

Razvoj modela za predviđanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju uzoraka napravljenih od struganog asfalta primenom mašinskog učenja

Nikola Milovanović^a, Marko Orešković^a

^a Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, Srbija

ARTICLE INFO

DOI: 10.31075/PIS.68.02.03

Stručni rad

Primljen: 01/05/2022

Prihvaćen: 22/06/2022

Korespondent autor:

nikoladzin98@gmail.com

Ključne reči:

Strugani asfalt

Čvrstoća pri indirektnom zatezanju

Mašinsko učenje

ABSTRACT

U okviru ovog rada razvijen je model za predviđanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength – ITS) uzoraka struganog asfalta (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) baziran na metodama mašinskog učenja (Machine Learning – ML). Analiza glavnih komponenti (Principal Component Analysis – PCA) korišćena je kako bi se smanjio skup podataka koji opisuje granulometrijske sastave uzoraka RAP-a. Razvijeni su različiti modeli višestruke polinomne regresije (Multivariate Polynomial Regression – MPR) koji u obzir uzimaju karakteristike RAP-a (sadržaj i penetracija ostarelog bitumena, granulometrijske krive pre i posle ekstrakcije bitumena), postupak pripreme uzoraka (temperatura zagrevanja) i karakteristike uzoraka (sadržaj šupljina). Analiza je pokazala da se PCA transformacija pouzdano može koristiti za smanjivanje skupa podataka o granulometrijskom sastavu (74% varijanse podataka opisano je sa prve dve glavne komponente). Takođe je zaključeno da najjednostavniji (linearni) model višestruke regresije pokazuje najveću tačnost od svih analiziranih modela sa koeficijentom determinacije 0.59, što se može smatrati visokim za dati skup podataka (više od 40 uzoraka RAP-a iz različitih izvora).

1. Uvod

Za izgradnju novih puteva obično se upotrebljavaju velike količine novih materijala, dok prilikom rekonstrukcije i rehabilitacije postojećih puteva dolazi do nagomilavanja materijala koji su bili u upotrebi određen vremenski period. Ovi problemi mogu biti prevaziđeni korišćenjem struganog asfalta (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP), materijala koji teorijski u potpunosti može da se reciklira. Jedno od najvećih ograničenja upotrebe veće količine struganog asfalta (>20%) u novim asfaltnim mešavinama je određivanje stepena aktivacije ostarelog bitumena iz struganog asfalta (Degree of Binder Activity – DoA) i stepen njegovog umešavanja sa bitumenom ili aditivom za recikliranje (Degree of Blending – DoB) (Orešković, 2020).

Radna grupa broj 5 tehničkog komiteta RILEM-a „264-RAP“ - „Stepen aktivacije ostarelog bitumena“ (TG 5 „DoA“ - Degree of binder activity) organizovala je ispitivanje između laboratorija učesnica radne grupe sa ciljem razvijanja metodologije za kategorizaciju RAP-a na osnovu njegovih karakteristika.

U predlogu STAR izveštaja radne grupe (lo Presti et al., 2021) je predloženo da se kategorizacija vrši na osnovu stepena aktivacije ostarelog bitumena (*DoA*) i to na osnovu izmerenih čvrstoća pri indirektnom zatezanju primenom sledeće jednačine:

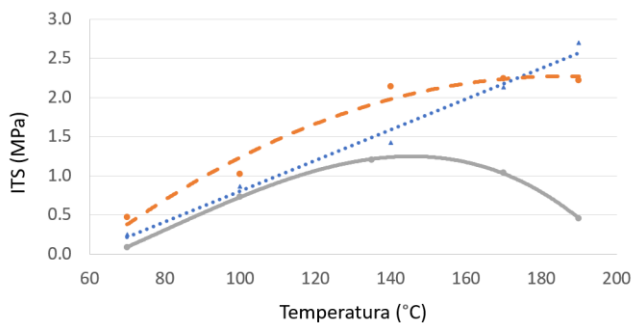
$$DoA (\%) = 100 \times \frac{X_{RAP}(T, test)}{\max X_{RAP}} \quad (1)$$

gde je X_{RAP} - vrednost čvrstoće pri indirektnom zatezanju na temperaturi T (od 70 do 190°C) [MPa], a $\max X_{RAP}$ - najveća srednja vrednost čvrstoće pri indirektnom zatezanju svih ispitnih uzoraka u okviru jednog istog uzorka RAP-a [MPa].

