa ili mašinskog inženjera koji radi na održavanju opreme, jer značaj brzog i kvalitetnog očvršćavanja ne sme biti sporan. Afirmisanost metode (u kontekstu ostalih grupa kriterija) nije bila posebno značajna, mada ukoliko je niska često podrazumeva dugo popularisanje i animiranje budućih investitora.

Formirani model donošenja odluka je preslikavanjem u program dobio široke mogućnosti rangiranja alternativnih metoda kako u pogledu primenljivosti za različite ambijentalne temperature (preporučljiv je korak od  $10^{\circ}\text{C}$ ), tako i kod različitih modula poprečnih preseka nosača. Takvom, očito vrlo obimnom analizom dobili bi se rezultati (rangovi) koje iz praktičnih razloga treba svesti na sledeći skup ocena:

- 1 - Metoda se preporučuje za primenu,
- 2 - Rezultati primene su zadovoljavajući,
- 3 - Primenjivati u izuzetnim slučajevima,
- 4 - Ne preporučuje se primena metode.

Kao krajnji rezultat ove studije mogao bi se formirati i prostorni prikaz (sl. 12.1) u kojem bi dobijeni rezultati formirali "oblake" ocena čiju slojevitost bi, zbog diskretne promene vrednosti na osi ambijentalnih temperatura, bilo teško formirati ali bi poslužila u fazi brzog pretraživanja skupa metoda i odbacivanja inferiornih.



Slika 12.1 Trodimenzioni prikaz ocena metoda betoniranja različitih nosača i pod različitim temperaturama vazduha



Primena Saaty-eve metodologije ocenjivanja kriterija ili metoda se donosiocu odluke može pretvoriti u naporan zadatak jer ga dovodi u situaciju da, nemajući više od 9 ocena, postaje opterećen stanjem da istom ocenom mora vrednovati različite odnose unutar parova ili grupa alternativa. Iako skup osnovnih Saaty-evih ocena (1,3,5,7,9) izgleda dosta precizno obrazložen, pa time i primamljiv kao izbor, autor je u okviru vrednovanja odnosa dominacije unutar 210 parova kriterija, a na bazi osnovnog stava iskazanog ocenama kriterija iz Tabele 12.2, dao čitavu trećinu kompromisnih ocena (2,4,6,8). Ovaj odnos bi se dužim radom i daljim proučavanjem kriterija verovatno izmenio u korist kompromisnih ocena, ali zbog toga ne bi trebalo u skupu ocena povećavati izbor i uvoditi, recimo 20 ili 30 ocena. To prevashodno zbog male osetljivosti postupka za formiranje vektora težinskih koeficijenata koji, zbog uslova  $\sum w_j = 1$ , distribuiraju na svaki od brojnih kriterija srazmerno mali deo ukupne težine. Pravi

Tabela 12.4

	A	B	C	D	E	F	G
1	0,056	0,072	0,072	0,041	0,043	0,047	0,045
2	0,051	0,072	0,072	0,043	0,043	0,046	0,041
3	0,037	0,041	0,040	0,042	0,041	0,045	0,076

odnos dobijenih veličina koeficijenata daje prethodna tabela 12.3. Ukoliko se pogleda procentualno učešće pojedinih skupova kriterija dobija se sledeći prikaz njihovih odnosa:

Tabela 12.5

	A	B	C	D	E	F	G
%	14,40	18,50	18,40	12,60	12,70	13,80	15,20

koji pokazuje da su kriteriji grupa B i C zadržali dominaciju nad ostalim kriterijima ali je, usled nekonzistencije preference tokom vrednovanja *intenziteta* dominacije unutar parova kriterija, autor izazvao preraspodelu težina koeficijenata u korist grupa F i G dok je grupa A "pala" sa trećeg na četvrto mesto liste iz Tabele 12.3.

Ovakva iskustva pokazuju da *decision maker* mora utrošiti dovoljno vremena da svaki sud o međusobnom odnosu dvaju kriterija precizno odrazi njegov sud o intenzitetu dominacije jednog od njih. Međutim i samo nekoliko iteracija je dovoljno da se uoče i poprave greške nastale zbog nedovoljnog iskustva. Obzirom da se unošenje podataka može svesti na 210 osnovnih odnosa unutar kriterijumskog skupa to proces ukucavanja, analize i popravki finalizira matricu odnosa za oko 30-40 minuta, što zajedno sa ostalim operacijama ceo proces do dobijanja konačnog ranga metoda skraćuje na manje od sat vremena.

Sam algoritam ELECTRE podrazumeva u okviru indeksa saglasnosti  $c_{ij}$  iskazivanje uticaja preference donosioca odluke, dok se iz matrice odluka  $P$  dobijeni indeksi nesaglasnosti  $d_{ij}$  iskazuju ko *objektivna* razlika alternativa. Ovakvim "dvostranim" prilaženjem je dati skup metoda, osvetljen preferencom jednog donosioca odluke (autora) dao sledeći redosled metoda po rangu:

Tabela 12.6

Metoda prethodnog zagrevanja betona .....	1
Metoda primene aditiva ("hladni beton") .....	2
Metoda "termosnog" održavanja toplote .....	3
Metoda elektro-dubinskog zagrevanja betona ....	4
Metoda zagrevanja infra-crvenim zračenjem .....	5
Metoda zagrevanja betona indukcijom .....	6
Metoda zagrevanja betona termo-oplatom .....	7

Međutim, ukoliko se prihvati činjenica da performanse alternativa  $p_{ij}$  prividno gube na značaju (na  *vrednosti*) ukoliko se odnose na kriterijum koji nam je od manje važnosti (i obrnuto), tada članovi iz matrice odluka pomnoženi odgovarajućim težinskim koeficijentima ( $p_{ij} w_j$ ) postaju deo *subjektivizirane* matrice odluka  $P^*$ . Postupkom selekcije, a na osnovu iste metodologije kao u prethodnom slučaju, dobija se nešto drugačiji redosled metoda (vidi Tabelu 12.7) usled *vitoperenja* predstave o objektivnim razlikama performansi metoda.

