



PD 6334



003067740

COBISS

građevinski fakultet univerziteta
u Beogradu

Mr. BOŽIDAR BATINIĆ

stojeći talasi izazvani
krivinama pri burnom
tečenju u kanalima

doktorska disertacija

Beograd mart 1976

GRAĐEVINSKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU

Mr. Božidar BATINIĆ

**Stojeći talasi
izazvani krivinama
pri burnom
tečenju u kanalima**

Doktorska disertacija

Rukovodilac disertacije

Dr Georgije HAJDIN

Beograd • Mart 1976.

S A D R Ź A J

UVOD	str. I.
1. PROBLEMATIKA BURNOG TEČENJA U KRIVINAMA	str. 1.
1.1. Predmet rada	str. 1.
1.2. Osnovni pojmovi i njihove oznake	str. 5.
1.3. Prikazivanje zadatka funkcijama dimenzionalnih veličina	str. 7.
1.4. Prikazivanje zadatka funkcijama bezdimezionalnih veličina	str. 8.
1.5. Dosadašnji način proučavanja burnog toka u krivinama	str. 10.
2. OPIS EKSPERIMENTALNE INSTALACIJE	str. 13.
2.1. Modeli krivina	str. 14.
2.2. Model sa dodatnim nizvodnim kanalom	str. 15.
2.3. Model sa suženjem u krivini	str. 17.
3. PRIKAZ I TUMAČENJE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA	str. 19.
3.1. Dubine duž spoljne strane krivine. Maksimalna dubina i mesto njenog javljanja	str. 19.
3.2. Širina pozitivnog talasa	str. 31.
3.3. Dubina uz unutrašnju stranu krivine. Minimalne dubine i njihov položaj u krivini	str. 38.
3.4. Dubine u produžetku kanala nizvodno od krivine	str. 49.
4. KRIVINA SA SUŽENJEM KAO REŠENJE KOJIM SE UBLAŽAVAJU NEPOŽELJNI UTICAJI KRIVINE NA NIZVODNO TEČENJE	str. 52.
SPISAK LITERATURE	str. 58.
5. FOTOGRAFIJE	
6. PRILOZI	

Uvod

U hidrotehničkoj praksi se srazmerno često ukazuje potreba za sprovođenjem vode kroz otvoreni kanal takvih karakteristika koje prouzrokuju burno tečenje. Ovakvi kanali su poznati pod opštim nazivom brzotoci. Teško je naići na takve terenske uslove koji bi omogućili vođenje čitave trase kanala u jednom pravcu. U najčešćem broju slučajeva projektovana trasa kanala se sastoji iz više od jednog pravca. Prelazna deonica između dva pravca kanala se može, u slučaju blagog skretanja izvesti prelomom osovine kanala, ili u slučaju većeg ugla skretanja, krivinom. U oba slučaja, kao posledica skretanja javlja se tzv. "stojeći talas" na površini, koji znatno smanjuje propusnu sposobnost kanala. (Veličina smanjenja propusne sposobnosti zavisi od geometrijskih karakteristika prelazne deonice). Stoga je razumljiva težnja da se navedena pojava rasvetli, a njene posledice ublaže.

Dosadašnja iskustva stečena teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima su malobrojna i nepotpuna, te ne mogu, u potpunosti da objasne ovu pojavu. Teorijska rešenja na koja se nailazi u literaturi (na primer lit.[1];[2]), baziraju se na linijskoj predstavi problema. Očigledno je da se ovde radi o problemu kod koga se komponente brzine javljaju u sva tri koordinatna pravca, pa

II.

pristup problemu kao linijskom ne može da zadovolji. Tretiranje problema kao prostornog dovodi do velikih teškoća u pogledu čisto teorijskog razmatranja, pa se najveći deo zaključaka izvodi iz rezultata dobijenih eksperimentalnom analizom, ali uz teorijsko obrazloženje i objašnjenje.

U ovom radu učinjen je pokušaj boljeg rasvetljavanja fenomena pojave stojećeg talasa u krivinama brzotoka. Teorijskom i eksperimentalnom analizom su obuhvaćeni veći skretni uglovi brzotoka pravougaonog poprečnog preseka za različite odnose poluprečnika krivine i širine dna brzotoka i odnosa širine dna brzotoka i dubine u dolaznoj pravougaonoj deonici brzotoka. Kako su eksperimenti obavljani na instalaciji dovoljno krupne razmere, za koju se može primeniti Frudova sličnost, a rezultati izraženi bezdimenzionalnim veličinama i njihovom međusobnom zavisnošću, mogu se preneti na dimenzije objekta u prirodi.