U studiji je učestvovalo 17 laboratorija iz 10 zemalja sveta (Belgija, Brazil, Kanada, Francuska, Indija, Italija, Srbija, Španija, Velika Britanija i SAD) i ispitana su ukupno 42 uzorka RAP-a različitog porekla. Najpre su određene osnovne karakteristike materijala (granulometrijski sastav, sadržaj bitumena, itd.), a zatim su, nakon zagrevanja struganog asfalta na različitim temperaturama (70°C, 100°C, 140°C, 170°C i 190 °C) pripremljeni uzorci za dalje ispitivanje korišćenjem Maršalovog ili žiroskopskog nabijača.

Na kraju je određena čvrstoća pri indirektnom zatezanju pripremljenih uzoraka na temperaturama ispitivanja od 25°C, a sve sa ciljem da se odredi uticaj temperature zagrevanja struganog asfalta i ostalih karakteristika na stepen aktivacije bitumena.

U okviru istraživanja utvrđeno je da postoji veza između sadržaja šupljina u asfalnim uzorcima i njihove čvrstoće pri indirektnom zatezanju, a time i stepena aktivacije bitumena. Međutim, rezultati ispitivanja su bili dosta rasuti, a što, prema objašnjenju autora, može biti posledica različitih metoda za proračun sadržaja šupljina (računske i eksperimentalne metode). Takođe je izvršena i analiza uticaja temperature zagrevanja na čvrstoću pri indirektnom zatezanju i primećeni su različiti trendovi. Kod pojedinih uzoraka RAP-a bilo je evidentno da čvrstoća raste sa porastom temperature zagrevanja do određene temperature, a zatim opada (siva i narandžasta kriva na slici 1), dok je kod drugih materijala uočeno da čvrstoća konstantno raste sa porastom temperature (plava kriva na slici 1).



Slika 1. Različite funkcije ITS-a od primenjene temperature zagrevanja

Korak dalje u analizi je bio upoređivanje načina pripreme asfaltnih uzoraka. U jednoj laboratoriji je iskorišćeno 6 različitih RAP-ova za pripremu uzoraka u Maršalovom (Marshall) (2x50 udaraca) i žiroskopskom nabijaču (30 rotacija). Posmatrani trendovi promene čvrstoće pri indirektnom zatezanju su bili slični kod materijala istog porekla bez obzira na način pripreme uzoraka, ali su se vrednosti čvrstoća značajno razlikovale (što je posledica različitog sadržaja šupljina).

Nakon analize podataka prikupljenih u okviru međulaboratorijskog ispitivanja pomenute radne grupe, utvrđeno je da čvrstoća pri indirektnom zatezanju najviše zavisi od temperature zagrevanja struganog asfalta i od njegovih karakteristika. Međutim, zavisnost između čvrstoće i pomenutih parametara nije uspostavljena primenom analitičkih metoda, najviše zbog raznovrsnosti korišćenih materijala. Npr. granulometrijski sastav struganog asfalta pre i posle ekstrakcije se značajno razlikuje od izvora do izvora. Kad je u pitanju vrsta bitumena, veći deo ispitanih RAP-ova je bio sačinjen od običnog putnog bitumena (njih 19), 8 je sadržalo modifikovani, a jedan uzorak RAP-a bitumen sa dodatkom gume. Nažalost, za 15 uzoraka struganog asfalta laboratorije nisu izvestile o vrsti bitumena koji se nalazio u njima (lo Presti et al., 2021).

Zbog svega navedenog, cilj ovog rada je bio razvijanje modela za predviđanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju asfaltnih uzoraka napravljenih od struganog asfalta koji, pored temperature zagrevanja, u obzir uzima i njegove karakteristike (sadržaj i penetraciju ostarelog bitumena, granulometrijski sastav pre i posle ekstrakcije), kao i sadržaj šupljina asfaltnih uzoraka. Za razvijanja modela je korišćen kompletan skup podataka preuzet od radne grupe TG 5 tehničkog komiteta „264-RAP“ RILEM-a. Na navedenom skupu podataka, metodama mašinskog učenja (Machine Learning – ML), obučavana su tri regresiona modela različitih nivoa kompleksnosti za predviđanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju u funkciji promenljivih iz skupa.

Utvrđeno je da sa porastom nivoa kompleksnosti navedene funkcije raste i tačnost predviđene čvrstoće pri indirektnom zatezanju uzoraka koji učestvuju u trenažnom setu, ali opada tačnost čvrstoće za uzorke iz seta koji su korišćeni za testiranje. Zato je kao reprezentativni model, usvojen linearni model sa relativno visokim nivoom preciznosti, koji se može prikazati kao funkcija 6 nezavisnih promenljivih (temperatura zagrevanja, sadržaj šupljina, sadržaj i penetracija bitumena iz struganog asfalta i navedene dve glavne komponente bazirane na granulometrijskom sastavu pre i posle ekstrakcije bitumena).