Tabela 12.7

---

---

Metoda prethodnog zagrevanja betona .....	1
Metoda primene aditiva ("hladni beton") .....	4
Metoda "termosnog" održavanja toplote .....	5
Metoda elektro-dubinskog zagrevanja betona ....	2
Metoda zagrevanja infra-crvenim zračenjem .....	3
Metoda zagrevanja betona indukcijom .....	6
Metoda zagrevanja betona termo-oplatom .....	7

---

---

Ovo ukazuje na mogućnost daljeg istraživanja u pravcu testiranja uticaja dominantnih kriterija na ovu pojavu. Indikativno je da se dominantna metoda zadržava na svom mestu, kao i par inferiornih na kraju liste, ali je i veličina (broj) promena rangova značajna.

Celim postupkom vrednovanja metoda koji opisuju poglavlja 11 i 12 su obuhvaćeni slučajevi prevashodno slaborazudenih grednih nosača i stubova koje betoniraju pri ambijentalnim temperaturama od  $-20^{\circ}\text{C}$  i u uslovima vrlo slabog vetra. Procedura vrednovanja na bazi seta skala mora biti obnovljena za svaku sledeću kombinaciju ( $M_p$ ,  $t_a$ ) a pritom veliki deo ocena datih na bazi skala kvalitativnih atributa ostaje isti za veći broj kombinacija, što značajno ubrzava rad pri odlučivanju.

### 13. NAPOMENE I ZAKLJUČCI

Višegodišnje intenzivno bavljenje određenom problematikom donosi, u okviru mnoštva stečenih saznanja, i intimnu spoznaju o postojanju specifičnog "ličnog" odnosa istraživača i materije kojoj je posvetio deo svog kreativnog veka. Neka vrsta igre koju verovatno svaki istraživač oseća u vazduhu dok stoji pred sopstvenom sfingom tražeći pravu reč kao lek protiv bolnog neznanja daje draž mukotrpnom koraćanju sopstvenim stazama. Često, polazeći od osnovnih saznanja o nekom problemu, nakon mukotrpnog proučavanja njegovih brojnih aspekata shvatimo da nam ta stepenica spirale znanja nije donela ništa drugo do potvrdu poznate sustine i *oblak* novih činjenica koje verovatno ne služe ničem drugom tako dobro kao unutrašnjoj potrebi da uspešnije prodemo narednu etapu spirale. Tako i dolazimo na pomisao da pravi smisao mukotrpnih istraživanja nije u pronalaženju egzaktnog odgovora na pra-pitanje već u traganju za dodatnom motivacijom (koju donose one mrvice iz "oblaka") jer ona, sama po sebi, daje smisao svakog istraživanja.

Svođeci rezultate proučavanja na formu ovog rada autor je, svestan lažne predstave da se problem definitivno rešava jednim udarcem (a i tada ostaje dilema *čiji* je to udarac bio !), preferirao model koji ima mogućnost trajne konzervacije stečenih saznanja ali i elastičnost koja omogućava bezbolnu apsorpciju uticaja mnoštva parcijalnih odluka *decision maker*-a. Takav pristup je u stanju da svakom inženjeru, korisniku modela, ostavi mogućnost da iskoristi jedno od univerzalnih ljudskih prava - pravo na vlastitu odluku.

Iako savremeni tokovi razvoja proizvodnih procesa i u oblasti građevinarstva vode ka sve većoj industrijalizaciji betonski radovi u svom najvećem obimu ostaju prepušteni poluindustrijskim postupcima obrade koji se izvode na samom gradilištu. Takav način rada dovodi do vrlo velikog variranja mehaničkih i drugih



karakteristika očvršle betonske mase usled čega se javlja potreba za intenzivnijim održavanjem konstruktivnih elemenata takvih objekata. Kao posebno važan za proces obezbeđivanja projektovanog kvaliteta materijala javlja se uticaj klimatskih parametara: temperature, vlažnosti vazduha, vetra... Taj skup faktora poremećaja tehnološkog procesa deluje i pojedinačno ali i kao deo kompleksnog *stanja okruženja* u kome se proces građenja izvodi pa je potreba za analizom stepena njihovog uticaja uočena dosta davno i o toj temi je objavljen veliki broj radova. Nažalost, veliki broj promenljivih koje proizvodni proces podrazumeva nije dozvolio sistematsku analizu ponašanja varijabli u celom opsegu u kome se klimatski parametri javljaju. Ponašanje betona je posmatrano prevashodno u području takozvanih "normalnih" uslova, koji se obično karakterišu ambijentalnom temperaturom od 5 - 20°C, a vrlo široko područje izvan ovog intervala je ostalo "pokriveno" vrlo oskudnim preporukama.

Prema davnim istraživanjima (DGA - 1833) na teritoriji Jugoslavije oko 90% građevinske operative ima jaku potrebu za radom u zimskim uslovima, pri čemu je broj dana u godini kada se može raditi bez primene posebnih mera zaštite zavisi od nadmorske visine, i to za:

0 - 200 m.n.m.	240 dana
200 - 400 m.n.m.	229 dana
400 - 600 m.n.m.	211 dana
600 - 800 m.n.m.	200 dana
> 800 m.n.m.	150 - 190 dana

Prema istom izvoru, ukoliko se fiksni troškovi režije gradilišta u iznosu od 0,5 - 1,0% (mesečno) od investicione vrednosti objekta projektuju na oko 2,5 meseci prekida radova u zimskim uslovima, dobija se *potpuno nepotrebno* povećanje troškova od 1,25 - 1,50% na ukupnu investicionu vrednost koju, prema dosadašnjim iskustvima, dele i investitor i izvođač. Pritom investitor *knjiži* i gubitke usled kasnijeg aktiviranja izgrađenog objekta, a da ne govorimo o drugim poslovnim gubicima usled gubitka dela tržišta, moralnom otpisu ugrađene opreme...i.t.d.