U uvodnim poglavljima teze (poglavlja 1.1. i 1.5.), detaljnije su opisane pojave u prelaznim deonicama i prikazana dosadašnja iskustva. Teorijska analiza problema započinje poglavljem 1.3. u kome se metodom dimenzionalne analize definišu bezdimenzionalni parametri koji karakterišu problem. Kroz poglavlje 3. analiziraju se rezultati eksperimenata izvršenih po programu obrazloženom kroz poglavlje 2.

III.

Praktični zaključci na osnovu izvršene analize prikazani su u zaključnom poglavlju (4.) u kome se razmatra mogućnost pojave talasa u deonici kanala nizvodno od krivine.

Ovaj rad je rezultat ne samo ličnog angažovanja i razmišljanja, nego i svesrdne pomoći i saradnje celokupnog osoblja Hidrauličke laboratorije Građevinskog fakulteta u Beogradu i rukovodioca teze prof.dr Georgija Hajdina. Čeneći njihovu pomoć i saradnju izražavam im dužnu zahvalnost.

1.

PROBLEMATIKA BURNOG TEČENJA U KRIVINAMA

1.1. PREDMET RADA

Problematika koja će se u ovom radu razmatrati zbog značaja koji ima za praksu obrađena je i u knjigama iz opšte hidraulike - na primer [1] i [2], sa napomenom da potiču iz radova [3] i [4].

Buran režim strujanja karakterističan je po tome što se sve promene u toku, nastale usled nailaska na bilo kakvu prepreku, prenose nizvodno od mesta poremećaja. U izvesnim slučajevima poremećaji u strujanju mogu da izazovu potpunu promenu režima strujanja - iz burnog u miran. Ova promena naziva se hidrauličkim skokom. Do ovakve promene dolazi kada strujanje u burnom režimu nema dovoljnu energiju da savlada nametnutu mu prepreku.

Prepreke u strujnom toku koje su nastale promenom oblika graničnih površina - čvrstih granica - a ne izazivaju potpunu promenu režima strujanja, predmet su posebnih izučavanja od strane inženjera eksperimentatora. Posebna pažnja pri izučavanjima se poklanja poremećajima u toku koji nastaju promenama oblika slobodne površine strujanja.