2. Materijali

Laboratorije učesnice ispitivanja su trebale da odrede što je više moguće sledećih karakteristika struganog asfalta:

- Sadržaj bitumena u ostarelom asfaltu [%]
- Penetraciju ostarelog bitumena [dmm]
- Tačku razmekšanja po metodi prstena i kuglice ostarelog bitumena [°C]
- Dinamički viskozitet [Pa.s]
- Maksimalnu zapreminska masa [Mg/m³]
- Granulometrijske krive pre i posle ekstrakcije (crna i bela granulometrijska kriva)

Cilindrični uzorci za određivanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju u laboratorijskim uslovima su pripremani na sledeći način: strugani asfalt je najpre osušen do konstantne mase na temperaturi od 40°C u trajanju od 48 časova; zatim je određena količina struganog asfalta zagrevana na različitim temperaturama (70°C, 100°C, 140°C, 170°C i 190 °C) u trajanju od 4 sata; nakon zagrevanja, uzorci su umešavani ručno ili mehanički i vraćeni u sušnicu do postizanja konstantne temperature; konačno, cilindrični uzorci za ispitivanje su pripremljeni upotrebom Maršalovog (sa 2x50 udaraca) ili žiroskopskog nabijača (30 rotacija).

Nakon pripreme, određene su sledeće karakteristike svakog od uzoraka:

- Zapreminska masa (Bulk density) [Mg/m^3]
- Sadržaj šupljina (Air Voids) [%]
- Visina uzorka (Sample height) [mm]
- Prečnik uzorka (Sample diameter) [mm]

Pre određivanja čvrstoće pri indirektnom zatezanju (u skladu sa SRPS EN 12697-23 gde se opterećenje nanosi u pravcu izvodnice uzorka brzinom od 50 ± 2 mm/min), uzorci su kondicionirani najmanje tri sata na temperaturi ispitivanja od 25°C . Čvrstoća pri indirektnom zatezanju (eng. Indirect Tensile Strength - ITS) svakog uzorka je izračunata pomoću sledeće jednačine:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \cdot 1000 \text{ [kPa]} \quad (2)$$

gde je: P – vršna sila [N], D – prečnik uzorka [mm] i H – visina uzorka [mm].

3. Metode analize

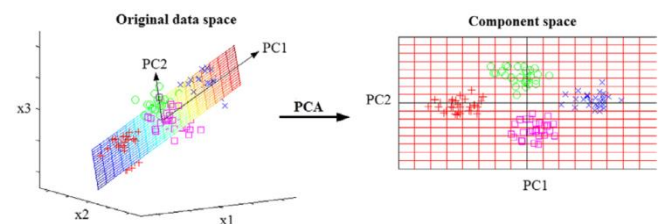
Kako bi se u potpunosti opisao granulometrijski sastav svakog RAP-a, analizirani su rezultati prolaza kroz 13 istih sita pre i posle ekstrakcije, što ukupno iznosi 26 analiza. Analiziranje prolaza u oba slučaja je važna zbog toga što se prilikom struganja postojećeg asfalta formiraju tzv. klasteri (više čestica agregata i filera je povezano bitumenom u jedno zrno), koji daju lažnu sliku o granulometrijskom sastavu sturganog asfalta. (Bressi et al., 2015) Za treniranje bilo kakvog modela funkcionalne zavisnosti sa tolikim brojem promenljivih potreban je veliki broj zapisa. Prema jednom od kriterijuma (Green, 1991), potrebno je minimalno 258 zapisa za obučavanje modela sa 26 promenljivih. Međutim, pošto ne postoji dovoljan broj eksperimentalnih podataka, primenjena je analiza glavnih komponenti (Principal Component Analysis - PCA) sa ciljem smanjivanja broja promenljivih (Batanović, 2020).

Na odabranim podacima obučavani su modeli višestruke linearne i polinomne regresije koji su odabrani zbog njihove jednostavnosti implementacije i jasne veze između zavisne i nezavisnih promenljivih, iako bi neka složenija metoda mašinskog učenja (Random Forest, Support Vector Machine, Deep Neural Network, itd.) možda proizvela bolje rezultate. Kako bi se modeli testirali, bilo je potrebno odvojiti set unosa koji neće učestvovati u skupu za obučavanje, i na tom setu testirati model. Da bi se izbeglo smanjivanje trenaznog seta korišćena je metoda unakrsne validacije (Batanović, 2020).