Kako opisana problematika nije na adekvatan način razmatrana ni normativnim aktima ni posebnim propisima već dugo postoji potreba da se sopstvenim istraživanjima jugoslovenska praksa obogati kompletnijim saznanjima o specifičnostima betonskih radova koji se obavljaju u posebnim klimatskim uslovima. Istraživanja koja su do danas izvršena (IMS) nisu rasvetlila sve oblasti. Rad u "zimskim" uslovima (rad na niskim temperaturama) nema za cilj dokazivanje sposobnosti da se radi u otežanim uslovima već je posledica napora da se održi kontinuitet radova tokom cele godine. Ukoliko se poslu pristupa na sistemskoj osnovi a objekti projektuju za odgovarajuću tehnologiju tada zimski uslovi poskupljuju rad za samo 5 - 10% u odnosu na standardne uslove. Rad u letnjim uslovima se obavlja u, za izvršioce, daleko povoljnijim uslovima i sa podnošljivijim fiziološkim posledicama ali često biva neopravdano zapostavljen u okviru planiranja pripremnih radova. Obzirom da građevinske organizacije raspolažu stručnim kadrom i zadovoljavajućim nivoom materijalnih mogućnosti osvajanje novih metoda nije nepremostiv problem pod uslovom da se zna - koja će od metoda u određenim uslovima biti optimalna. Kako nije postojala metodologija za utvrđivanje vrednosti toliko različitih tehnoloških postupaka za izvođenje betonskih radova sama selekcija je prepuštena postupcima nepotvrđene ispravnosti. Stoga su za firme rezultati rada često nedovoljno stimulatívni za dalji razvoj tehnologije i uvećanje vlastitih potencijala pa ni ulaganja u istraživanja nisu dovoljna.

Polazne osnove ovog rada proizilaze iz činjenice da su metode rada u zimskim uslovima (*cold weather concreting*) suštinski različite od metoda betoniranja u letnjim uslovima (*hot weather concreting*) jer koriste drugačiju tehnološku opremu, sukobljavaju se sa drugačijim oblicima poremećaja u strukturi betonske mase i stoga primenjuju različite kompozicije betonske mešavine čije ponašanje nije posledica samo uticaja ambijentalnih uslova sazrevanja već i dejstva ingredijenata koji kataliziraju proces u željenom pravcu.

Uticao pojedinih proučavanih parametara na određene aspekte kvaliteta betona se menja u zavisnosti od okruženja u kome su promene tog parametra registrovane, tako da je neophodno utvrditi specifičnu važnost pojedinih promenljivih iz okruženja a samo za grupu dominantnih promenljivih analizirati kvalitet interaktivnog odnosa sa posmatranim parametrom i dobijene rezultate uneti kao elemente podobne za vrednovanje metoda rada.

U okviru rada su definisani psihološki i fiziološki uticaji različitih klimatskih područja na rezultate angažovanja radne snage i u skladu sa tim određena je oblast racionalne primene proučavane tehnologije. Brojni ACI i ASTM dokumenti daju preporuke za rad u uslovima visokih temperatura a niske vlažnosti, odnosno niske temperature a povećane vlažnosti vazduha ali je ogroman deo preporuka ostavljen za uobličavanje nacionalnim komitetima pa su neophodne određene smernice za njihovo definisanje u skladu sa potrebama i mogućnostima društva.

Hemizam procesa očvršćavanja u posebnim ambijentalnim uslovima odlikuju odstupanja od uobičajenih predstava o ponašanju većine komponenata betonske mešavine. Promene se manifestuju i promenama konzistencije mase i izmenjenom dinamikom ostvarivanja mehaničkih karakteristika. Stoga je faza nege betona ta koju treba tehnološki uobličiti da bi se moglo obezbediti pravovremeno skidanje oplata i održati projektovani ritam građenja. Adekvatan odgovor takvim zahtevima daje analiza međusobnog odnosa temperature betona, vrste i količine unetog cementa, odlika oplata i oblika poprečnog preseka betoniranog nosača a kako je i radni ritam zavisao od kontrolabilnosti delova tehnološkog procesa to praćenju navedenih parametara treba dati odgovarajući značaj. Metode rada na niskim temperaturama su posebno osetljive na ograničenja brzine podizanja temperature i zahtevaju punu kontrolu režima zagrevanja u uslovima naglih promena hemijskih i fizičkih osobina betona. Za razliku od njih metode rada na visokim temperaturama zahtevaju širok spektar

profilaktičkih mera i postupke aktivne regulacije sadržaja vlage u svežoj betonskoj masi. Nasuprot ovakvim stavovima stoje brojne, suštinske sličnosti ovde posmatranih metoda rada. To su, pre ostalih:

- činjenica da se u svim metodama radi o kontroli termičkih procesa u i oko betonske mase,

- činjenica da se promene režima očvršćavanja odvijaju u kvazi-regularnim uslovima (proces je pod "punom" kontrolom tehnološke opreme),

- činjenica da se kao medijum za aktivnu kontrolu tog režima najčešće (u različitim agregatnim stanjima) koristi voda koja, u procese očvršćavanja osim zapreminski ulazi i kao pokretač njegovog hemizma ali i kao nosač dopunske toplote ("hladnoće"),

- činjenica da su opisane metode relativno kontrolabilne jer se kao nezaobilazna komponenta mešavine javljaju i brojni i kompleksni hemijski dodaci, kao i

- činjenica da se svim tim tehnološkim postupcima želi postići isti cilj: brže i jeftinije dobijanje pouzdanih betonskih konstrukcija.

Ovakav pristup daje istraživaču slobodu da primenom raznorodnih kriterija komparira ove metode na metodološki identičan način i ne insistira na obavezi da se metode posmatraju samo u okviru njihovih izvornih grupa. Brojnost metoda koje su proistekle iz gotovo jednovjekovnog sukoba inženjera i tehnologa sa klimatskim faktorima uslovljava i pravi, adekvatan pristup svakog istraživača koji nastoji da ih sistematizuje, klasifikuje, analizira i vrednuje.