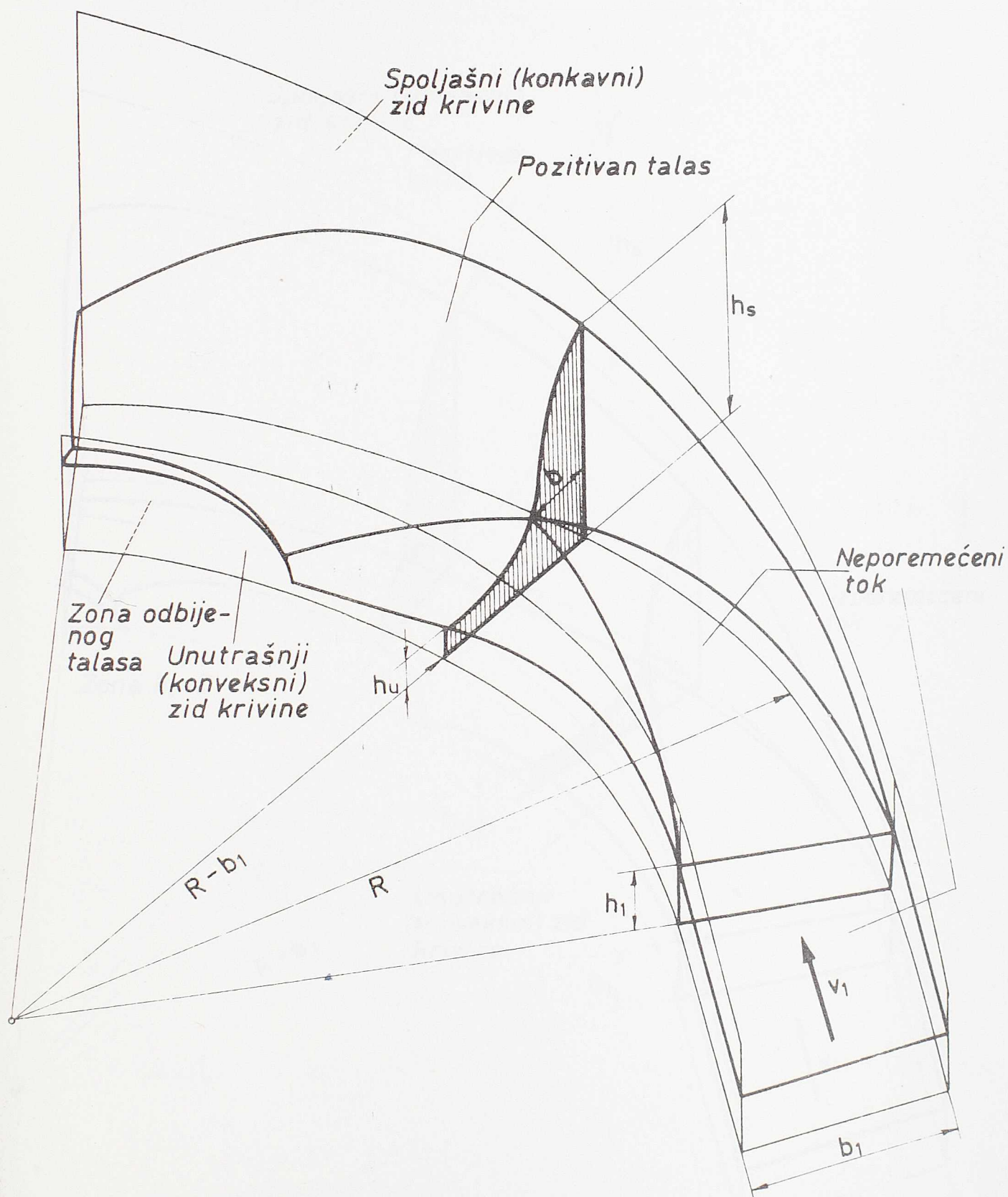
U ovom radu izučavaće se poremećaji koji nastaju prilikom strujanja pravougaonim kanalom čiji bočni zidovi skreću po koncentričnim krugovima krivine, a dno ostaje neporemećeno u horizontalnoj ravni. Izučavaće se one krivine koje ne menjaju režim strujanja - krivine koje ne izazivaju pojavu hidrauličkog skoka. Pri ovako definisanom problemu, koji nastaje usled geometrijskih karakteristika krivine bočnih zidova kanala, mogu se javiti sledeće promene u obliku slobodne površine strujanja:

- pojava pozitivnog stojećeg talasa na spoljnoj, konkavnoj, strani krivine;
- pojava negativnog stojećeg talasa na unutrašnjoj, konveksnoj, strani krivine;
- pojava suve zone na dnu (bez tečenja) na unutrašnjoj, konveksnoj strani krivine.