3.1 Analiza glavnih komponenti – PCA

U okviru ove metode, podaci se uklapaju u n-dimenzionalni elipsoid, pri čemu svaka od osa elipsoida predstavlja jednu glavnu komponentu, dok najkraća osa ima najmanju varijansu.

Matematički, analiza glavnih komponenti definiše se kao ortogonalna, linearna transformacija koja transformiše podatke u novi koordinatni sistem takav da najveća moguća varijansa leži na prvoj koordinati (ili prvoj glavnoj komponenti), dok svaka sledeća glavna komponenta mora biti upravna u odnosu na sve prethodne i da pokriva što veću preostalu varijansu. Odbacivanjem glavne komponente koja odgovara najkraćoj osi elipsoida (PC_n) gubi se srazmerno mala količina informacija i trodimenzionalni skup podataka se na taj način transformiše u dvodimenzionalni (slika 2). Ova operacija može se predstaviti kao otkrivanje unutrašnje strukture podataka na način koji najbolje objašnjava varijansu podataka. (Ghasemi et al., 2019).



Slika 2. Transformacija po glavnim komponentama (Ghasemi et al., 2019)

3.2 Regresiona analiza

Regresiona analiza je skup statističkih procedura pomoću kojih se ocenjuje međusobna povezanost zavisne promenljive (y) i nezavisnih promenljivih (x_1, x_2, \dots, x_n) gde je n broj nezavisnih promenljivih. Osnovni zadatak regresione analize je aproksimacija regresione funkcije f kojom se predstavlja veza između zavisne i nezavesnih promenljivih, tj. $u=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

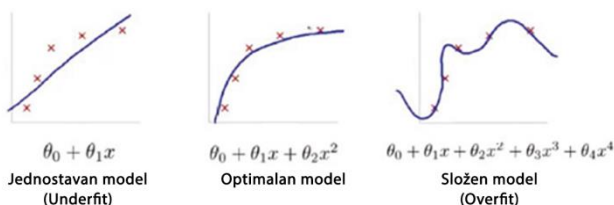
Prema prirodi veze između zavisne i nezavisnih promenljivih, regresija može biti linearna ili nelinearna (kvadratna, polinomna, eksponencijalna, itd.). Prema broju nezavisnih promenljivih razlikuju se prosta i višetraka regresija. Kod proste regresije postoji jedna zavisna i jedna nezavisna promenljiva, dok kod višestruke regresije postoji jedna zavisna i više nezavisnih promenljivih.

3.3 Unakrsna validacija modela

Pri treniranju modela važno je odabrati optimalnu prilagođenost modela podacima. Nedovoljna prilagođenost modela podacima (underfitting) javlja se kada je usvojeni oblik veze između zavisne i nezavisnih promenljivih isuviše jednostavan i model nije u stanju da isprati pravilnosti u podacima koji realno postoje. Preterana prilagođenost modela podacima (overfitting) javlja se kada je usvojeni oblik veze isuviše kompleksan i tada model nije u stanju da se ograniči na pravilnosti koje realno postoje u podacima, već ih uočava i tamo gde ih zapravo nema, tj. gde su proizvod šuma/slučajnosti. (Batanović, 2020; Browne, 2000)

Nedovoljna prilagođenost modela znači da model nije iskoristio podatke da dovoljno dobro nauči, a preterana prilagođenost modela znači da je model prestao da na osnovu podataka uči opšte pravilnosti, već je počeo da memoriše podatke. Pronalaženje balansa između nedovoljne i preterane prilagođenosti modela podacima je poznato i kao problem kompromisa između sistemskog odstupanja i varijanse (bias/variance trade-off). Greške zbog sistemskog odstupanja (bias) su posledica ograničene fleksibilnosti korišćenog modela mašinskog učenja. Greške zbog varijanse (variance) su posledica preterane osetljivosti korišćenog modela. (Batanović, 2020; Browne, 2000).