Sam problem i ne bi bio toliko veliki da su metode kroz vreme zadržale svoju "čistu" formu i obogaćivale je primenom novih materijala i efikasnijih načina dovodenja (oduzimanja) toplote ili uvođenjem opreme i postupaka koji bi olakšali rad i skratili vreme u kome proces negovanja traje. Međutim, kako se nova tehnologija u



početku primene vrlo pomno prati od strane visokostručnih, multidisciplinarnih timova, to je mnoštvo podataka o realnom delovanju metode u prirodnim uslovima (nosači su realnih dimenzija a ne modeli, promene temperature i vlažnosti su brže nego u "klima-komorama"... ) nužno vodilo stalnoj modifikaciji metoda ili odbacivanju njihove "samodovoljnosti" kao jednog od polaznih principa. Preciznije rečeno, metode se kombinuju, ukrstaju u cilju optimalnog korišćenja njihovih pojedinačnih kvaliteta i pritom gube *pojedinačnu odgovornost* za manjkavost u pogledu ponašanja sveže ili očvrsele betonske mase. Ovakve "hibridne metode" (poznate i kao "kobinovane") problem optimizacije, koji je po svojoj prirodi unapred definisan kao višekriterijalni, vode iz oblasti diskretnih veličina u oblast kontinualne promene nekih vrlo bitnih promenljivih ili kriterija. Naime, hibridne metode malom promenom jednog od ulaznih parametra (količine aditiva, brzine podizanja temperature, debljine elektrode...) proširuju oblast svog dejstva kako u pravcu većih modula površine tako i u smislu viših/nizih ekstremnih temperatura okruženja, a da se pritom važni ekonomski parametri malo ili nimalo ne menjaju.

Svest o složenosti problema povećava odgovornost istraživača (koji usvaja ili određuje veličine relevantne za zaključivanje) nagoneći ga da u mnoštvu referentnih izvora podataka pronade baš one karakteristike posmatrane metode koje se u gradilišnim uslovima, uz pomoć raspoložive opreme, mogu realizovati nezavisno od toga da li se u timu za izvođenje betonskih radova nalazi - doktor nauka, jer je masovnost betonskih radova i neophodna pouzdanost metode nezaobilazan faktor ocene. Selekcija metoda i odbacivanje nekih (zastarelih ili "zijskih" koje su zasnovane na korišćenju sunčeve energije) je jedan od načina za kvantitativno pojednostavljenje problema. Drugi od načina je izdvajanje oblasti efikasne primene neke metode u "trodimenzionalnom" prostoru vreme-temperatura-tip konstrukcije (reprezentovan je modulom površine). Pomenuti načini uvode u višekriterijumski postupak neizbežnu dozu subjektivnosti

koja se dalje multiplicira uticajem "trenutne važnosti" nekih od parametara ekonomske prirode (cena rada, cena materijala...) da bi kulminirao uvođenjem preference kao instrumenta za transformaciju n-dimenzionog prostora u koji se metode preslikavaju u svoj svojoj kompleksnosti.

Jedini pravilan način da se izade iz zone subjektivnog delovanja je izrada celovite tehno-ekonomske analize (za tip konstrukcije i klimatski režim u kome će ona biti izvedena) nekoliko dominantnih metoda uz uvođenje sopstvenih normativnih veličina i tržišnih uslova ograničenja (cena materijala, mogućnost nabavke, garancije u pogledu poštovanja dinamike isporuke...). U takvim okolnostima nije isključeno da, kao konačan izbor, ne bude usvojena naizgled superiorna metoda jer je jedan od nezaobilaznih faktora primene izabrane metode - vreme osvajanja nove tehnologije (pod uslovom da oprema bude izrađena ili isporučena na vreme), tj. obuke ljudstva da je primenjuju onoliko efikasno koliko je ona deklarirala kao standardni "output".

Kako je bitni element svih opisanih metoda - brzina izvođenja radova (broj "obrta" oplate i skraćivanje radnog takta utiču na ukupne finansijske efekte), to je, pored pomenute objektivnosti inženjera-donosioca odluke, neohodna i objektivnost polaznih parametara. Naime, služba plana i pripreme mora realno proceniti neophodnu brzinu građenja imajući u vidu sve aktivnosti koje tehnološki uslovljavaju izvođenje betonskih radova. Bez svrhe je osvajati tehnologiju čije će rapidno ubrzavanje izvršenja nekih planiranih radova imati kao glavnu posledicu - *veće vremenske rezerve posmatranih aktivnosti*.

Publikovani radovi domaćih i stranih autora (naučno-istraživačke teme, studije, magistarske i doktorske radove) pitanje trajnosti betonskih konstrukcija ponekad svode na *pojedine komponente* ove bitne karakteristike materijala: vodopropustljivost, otpornost na

dejstvo mraza, otpornost na agresivno dejstva soli i sl. Kako se u poslednjih 15-tak godina razvojem postupaka i metoda Teorije pouzdanosti otvaraju putevi ujednačavanja pouzdanosti elemenata jednog konstrukcijskog sistema, traže se i odgovori na pitanje "mere odstupanja od idealne tačke trajnosti" u multidimenzionalnom prostoru kvaliteta betona. Jednostavnije, ako veličina prslina ili poroznost materijala ne zadovoljavaju pojedinačne, stroge zahteve nacionalnih propisa, to ne mora ugroziti pouzdanost nosača (u koji je beton ugrađen) pridruženu određenom eksploatacionom periodu.

Mnoga ograničena iz oblasti tehnologije betonskih radova, posebno ona koja se odnose na početnu temperaturu sveže mase i na uslove negovanja, baziraju na bojazni da u predviđenom roku (15, 28 dana, 3 meseca) beton *neće dostići* projektovane vrednosti čvrstoće, bilo da su one izražene u procentima (40%, 70%), bilo u punom iznosu - a beton u takvim nosačima nikad u toku eksploatacije (ili sa vrlo malim stepenom verovatnoće) ne dostiže iskorišćenje nosivosti veće od 30%. Na ovako kompleksnim problemima moraju se angažovati uglavnom multidisciplinarni timovi sastavljeni od projektanata, tehnologa, iskusnih izvodača radova... koji će tehničke uslove za izvođenje pojedinih vrsta objekata učiniti primerenijim zahtevima eksploatacije i time omogućiti ekonomičnije korišćenje resursa. Jer, kako reče jedan istraživač "zašto da ne dozvolim da mi zid dobije i malo veće prsline ako će on samo - podupirati tapete".