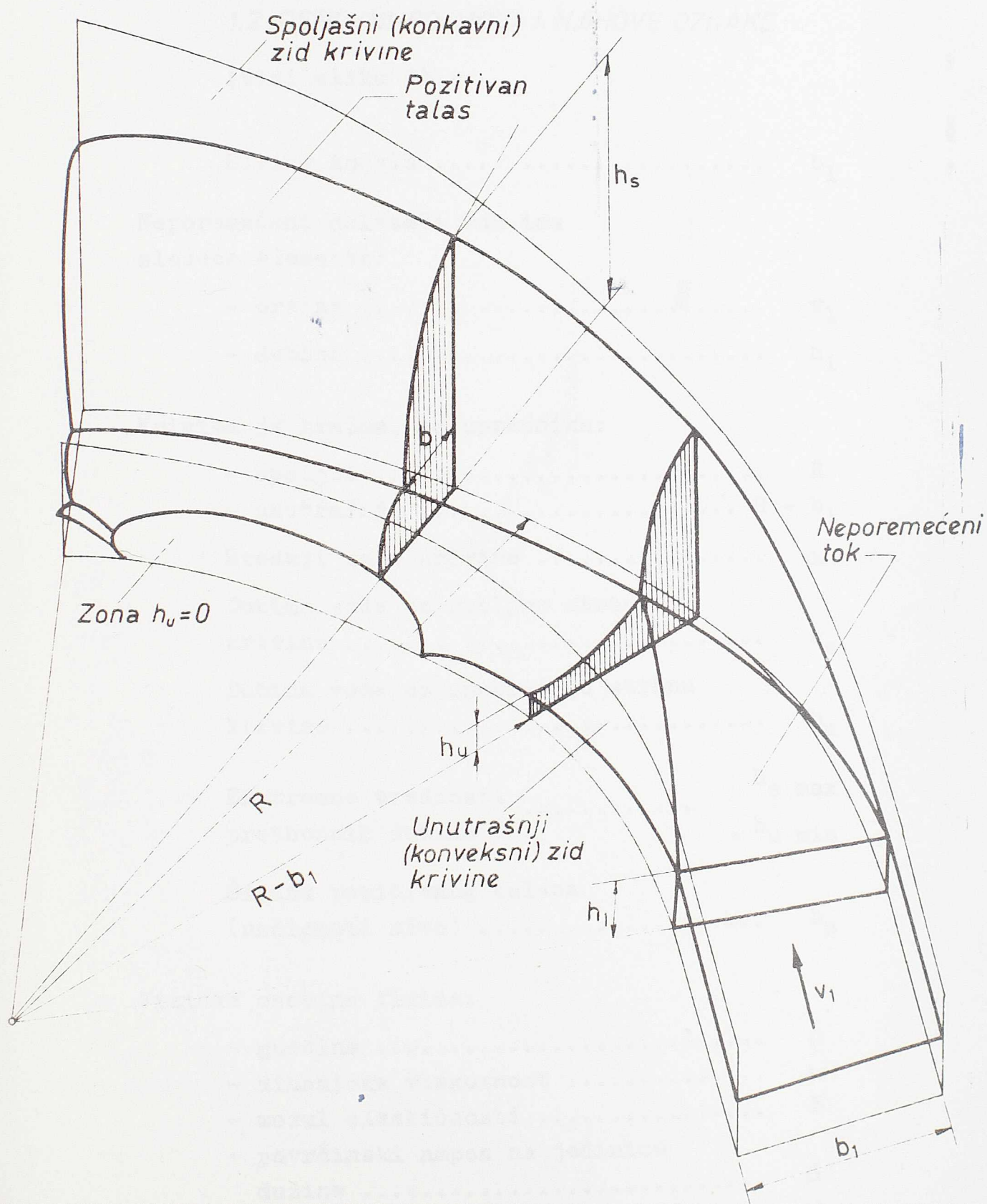
Ove pojave su predstavljene na slikama (1) i (2) u perspektivi, sa namerom da se što bolje geometrijski pokažu promene u strujanju nastale usled krivine. Želja je da se kroz ovaj rad te pojave modelski ispituju i daju u najpovoljnijoj formi za upotrebu.

Ovaj problem je do sada od strane raznih autora bio obrađivan kao linijski problem. Ovakvo uprošćavanje dovodi do mogućeg teorijskog rešenja koje će biti prikazano u poglavlju (1.5).

Cilj ovog rada je da se dobije rešenje problema kao trodimenzionalnog slučaja, kakav u stvarnosti i jeste. Složenost strujanja sa pretpostavkom trodimenzionalnosti teško može da dâ teoretsko rešenje, pa će se pomoću dimenzionalne analize doći do programa eksperimenata i do funkcionalnih zavisnosti fizičkih veličina koje učestvuju u postavljenom problemu.



Slika 1. PRIKAZ TEČENJA U KRIVINI PRI BURNOM REŽIMU
 - BEZ ODVAJANJA TOKA OD UNUTRAŠNJEG ZIDA -



Slika 2. PRIKAZ TEČENJA U KRIVINI PRI BURNOM REŽIMU
 - SA ODVAJANJEM TOKA OD UNUTRAŠNJEG ZIDA -

1.2. OSNOVNI POJMOVI I NJIHOVE OZNAKE

(vidi sliku 3).

Širina kanala b_1 Neporemećeni dolazeći tok ima
sledeće elemente:- brzina v_1 - dubina h_1