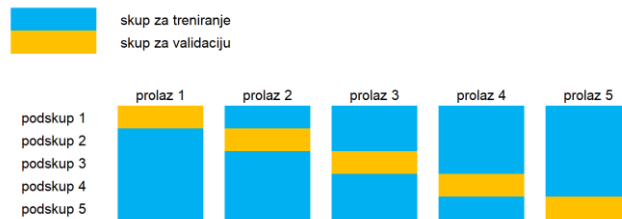
Obučeni model je samim obučavanjem bolje prilagođen analiziranim, nego nepoznatim podacima. Ako bi se evaluacija radila nad istim podacima, složeniji/fleksibilniji model bi uvek bio bolji, jer je sposobniji da se prilagodi podacima od jednostavnijeg modela (što znači da složeniji model bolje modelira šum, a ne željene pravilnosti) (slika 3.). Kako bi se dobila objektivna, nepristrasna procena karakteristika modela, evaluaciju je neophodno sprovesti nad novim, do tog trenutka nedirnutim skupom podataka – time se procenjuje sposobnost generalizacije razvijenog modela. Kako bi se to sprovelo, postojeći skup podataka na početku rada sa modelom mašinskog učenja se obično nasumično podeli na dva skupa – skup za obučavanje i skup za testiranje (najčešće 70:30% ili 80:20%, gde je veći skup onaj koji se koristi za obučavanje, a manji za testiranje)



Slika 3. Validacija modela (Batanović, 2020)

Validacija modela pomoću odvojenog skupa podataka ima ozbiljan nedostatak jer se efektivno smanjuje količina podataka koje model koristi pri učenju. Kao alternativno rešenje, naročito kod skupova podataka ograničene veličine, koristi se unakrsna validacija (cross-validation).

Kod unakrsne validacije početni skup podataka se deli na k delova, koji se nazivaju slojevima (k -fold cross-validation). Validacija se sprovodi u k prolaza. U i -tom prolazu model se validira na i -tom sloju, a obučava na svim ostalim slojevima zajedno. Konačni rezultati validacije dobijaju se uprosečavanjem rezultata na pojedinačnim slojevima. Najčešće se koristi unakrsna validacija sa 3, 5 ili 10 slojeva. (slika 4.)

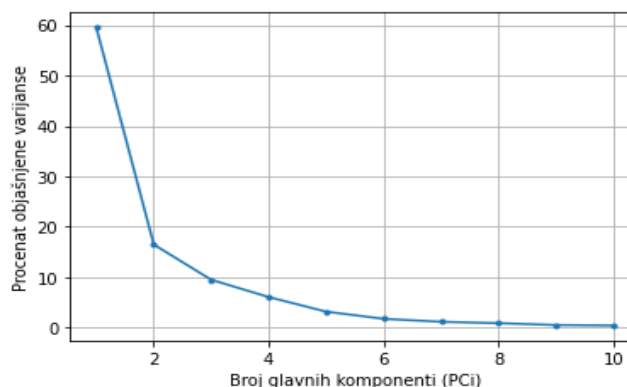


Slika 4. Šema unakrsne validacije za skup podataka podeljen na 5 podskupova

4. Rezultati analize i diskusija rezultata

4.1 Rezultati analize

U okviru ovog rada, izvršena je analiza glavnih komponenti granulometrijskog sastava. Na slici 5 su prikazani rezultati analize, odakle se može uočiti koliko varijanse (procentualno) opisuje svaka od prvih 10 glavnih komponentii (scree plot).



Slika 5. Procenat varijanse koju objašnjava svaka od prvih 10 glavnih komponenti

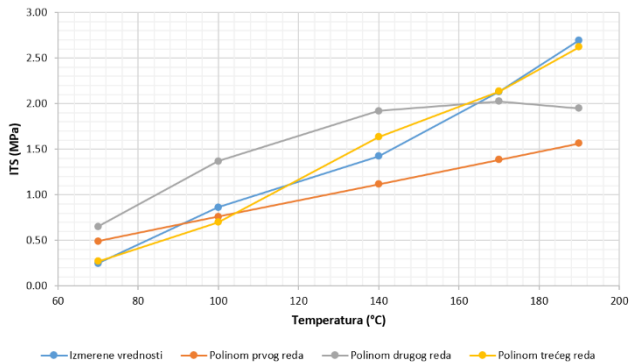
Svaka glavna komponenta (PC_i) prikazana je kao funkcija karakteristika granulometrijskog sastava, odnosno kao suma proizvoda prolaska kroz sito j (d_j) i koeficijenta k_j .

$$PC_i = \sum_{j=1}^{26} d_j * k_j \quad (3)$$

Na osnovu analize podataka se može zaključiti da se samo sa prvom glavnom komponentom (jednom promenljivom) može opisati 59% varijanse, sa drugom 16%, a sa svakom sledećom sve manje.