U teoriji su poznati brojni postupci optimizacije ali je njihova praktična primena za optimizaciju proizvodnih procesa još uvek vrlo retka. Razlog treba tražiti i u činjenici da je potrebno izvršiti optimizaciju po čitavoj listi kriterija različitih priroda (dimenzija) usled čega sam postupak postaje *apriori* nepopularan. Stoga je primena višekriterijumske optimizacije ovde "organizovana" oko grupe osnovnih tehno-ekonomskih parametara kao *najatraktivnijih* ali je obuhvatila i niz drugih (socijalnih, psiholoških, organizacionih, ekoloških...) parametara čije bi

zanemarivanje u fazi selekcije metoda moglo doneti naknadne teškoće u realizaciji proizvodnog procesa. Kao posebno važni pojavili su se kriterijumi kvalitativne i kvantitativne ocene mehaničkih karakteristika očvrle betonske mase. Selekcija metoda na inferiorne i neinferiorne je stoga bila neophodan prvi korak na vrednovanju zadatih alternativnih metoda rada ali joj je pridodat mehanizam kojim se može precizno izvršiti primarna selekcija. Mehanizam je kao deo parametara obuhvatio i očekivane ambijentalne uslove u vreme izvođenja radova, tip konstrukcije i vrstu betona.

Sastavni deo procesa donošenja odluke je aktiviranje vlastitog iskustva i stavova formiranih ne samo u toku rešavanja problema tehnološke prirode već i u svakodnevnom životu. Stoga je donosioc odluke često nespreman da svoj sud iskazuje u kvantitativnom obliku već ga oblikuje kao *kvalitativan opis* stepena zadovoljenja postavljenog kriterija. Problem prevodenja "subjektivnih" ocena u "objektivne" se pokazao kao jedan od komplikovanijih. Ovo stoga što su, u javnosti prihvaćene opisne skale, posledica složenosti pojedinih kriterija čija kompleksnost "pokriva" nekoliko međusobno zavisnih karakteristika. Skale stoga donose opasnost od nejednakog vrednovanja iste pojave (jer se uz iskazane verbalizovane ocene ne podrazumeva isti *stepen kvaliteta*) pa postupak vrednovanja treba poveriti *specijalisti* čija se znanja zasnivaju na istraživanjima i bogatom ličnom iskustvu o manifestacijama koje se vrednuju.

Da bi se postupak optimizacije mogao na određeni način automatizovati i objektivizirati bilo je neophodno formirati *skale ocena* kojima će se oblast kvalitativnih sudova preslikavati u niz diskretnih ocena. Polazne pretpostavke da se predmetni problem optimizacije u gotovo svim svojim aspektima nalazi u oblasti koja dozvoljava ovakav tip preslikavanja kao i da su tako donete ocene, njihova apsolutna veličina i ovde usvojeni intervali njihovih vrednosti, prihvatljivi (logični) za donosioca odluke - pokazale su se tačnim.



Da bi se uspešno vršilo vrednovanje metoda rada po određenom kriterijumu za svaki od njih je bilo potrebno ustanoviti opseg vrednosti relevantnih za ocenu stepena zadovoljenja niza aspekata posmatranog kriterija. Skale mogućih ocena su tako oblikovane da odražavaju opštevažne društvene interese ili parcijalne interese izvodača radova ali pritom ostavljaju dovoljno prostora i slobode kako očitavanje neke ocene, zbog moguće nesigurnosti analitičara u vlastiti sud, ne bi bilo nekonformno ili čak izostavljeno.

Donosenje strateških odluka u uslovima multidimenzionalne analize i nepostojanja kompletne informacije o posledicama donetih odluka nameće potrebu uključenja većeg broja stručnjaka različitih profila čime se sistem vrednosti na kome bazira ocena zadovoljenja kriterija - rasplinjava; uvodi se veliki broj faktora koji su donosiocima odluke (pojedinačno) od ključnog značaja. Problem je stoga rešavan na način kojim se minimizira uticaj *zimskog* odlučivanja. Obzirom da su pomenute metode "zimskog" i "letnjeg" betoniranja bile tehnološki različite usvojen je model selekcije i rangiranja razmatranih metoda koji je u najvećoj mogućoj meri i sveobuhvatan kako bi usvojeni sistem vrednosti i skale ocena bili vremenom usvojeni kao *zajednička* merila pomenutog tima stručnjaka.

Predmet analize i usvojeni ciljevi su nametnuli višekriterijumsku optimizaciju rešenja problema izbora metode rada u posebnim klimatskim uslovima pri čemu je deo koji se bavi vrednovanjem zasnovan i na postavkama teorije rasplnutih skupova (*fuzzy sets*). Primena načela teorije donošenja odluke uključuje u određenim segmentima ovog rada i heuristički pristup čiji se uticaj na neobjektivnost konačne odluke mora svesti na opšte prihvatljivu meru. Rezultati do kojih se u toku analize problema dolazilo, sistem ocenjivanja alternativnih metoda rada i principi rangiranja su prilagođeni potrebama budućeg ekspertnog sistema koji će biti podrška stručnjacima iz prakse. Takav sistem se ne može očekivati uskoro ali bi neki od postojećih verovatno mogao biti prilagođen.