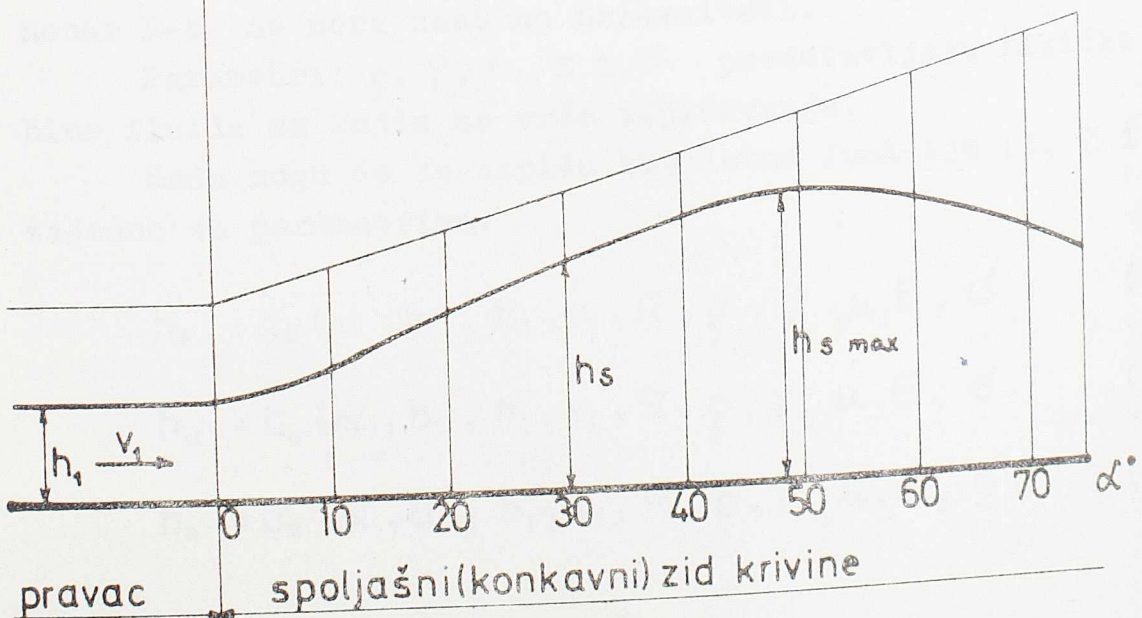
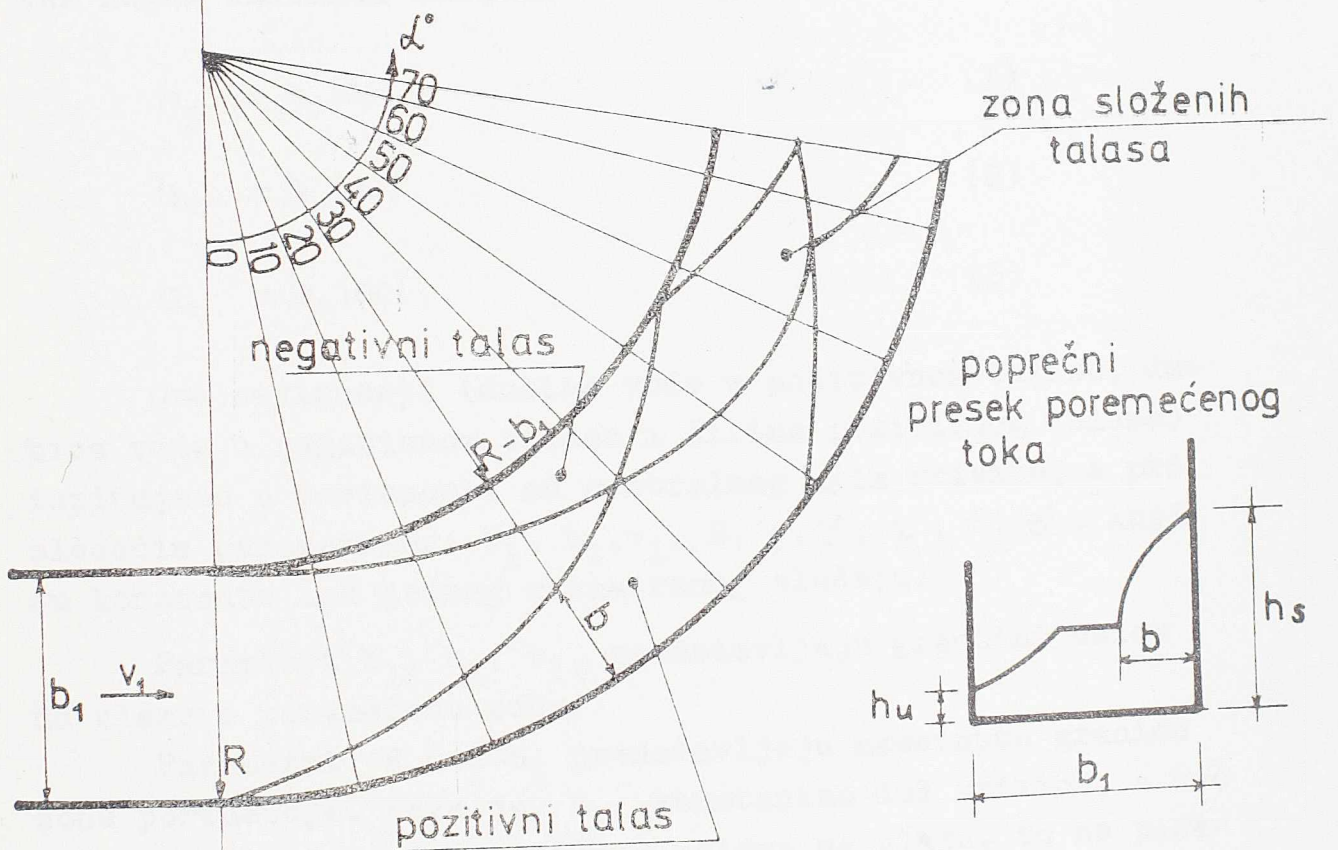
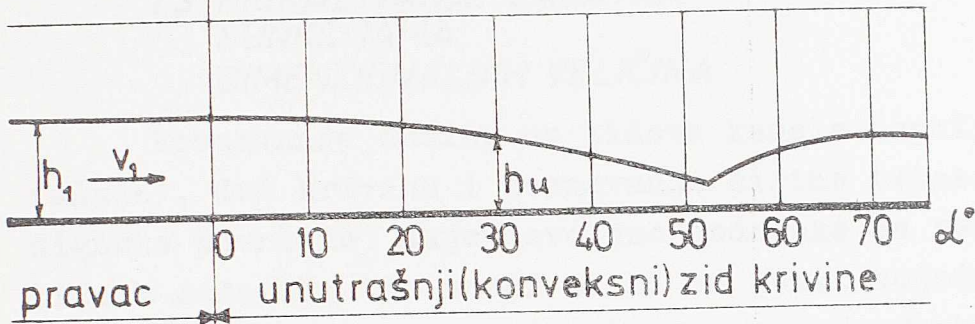
Krivina je kružna, poluprečnika:

- spoljni R - unutrašnji $R - b_1$ Srednji ugao krivine α Dubina vode uz spoljnu stranu
krivine h_s Dubina vode uz unutrašnju stranu
krivine h_u Ekstremne vrednosti $h_s \text{ max}$ prethodnih dubina $h_u \text{ min}$ Širina pozitivnog talasa
(uzdignuti nivo) b_s

Fizičke osobine fluida:

- gustina ρ - dinamička viskoznost μ - modul elastičnosti E - površinski napon na jedinicu
dužine σ - specifična težina tečnosti γ

NEPOREMEĆENI TOK POREMEĆENI TOK
← →



1.3. PRIKAZIVANJE ZADATKA FUNKCIJAMA DIMENZIONALNIH VELIČINA

Poznavanje dubine uz zidove kanala (spoljne i unutrašnje), duž krivine i poznavanje širine talasa (širine uzdignute površine) daje dovoljno podataka za rešavanje praktičnih zadataka. To znači da bi se svaki pojedinačni zadatak mogao smatrati rešenim ako se poznaju funkcije:

$$h_s = h_s(\alpha) \quad (1)$$

$$h_u = h_u(\alpha) \quad (2)$$

$$b_s = b_s(\alpha) \quad (3)$$

Ove zavisnosti (dubina vode u pozitivnom talasu, dubina vode u negativnom talasu i širina pozitivnog talasa) ispitujemo u zavisnosti od centralnog ugla krivine, a pri sledećim parametrima: $b_1, h_1, v_1, R, \rho, \gamma, \mu, E, \sigma$, koji su konstante kod jednog razmatranog slučaja.

Parametri b_1, h_1, v_1 , predstavljaju granični uslov na ulazu u poremećenu zonu.

Parametri: R i $R-b_1$ predstavljaju nametnutu granicu zone poremećaja. Kako je b_1 konstantno duž krivine, a već je sastavni element graničnog uslova na ulazu, to se parametar $R-b_1$ ne mora zasebno prikazivati.

Parametri: ρ, γ, μ, E i σ predstavljaju fizičke osobine fluida sa kojim se vrše ispitivanja.