Za dalju analizu, odabrane su prve dve glavne komponente (PC_1 i PC_2), koje zajedno opisuju 75 % varijanse podataka o granulometrijskom sastavu. Pored komponenti koje opisuju granulometrijski sastav, kao promenljive od kojih zavisi čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) u obzir su uzeti penetracija ostarelog bitumena, temperatura zagrevanja, sadržaj šupljina i sadržaj bitumena.

Sa navedenih 6 promenljivih, i ukupno 135 unosa metodom mašinskog učenja (ML) obučavani su regresioni modeli različitog nivoa kompleksnosti. Modeli su trenirani na svim raspoloživim unosima, bez odvajanja skupa unosa za testiranje. Navedeni set uzoraka je relativno mali u kontekstu mašinskog učenja, ali je izuzetno veliki u kontekstu dostupnih laboratorijskih merenja sprovedenih na različitim vrstama struganog asfalta.



Slika 6. Zavisnost čvrstoće pri indirektnom zatezanju od temperature zagrevanja za modele različite kompleksnosti na nasumično odabranom RAP-u

Na slici 6. je prikazana zavisnost čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) od temperature zagrevanja struganog asfalta za nasumično izabran materijal koju daju obučavani modeli. Plava linija predstavlja eksperimentalne podatke, narandžasta linija predstavlja linearni regresioni model, a siva i žuta linija predstavljaju polinomni model drugog, odnosno trećeg stepena. Sa slike se može videti da polinomna funkcija trećeg stepena najbliže opisuje stvarne vrednosti čvrstoće, što potvrđuju i vrednosti koeficijenta determinacije u tabeli 1.

Tabela 1. Koeficijent determinacije u zavisnosti od kompleksnosti regresionog modela

Tip regresionog modela	Koeficijent determinacije R ²
Linearni model	0.59
Polinomni model drugog reda	0.83
Polinomni model trećeg reda	0.97

Nakon što je na osnovu maksimalnog koeficijenta determinacije utvrđeno da polinomni model trećeg reda najbliže opisuje stvarne vrednosti čvrstoće, ponovo je napravljen model, koji je ovog puta treniran na 80% podataka, dok je 20% podataka (5 nasumično odabranih RAP-ova, odnosno 25 ulaza) odvojeno u skup podataka za testiranje. Uprkos odličnom uklapanju modela u trenažni skup podataka, razvijeni model se ne uklapa u set podataka za testiranje, što znači da je model previše prilagođen podacima (overfitting).

Kako bi se izbegao fenomen preteranog prilagođavanja podacima, primenjen je metod unakrsne validacije modela. Skup podataka podeljen je u 5 podskupova, odnosno 5 slojeva.

Model je zatim treniran u 5 prolaza, gde je u svakom prolazu jedan od podskupova korišćen za validaciju, a preostala 4 za treniranje. Kako bi se ocenila tačnost modela razvijena za svaki prolaz, uvek je računat koeficijent determinacije R². Konačno, tačnost konačnog modela je ocenjena na osnovu srednje vrednosti svih 5 koeficijenata determinacije R_i.

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^5 R_i^2}{5} \quad (4)$$

Koeficijenti determinacije za svaki od 5 prolaza unakrsne validacije primenom linearnog modela, kao i prosečni koeficijent, dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Koeficijent determinacije za svaki prolaz unakrsne validacije

	Koeficijent determinacije R ²
Prolaz 1	0.35
Prolaz 2	0.12
Prolaz 3	0.53
Prolaz 4	-0.01
Prolaz 5	0.21
Prosek	0.24

Maksimalni prosečni koeficijent determinacije kod unakrsne validacije dobijen je kada je upotrebljen linearni model, čime se može zaključiti da je svaki kompleksniji model funkcionalne zavisnosti preterano prilagođen („overfit-ovan“) (Batanović 2020). Iako je polinomni model trećeg reda pokazao najbolje rezultate kod trenažnog seta podataka, rezultati pokazuju da je on previše prilagođen podacima, i da se njime ne mogu pouzdano prognozirati vrednosti za nove RAP-ove.