Formirane skale ocena imaju dobru analitičku podršku koja daje odgovore na brojna pitanja ne samo dosegnutog nivoa zadovoljenja kriterijuma, već i načina kojim bi to zadovoljenje bile podignuto na viši nivo. Time bi tehnološka priroda problema došla daleko više do izražaja, omogućilo bi se generisanje upravljačkih akcija a uloženi napor analitičara bi pokazao veću direktnu korist. U okviru ciljeva daljeg usavršavanja metode odlučivanja izdvaja se i istrživanje ekonomskih posledica akcija na unapređenju performansi određene tehnologije rada, obzirom da sada ne postoje cenovnici za određeni nivo kvaliteta. To bi podrazumevalo preispitivanje nekih skala, njihovu precizniju kalibraciju ali bi omogućilo određivanje najjeftinijih poboljšanja metoda rada. Obzirom na značaj strukture preference jasno je da bi tada upravljačke akcije bile usmerene na kriterije sa najvećom specifičnom težinom, čime bi zadatak fizički bio smanjen a rezultati pre dobijeni.

Dalje istraživanje ove kompleksne oblasti zahteva nove napore ali je zadovoljstvo koje je donela ova etapa dovoljna satisfakcija pa i motiv da se nastavi kretanje spiralom učenja.





# LITERATURA





1. Abu-Tair A.I.H.  
**"Hot weather concreting"**  
 Magistarski rad, Imperial College, London, 1985.
2. **"Admixtures"**  
 "Concrete international", The Construction Press, London, 1980.
3. Bamforth P.B.  
**"Mass concrete"**  
 Concrete Society Digest, No. 2, 1984.
4. Bell D.E., Keeney R.L., Raiffa H. (editors)  
**"Conflicting objectives in decisions"**  
 John Wiley & sons, Chichester, 1981.
5. Berhane Z.  
**"Evaporation of water from fresh mortar and concrete at different environmental conditions"**  
 ACI Journal, pp. 560-565, nov-dec 1984.
6. Berhane Z.  
**"The behaviour of concrete in hot climates"**  
 RILEM meeting for TC-94-CHC, Copenhagen, august 1991.
7. Birt J.C.  
**"Curing concrete - an appraisal of attitudes, practices and knowledge"**  
 CIRIA Report 43, London, feb. 1981.
8. Bitran G.R.  
**"Linear multiple objective problems with interval coefficients"**  
 Management Science, Vol. 26, No. 7, pp. 694-699, 1980.
9. Blockley D.i.  
**"The nature of structural design and safety"**  
 Ellis Horwood Limited, London, 1980.
10. Brock K.M.  
**"Handling and transporting concrete : time and temperature limitations"**  
 CIRIA Report 17, London, jan. 1970.
11. Carino N.J., Lew H.S.  
**"Temperature effects on strenght-maturity relations of mortar"**  
 ACI Journal, pp. 177-182, may-june 1983.
12. Carmichael D.G.  
**"Structural modelling and optimization"**  
 John Wiley & sons, New York, 1981.
13. Cochrane J.L., Zeleny M. (editors)  
**"Multiple criteria decision making"**  
 Univ. of South Carolina Press, Columbia, 1973.
14. **"Cold regions concreting"**  
 ACI Committee 306 - task group, "Cold regions construction", pp. 59-71

15. **"Cooling and insulating systems for mass concrete"**  
ACI Report, Manual of concrete practice, 1980.
16. **"Cold weather concreting"**  
ACI Journal, pp. 161-183, may 1978.
17. Čupić M.E., Rao Tummala V.M.  
**"Savremeno odlučivanje - metoda i primena"**  
Naučna knjiga, Beograd, 1991.
18. Delft A., Nijkamp P.  
**"Multi-criteria analysis and regional decision-making"**  
Martinus Nijhoff Social Sciences Div., Leiden, p. 135, 1977.
19. Dransfield J.M.  
**"Curing of concrete"**  
Symp. proc., Concrete Society, London, 1984.
20. Drenick R.F.  
**"Optimization and uncertainty"**  
Optimization techniques (J.Stoer - ed.), Vol. I, Springer-Verlag, Berlin, 1977.
21. Duckstein L.  
**"Multiobjective optimization in structural desing : the model choice problem"**  
New Directions in optimum structural design, John Wiley & sons
22. Eero K., Heikki K.  
**"Properties of hot concrete and its use in winter concreting"**  
Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, 1981.
23. Einhorn H.J., McCoach W.  
**"A simple multiattribute utility procedure for evaluation"**  
Multiple criteria problem solving (S.Zionts - ed.), Spr.-Ver., Berlin, 1977.
24. Evans G.W.  
**"An overview of techniques for solving multiobjective mathematical programs"**  
Management Science, Voi. 30, No. 11, pp. 1268-1282, nov. 1984.
25. Fishburn P.C.  
**"Utility theory"**  
Management Science, Vol. 14, No. 5, pp. 335-367, jan. 1968.
26. Frearson J.P.  
**"Cement properties and use for construction in hot countries"**  
Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, 1981.
27. Harrison T.A.  
**"Formwork striking times - methods of assesment"**  
CIRIA Report 73, London, oct. 1977.
28. Harrison T.A.  
**"Temperature-matched curing"**  
Symposium proc., Concrete Society, London, 1984.

29. **"Hot-weather concreting"**  
Portland cement association, 1976.
30. Hwang C.L., Yoon K.  
**"Multiple attribute decision making"**  
Springer-Verlag, Berlin, 1981.
31. Ichiki Y.  
**"Some experiments of electrical curing of concrete in cold weather"**  
RILEM Symp. "Winter concreting", Copenhagen, 1956.
32. **"Istraživanje i utvrđivanje postupaka i optimizacija metoda izvođenja betonskih radova u zimskim uslovima"**  
Naučno-istraž. proj., IMS i Građevinski fakultet, faze I, II, Beograd, 1988-89.
33. Kafry I.D.  
**"Building site applications of direct electric curing"**  
Concrete plant and production, pp. 325-326, sep. 1987.
34. Kayyali O.A.  
**"Effect of certain mixing and placing practices in hot weather on the strength of concrete"**  
Building and management, Vol. 19, No. 1, pp. 59-63, 1984.
35. Keeney R.L., Raiffa H.  
**"Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs"**  
(ruski prevod), Moskva, 1981.
36. Koehn E., Brown G.  
**"Climatic effects on construction"**  
ASCE Journal CM, Vol. 3., No. 2, pp. 129-137, 1985.
37. Koski V.  
**"Multicriterion optimization in structural design"**  
New directions in optimum structural design, John Wiley & sons, 1984.
38. Lawrence C.D.  
**"Permeability and protection of reinforced concrete"**  
C&CA, paper reprint 6/86, London
39. Lessard S., Aitcin P.C., Regourd M.  
**"Development of a low heat of hydration blended cement"**  
ACI Publication SP-79, Detroit, pp. 747-763, 1983.
40. L'Hermite R.  
**"Insufficiently known problems in concrete technology"**  
RILEM Symposium, Haifa, 1971.
41. Mironov S.A., Krylov B.A.  
**"Concrete with chloride salts in winter conditions"**  
RILEM Symp. "Winter concreting". Copenhagen, 1956.
42. Morinaga S.  
**"Curing method in hot climates (part IV)"**  
RILEM meeting for TC-94-CHC, Copenhagen, august 1991.



43. Matrosov V.M., Vassilyev S.N., Divakov O.G., Tyatushkin A.I.  
**"On technology of modelling and optimization of complex systems"**  
Modelling and optimization of complex systems (G.I. Marchuk - ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 220-239, 1978.
44. Munce B.R.  
**"Iced concrete for aircraft pavements at RAAF base "Derby"**  
Conc. Inst. of Aust., XIII Biennial conf., Brisbane, 1987.
45. Mustard J.N.  
**"Winter curing of concrete as related to the new Canadian standard"**  
ACI Publication SP-39, 1973.
46. Opricović S.  
**"Višekriterijumska optimizacija"**  
Naučna knjiga, Beograd, p. 143, 1986.
47. Opricović S.  
**"Programski paket VIKOR za višekriterijumsko kompromisno rangiranje"**  
SYMOPIS- 90, Zbornik radova, Kupari, pp. 663-666, 1990.
48. Opricović S.  
**"Kriterijumi odlučivanja u kompromisnom programiranju i metodi ELECTRE"**  
SYMOPIS- 83, Zbornik radova, Herceg Novi, pp. 359-369, 1983.
49. Orchard D.F.  
**"Concrete Technology"**  
Vol. 2, fourth ed., London, 1979.
50. Orr D.M.F., Hendry A.W.  
**"Concrete in hot countries"**  
Materials and structures, No. 49, pp. 49-54, 1979.
51. Popovics S.  
**"Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete"**  
ACI Journal, july-aug., pp. 650-657, 1986.
52. **"Proposed standard specifications for cold weather concreting"**  
ACI Journal, nov-dec., pp. 1043-1047, 1986.
53. Rous W.B.  
**"Fuzzy models of human problem solving"**  
**"Advances in fuzzy sets, possibility theory, and applications"** (Paul P. Wang ed.), Plenum Press, NY, 1983.
54. Ravina D.  
**"Retempering of prolonged-mixed concrete with admixtures in hot weather"**  
ACI Journal, pp. 291-295, june 1975.
55. **"Recommended practice for curing concrete"**  
ACI Journal, pp. 233-243, april 1971.

56. Ries B.  
**"Preparing hot concrete by injecting steam into the mixer"**  
 Modern concrete, pp. 38-47, July 1981.
57. **"RILEM recommendations for concreting in cold weather"**  
 Technical research centre of Finland, Espoo, 1988.
58. Rivett P.  
**"Principles of model building - the construction of models for decision analysis"**  
 John Wiley & sons, London, p. 136, 1972.
59. Rixom M.R., Mailvaganam N.P.  
**"Chemical admixtures for concrete"**  
 E.&F.N. Spon, sec. ed., London, 1986.
60. Roedes A.R.  
**"Admixtures"**  
 Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, 1981.
61. Rosenstrom S.  
**"Note on cooling of fresh concrete"**  
 Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, 1981.
62. Samarai M., Popovics S., Malhotra V.M.  
**"Effects of high temperatures on the properties of fresh and hardened concrete"**  
 Transportation Research Record, No. 924, pp. 42-56
63. Samir H.A-A., Mokdad A.K.A-Z.  
**"The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather"**  
 Materials & structures, No. 21, pp. 205-212, 1988.
64. Scanlon J.M.  
**"Curing concrete during hot weather"**  
 Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, pp. 107-114, 1981.
65. Scanlon J.M.  
**"Quality control during hot and cold weather"**  
 Concrete International, Vol. 2, No. 9, pp. 53-65, 1979.
66. Scanlon J.M., Ryan R.J.  
**"Accelerating admixtures for cold weather concreting"**  
 Concrete construction, March, 1980.
67. Shalon R.  
**"Report on behaviour of concrete in hot climate"**  
 Materials & structures, No. 49, No 62
68. Shalon R., Ravina D.  
**"Studies in concreting in hot countries"**  
 RILEM Symposium, Haifa, 1960.

69. Shirley D.E.  
**"Concreting in hot weather"**  
 Cement and concrete ass., Construction guide, 1986.
70. Siddal J.N.  
**"Analytical decision-making in engineering design"**  
 Prentice-Hall inc., New Jersey, 1972.
71. Steuer R.E.  
**"Multiple objective linear programming with interval criterion weights"**  
 Managements Science, Vol. 22, No. 3, pp. 305-316, nov. 1976.
72. Taylor W.H.  
**"Concrete technology and practice"**  
 McGraw-Hill, fourth ed., 1977.
73. **"Temperature and concrete"**  
 ACI Publication SP-25
74. **"Temperature effects on concrete"**  
 ASTM special technical publication 858, p. 178, 1983.
75. **"The CIRIA guide to concrete construction in the Gulf region"**  
 CIRIA Special publication 31, 1984.
76. **"The production of cool concrete in hot climate"**  
 Concrete Plant and Production, pp. 457-459, oct. 1983.
77. Tipier T.J.  
**"Handling"**  
 Int. sem. "Concrete in hot countries", Helsingor, 1981.
78. Vaulamo R., Tammiho P.  
**"Transport of fresh concrete under winter conditions"**  
 "Стройиздат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 2, Москва, 1975.
79. Venečanin S.  
**"Influence of thermal incompatibility of concrete components on durability"**  
 Arabian Jour. for Science and Eng., Vcl. 11, No 2, 1986.
80. Zeleny M.  
**"The theory of the displaced ideal"**  
 Multiple criteria decision making, Springer-Verlag, 1975.
81. Zionts S., Wallenius J.  
**"An interactive programming method for solving the multiple criteria problem"**  
 Management Science, Vol. 22, No 6, pp. 652-663, 1976.
82. Živković S., Domone P.  
**"Uticaj temperature negovanja na korelaciju čvrstoća - brzina ultrazvuka za ocenu čvrstoće betona male starosti"**  
 XVIII Kongres JUDIMK, Portorož, pp. 333-345, 1986.