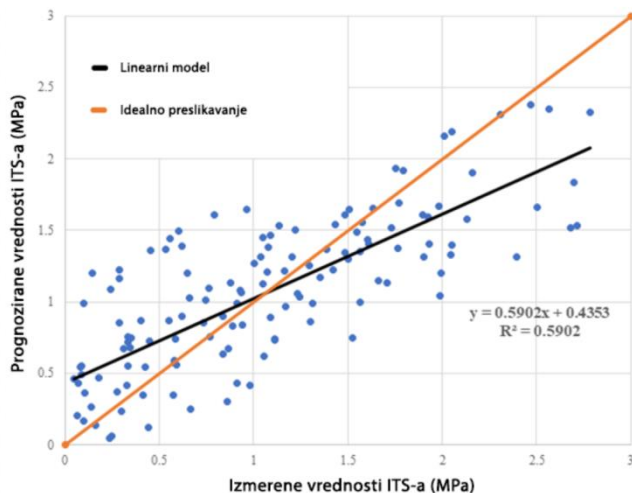
Zbog toga je kao merodavni model za procenu čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) uzoraka napravljenih od struganog asfalta usvojen linearni model sledećeg oblika:

$$ITS = 0.527 - 0.065 * V_s + 0.006 * T + 0.108 * P_b + 0.01 * pen - 0.035 * PC_1 + 0.023 * PC_2 \text{ [MPa]} \quad \dots\dots(5)$$

gde je V_s – sadržaj šupljina (%), P_b – sadržaj bitumena (% m/m), pen - penetracija ostarelog bitumena iz struganog asfalta (0.1 mm), T – temperatura zagrevanja struganog asfalta (°C) i glavne komponente (PC1, PC2) – funkcije granulometrijskog sastava pre i posle ekstrakcije bitumena

Razvijeni model višestruke linearne regresije za procenu čvrstoće je prikazan na slici 7, gde svaka tačka na predstavlja jedan od unosa. Na apscisi se nalaze laboratorijski izmerene vrednosti čvrstoće pri indirektnom zatezanju, a na ordinati vrednosti predviđene primenom razvijenog modela. Narandžasta linija predstavlja liniju idealnog preslikavanja, dok crna linija predstavlja model razvijen u okviru ovog rada.

Važno je napomenuti da je razvijeni model obučavan na kompletnom skupu podataka što objašnjava koeficijent determinacije od 0.59. U slučaju kada je 20% podataka bilo nepoznato (unakrsna validacija) linearni model pokazao je prosečan koeficijent determinacije 0.24 što znači da se opravdano može očekivati da će ovaj model dati postojanu korelaciju i za neki nov RAP sa kojim se model još „nije upoznao.“ (Osten, 1988).



Slika 7. Predviđene nasuprot izmerenih vrednosti čvrstoće pri indirektnom zatezanju

4.2 Diskusija rezultata

Veličina skupa podataka koji se odvoji za validaciju značajno utiče na vrednost koeficijenta determinacije. Što se veći deo skupa odvoji za validaciju, manji je deo skupa na kome se model obučava, što nužno znači lošiju preciznost modela, odnosno manji koeficijent determinacije. Pored načina na koji su skupovi podeljeni, na koeficijent determinacije takođe utiče i broj promenljivih, broj unosa, kao i rasutost podataka.

Na osnovu navedenih razloga može se zaključiti da ne postoji opšti kriterijum na osnovu kojeg se može interpretirati koeficijent determinacije. Koeficijent veći od 0.7 uglavnom znači čvrstu korelaciju (Taylor, 1990), ali se u disciplinama o kojima se ne zna mnogo (npr. imunitet tela na rak u medicini) često kao prihvatljiv usvaja i koeficijent veći od 0.05 ili 0.02. (Bansal, n.d.)

Pregledom rezultata ispitivanja sprovedenih u okviru radne grupe broj 5 ustanovljeno je da analizirani RAP-ovi značajno variraju u pogledu karakteristika. Uzevši u obzir njihovu varijabilnost, koeficijent determinacije dobijen za razvijeni model linearne regresije (0.59) može se smatrati prihvatljivim.

5. Zaključak

S obzirom da još uvek ne postoji standardizovana metoda za kategorizaciju struganog asfalta, radna grupa broj 5 RILEM-ovog tehničkog komiteta 264-RAP je predložila da se podela RAP-a ubuduće vrši na osnovu stepena aktivacije ostarelog bitumena, izračunatog na osnovu čvrstoće pri indirektnom zatezanju uzoraka napravljenih od struganog asfalta. U okviru međulaboratorijskog istraživanja učestvovalo je 17 laboratorija iz 10 zemalja i ispitano je ukupno 42 uzorka struganog asfalta različitog porekla, čije su karakteristike određene pre početka pripreme uzoraka. Uzorci su pripremani u Maršalovom ili žiroskopskom nabijaču nakon zagrevanja materijala na 70, 100, 140, 170 i 190°C, a sve sa ciljem da se odredi uticaj karakteristika i temperature zagrevanja materijala na čvrstoću pri indirektnom zatezanju, a time i na stepen aktivacije bitumena.