83. Živković S.  
"Prilog istraživanju uticaja temperature i drugih relevantnih parametara na neka svojstva svežeg betona i belona male starosti"  
Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 1989.
84. Абрамов Б.С., Амбарцумян С.А., Бадеян Г.В.  
"Полимерные электронагреватели для греющих опалубок"  
Бетон и железобетон, No.10, 1985.
85. Арбенцев А.С.  
"Теория и технология бетонирования с электроразогревом смеси"  
"Стройиздат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 2, Москва, 1975.
86. Березовский Б.И.  
"Строительное производство в условиях севера"  
"Стройиздат", Ленинград, 1982.
87. Бессер Я.Р.  
"Методы зимнего бетонирования"  
"Стройиздат", ст. 164, Москва, 1976.
88. Бравчинский А., Токмаков И.А., Овчаров В.И., Цитрон М.Ф.  
"Строительство многоэтажных монолитнобетонных и каменных зданий в зимних условиях беспроегревным методом"  
"Стройиздат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 2, Москва, 1975.
89. Цветков В.В.  
"Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона"  
"Будьвельник", ст. 213, Киев, 1978.
90. Чехов А.П., Сергеев А.М., Дибров Г.Д.  
"Справочник по бетонам и растворам"  
"Будьвельник", ст. 213, Киев, 1983.
91. Данилов Н.Н., Наумов С.М., Гасамов К.А.  
"Кондуктивный разогрев бетонной смеси в технологии зимних работ"  
Бетон и железобетон, No. 5, 1982.
92. Гендин В.Щ., Кузьмин В.К.  
"Области применения способов зимнего бетонирования"  
Бетон и железобетон, No. 5, 1987.
93. Гендин В.Щ., Шевченко Э.К., Абрамов В.С., Покатилов В.П.  
"Зимнее бетонирование с применением токопроводящих покрытий"  
"Строй издат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 2, Москва, 1975.
94. Гендин В.Щ., Мягков А.Д., Кузнецов А.П.  
"Эффективная технология замоноличивания стюков с электропрогревом бетона"  
Бетон и железобетон, No. 2, 1979.



95. Головнев С.Г.  
"Технико-экономический анализ методов зимнего бетонирования"  
"Строй издат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 1, Москва, 1975.
96. Головнев С.Г.  
"Оптимизация методов зимнего бетонирования"  
Стройиздат, Ленинград, 1983.
97. Ицкович Л.С., Солдаткина М.Т.  
"Влагоотдача бетона после термообработки"  
Бетон и железобетон, Но. 11, 1983.
98. Клепов Э.М., Лемехов В.Н.  
"Оптимизация электротермообработки плит"  
Бетон и железобетон, Но. 5, 1985.
99. Королев К.М.  
"Приготовление горячих бетонных смесей "  
Бетон и железобетон, Но. 2, 1979.
100. Красновский Б.М.  
"Предварительный пароразгрев бетонных смесей в технологии зимнего бетонирования"  
Бетон и железобетон, Но. 3, 1985.
101. Крылов Б.А., Сергеев К.И., Филатов В.П.  
"Особенности возведения монолитных конструкций при отрицательных температурах"  
Бетон и железобетон, Но. 3, 1985.
102. Крылов Б.А., Ерошкин В.Н.  
"Критическая прочность бетонов к моменту замораживания"  
Бетон и железобетон, Но. 4, 1987.
103. Лагойда Л.В.  
"Зимнее бетонирование с использованием противоморозных добавок к бетону"  
Бетон и железобетон, Но. 9, 1984.
104. Ли А.И.  
"Использование электротермообработки при зимнем бетонировании монолитных конструкций "  
"Стройиздат", "Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию", Том 2, Москва, 1975.
105. Малинина Л.А., Работина М.В.  
"Тепловлажностная обработка бетонов с химическими добавками"  
Бетон и железобетон, Но. 11, 1986.
106. Миронов С.А.  
"Теория и методы зимнего бетонирования"  
"Стройиздат", ст. 700, Москва, 1975.
107. Старосельский А.А.  
"Электрокоррозия железобетона"  
"Будьвельник", ст. 164, Киев, 1978.

108. Шпынова Л.Г.  
"Бетон на безгипсовом портландцементе твердеющий при отрицательных температурах"  
Бетон и железобетон, No. 3, 1985.
109. Топчий В.Д.  
"Бетонирование в термоактивной опалубке"  
"Стройиздат", ст. 110, Москва, 1977.
110. Трембицкий С.М., Ли А.И.  
"Применение электроэнергии при тепловой обработке сборного железобетона"  
Бетон и железобетон, No. 3, 1985.
111. Тулемышев М.Ш.  
"Термообработка бетона в кассетах индукционными нагревателями"  
Бетон и железобетон, No. 13, 1985.
112. Виногорский Н.С.  
"Влияние климатических условий на эффективность бетонных работ"  
Бетон и железобетон, No. 6, 1979.
113. Врублевский Л.Е.  
"Бетоны с заданой электропроводностью"  
Бетон и железобетон, No. 6, 1979.
114. Зубков В.И., Лагойда А.В.  
"Прогнозирование прочности бетона при бетонировании"  
Бетон и железобетон, No. 3, 1985.