Kako bi se procenila čvrstoća pri indirektnom zatezanju na osnovu karakteristika struganog asfalta bez sprovođenja samog opita, ili eventualno zagrevanjem materijala na manjem broju temperatura u odnosu na sprovedenu studiju, u okviru rada je razvijen model za predviđanje čvrstoće primenom mašinskog učenja.

Eksperimentalni podaci su najpreciznije opisani primenom linearne regresije sa više prediktora (višestruka linearna regresija). Razvijeni model je iskazan u funkciji karakteristika struganog asfalta (penetracija i sadržaj ostarelog bitumena i granulometrijski sastav pre i posle ekstrakcije bitumena), temperature zagrevanja pre pripreme uzoraka, kao i karakteristike samih ispitnih uzoraka (sadržaj šupljina). Model ima relativno visok nivo tačnosti (koeficijent determinacije $R^2=0.59$) s obzirom na varijabilnost korišćenih materijala.

Kako bi se izvršila validacija ili kalibracija razvijenog modela, u narednim studijama je potrebno izvršiti ispitivanje dodatnih uzoraka struganog asfalta sa različitih lokacija. Takođe bi bilo potrebno sprovesti i analizu osetljivosti razvijenog modela, tj. odrediti koji parametri imaju najveći uticaj na čvrstoću pri indirektnom zatezanju.

Zahvalnost

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo nauke, prosvete i tehnološkog razvoja u okviru istraživačkog projekta broj 2000092. Autori se posebno zahvaljuju svim članovima radne grupe broj 5 tehničkog komiteta RILEM-a 264-RAP na ustupljenim podacima.

Development of a model for the estimation of indirect tensile strength of RAP specimens using machine learning methods

Nikola Milovanović, M.Sc.CE

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Serbia

Marko Orešković, M.Sc.CE

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Serbia

Abstract: A model for prediction of Indirect Tensile Strength (ITS) of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) specimens is developed in this study using Machine Learning (ML) technique. Principal Component Analysis (PCA) was used to transform grading curves of RAP and obtain reduced amount of data for further analysis. Different Multivariate Polynomial Regression (MPR) models were developed considering properties of RAP (aged binder content and its penetration, grading curves before and after extraction (black and white curves)), manufacturing process (preheating temperature) and properties of testing samples (air void content). Analysis showed that PCA can be adequately used to reduce the number of variables required to describe grading curves (74% of variance was described with first two principal components). Additionally, it was concluded that the simplest (Linear) MPR Model was the most precise overall - coefficient of the determination was 0.59, which can be considered as quite high for such a data set (more than 40 RAPs from different sources were analyzed).

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Indirect Tensile Strength, Machine Learning

Literatura

- [1] Bansal, G. (n.d.). *What does coefficient of determination explain? (in terms of variation)*.
- [2] Batanović, V. (2020). *Obrada prirodnih jezika*.
- [3] Bressi, S., Dumont, A. G., & Pittet, M. (2015). Cluster phenomenon and partial differential aging in RAP mixtures. *Construction and Building Materials*, 99, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.024>
- [4] Browne, M. W. (2000). Cross-Validation Methods. In *Journal of Mathematical Psychology* (Vol. 44). www.idealibrary.com
- [5] Ghasemi, P., Aslani, M., Rollins, D. K., & Williams, R. C. (2019). Principal component analysis-based predictive modeling and optimization of permanent deformation in asphalt pavement: elimination of correlated inputs and extrapolation in modeling. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 59(4), 1335–1353. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2133-x>
- [6] Green, S. B. (1991). How Many Subjects Does It Take To Do A Regression Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 26(3), 499–510. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr2603_7
- [7] Presti, D., Vasconcelos Kamilla, Abed, A., Botella Nieto, R., Menegusso Pires, G., Jimenez Del Barco Carion, A., Pinheiro, G., Pasquini Alan Carter, E., Margaritis, A., van den berght, W., Carbonneau, X., Guduru, G., Kuna, K., Eskandarsefat, S., Venturini, L., Oreskovic, M., Preti, F., Ogbo, C., Dave, E., ... Airey, G. (2021). *RAP Characterisation by Assessing the Relative Degree of Binder Activity*.
- [8] Orešković, M. D. (2020). *Mix Design Methodology of Hot Mix Asphalt with High Content of Reclaimed Asphalt Pavement*.
- [9] Osten, D. W. (1988). Selection of optimal regression models via cross-validation. *Journal of Chemometrics*, 2(1), 39–48. <https://doi.org/10.1002/cem.1180020106>
- [10] Taylor, R. (1990). Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6(1), 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>