Sada mogu da se napišu kompletne funkcije (1, 2 i 3) zajedno sa parametrima.

$$h_s = h_s(\alpha, b_1, h_1, v_1, R, \rho, \gamma, \mu, E, \sigma) \quad (4)$$

$$h_u = h_u(\alpha, b_1, h_1, v_1, R, \rho, \gamma, \mu, E, \sigma) \quad (5)$$

$$b_s = b_s(\alpha, b_1, h_1, v_1, R, \rho, \gamma, \mu, E, \sigma) \quad (6)$$



Ove tri funkcije se analiziraju i dovode na povoljniji oblik primenom dimenzionalne analize.

1.4. PRIKAZIVANJE ZADATKA FUNKCIJAMA BEZDIMENZIONALNIH VELIČINA

Pri proučavanju neke fizičke pojave, a ovde se radi, kako je napred definisano, o strujanju vode u krivinama, zgodno je primeniti dimenzionalnu analizu koja olakšava proučavanje zamenom analiziranih fizičkih veličina odgovarajućim bezdimenzionalnim veličinama. Ovakav način razmatranja daje sledeće prednosti:

- bezdimenzionalne veličine daju opšta rešenja za sve slučajeve na koje se proučavanje odnosi;
- smanjuje se broj veličina u razmatranju pojave;
- logičnim razmatranjem bezdimenzionalnih veličina dolazi se do zaključka da postoji jedna ili dve granične vrednosti između kojih se kreće bezdimenzionalna veličina. Na primer, odnos nekih veličina može da se kreće u granicama između 0 i 1;
- neke vrednosti bezdimenzionalnih veličina koje su proistekle iz fizičkih osobina fluida, predstavljaju granice ponašanja strujanja fluida.

Iz ovoga se može izvesti zaključak da bezdimenzionalne veličine koje su posledica dimenzionalne analize nisu samo formalna uprošćavanja, već i potreba da se neki problemi bolje sagledaju i reše.

Pri eksperimentalnom rešavanju fizičkih pojava, dimenzionalna analiza se prosto nameće, kako u pogledu sastavljanja programa ispitivanja, tako i u pogledu prikazivanja dobijenih rezultata. Da bi se ovaj problem rešio eksperimentalnim istraživanjima prvo će se sprovesti dimenzionalna analiza za tečenje u krivinama, pa nakon toga izraditi plan eksperimenata.

Ovde se neće prikazivati postupak dimenzionalne analize, već samo dati konačan rezultat primenjen na funkcije (4), (5) i (6), koje će u bezdimenzionalnom obliku glasiti:

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(\alpha, \frac{\mu}{\rho v_1 h_1}, \frac{E}{\rho v_1^2}, \frac{\sigma}{v_1^2 h_1}, \frac{\gamma h_1}{\rho v_1^2}, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right)$$

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} \left(\alpha, \frac{\mu}{\rho v_1 h_1}, \frac{E}{\rho v_1^2}, \frac{\sigma}{v_1^2 h_1}, \frac{\gamma h_1}{\rho v_1^2}, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right)$$

$$\frac{b_s}{h_1} = \frac{b_s}{h_1} \left(\alpha, \frac{\mu}{\rho v_1 h_1}, \frac{E}{\rho v_1^2}, \frac{\sigma}{v_1^2 h_1}, \frac{\gamma h_1}{\rho v_1^2}, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right)$$

U hidrauličkoj praksi već postoje uobičajeni bezdimenzionalni brojevi koji karakterišu fizičke osobine fluida. To su sa ovde uvedenim oznakama:

Rejnoldsov (Reynolds) broj:

$$Re = \frac{\rho v_1 h_1}{\mu} \quad (7)$$

Košijev (Cauchy) broj:

$$Ca = \frac{\rho v_1^2}{E} \quad (8)$$

Veberov (Weber) broj :

$$We = \frac{v_1^2 h_1}{\sigma} \quad (9)$$

Frudov (Froude) broj:

$$Fr_1 = \frac{v_1^2}{g \cdot h_1} ; \text{ (koristimo vezu } \gamma = \rho \cdot g \text{)} \quad (10)$$

Uvođenjem ovih brojeva mogu se napisati funkcije:

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(\alpha, Re, Ca, We, Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right) \quad (11)$$

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} \left(\alpha, Re, Ca, We, Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right) \quad (12)$$

$$\frac{b_s}{h_1} = \frac{b_s}{h_1} \left(\alpha, Re, Ca, We, Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{h_1} \right) \quad (13)$$

Posmatranjem uticaja ovih brojeva na postavljene problem može da se dođe do sledećih zaključaka:

Uticaj Reynoldsovog broja u ovom slučaju je zanemarljiv, jer, kako se vidi na slici 3., radi se o tzv. kratkom hidrauličkom objektu, pa se uticaj trenja može zanemariti. Uticaj Veberovog broja je neznatan jer je površinski napon u ovako širokim kanalima i pri ovako velikim brzinama zanemarljiv. Uticaj Košijevog broja pri strujanju sa slobodnom površinom ne postoji jer nema uticaja stišljivost vode. Bezdimenzionalni broj R/h_1 zbog boljeg prikazivanja rezultata, podeljen sa b_1/h_1 daće novi bezdimenzionalni broj R/b_1 . Na kraju, dolazi se do uprošćenih funkcija (11), (12) i (13):

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(Fr_1, \alpha, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right) \quad (14)$$

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} \left(Fr_1, \alpha, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right) \quad (15)$$

$$\frac{b_s}{h_1} = \frac{b_s}{h_1} \left(Fr_1, \alpha, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right) \quad (16)$$

Ove funkcije treba eksperimentalno dobiti i prikazati na najpovoljniji način.

1.5. DOSADAŠNJI NAČIN PROUČAVANJA BURNOG TOKA U KRIVINAMA

Pregledom raspoložive literature dolazi se do zaključka da se na problemu tečenja u burnom režimu i krivinama malo radilo. Ovaj problem sa pojavom talasa, do sada je rešavan sa pretpostavkama i teorijskim rešenjem Ippen-a [4.] i Knapp-a [3.]. Pomenuti autori su teoriju skretanja zida u konačnom uglu Θ prebacili i na krivinu izdelivši je tetivama, kako se vidi na slici 4.

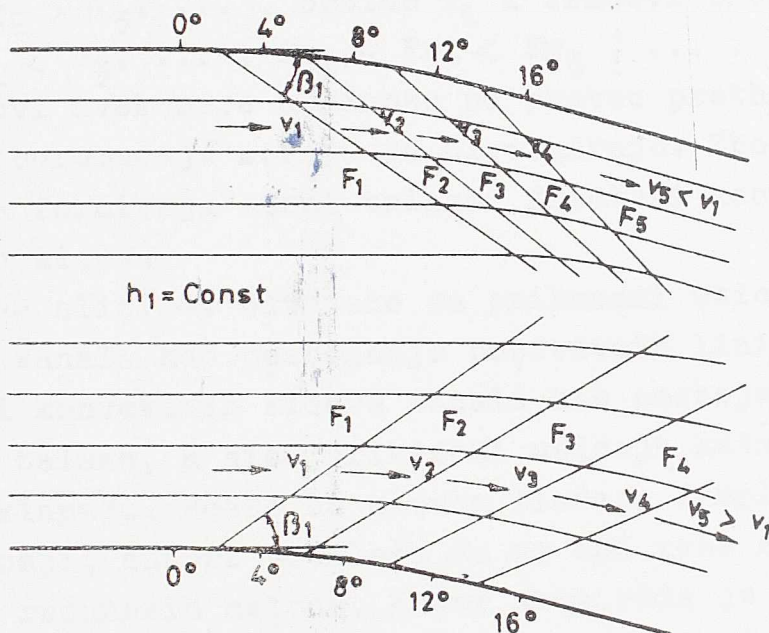
Oblik površine brzih tokova u pravougaonom kanalu se može uočiti praćenjem efekta skretanja granice zida poprečno na tok. Iz tih razloga, zakrivljenje zida kanala zamenjuje se nizom kratkih tetiva, od kojih svaka skreće u odnosu na prethodnu za ugao $\Delta \Theta = 4^\circ$, kako je pokazano na slici 4.

za konkavni i konveksni deo bočnog zida. Na osnovu ove slike i jednačina

$$v \sin \beta = c = \sqrt{gh}$$

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{v^2}{g} \operatorname{tg} \beta$$

mogu se učiniti sledeće pretpostavke.



Slika 4. Linije poremećaja nastale usled konveksnih i konkavnih zidova.

Za konkavni bočni zid sa krivinom ka unutrašnjoj strani toka, sa neporemećenom dubinom h_1 i Frudovim brojem Fr_1 , prvi front talasa seče tok pod uglom β_1 , što daje povećanje dubine Δh . Čim tok prođe ovu liniju talasa strujnice skreću za ugao $\Delta\theta = 4^\circ$, bez obzira na bočno rastojanje od bočnog zida, ali sa produžnim zadržavanjem proporcionalnim ovom odstojanju. Zbog toga će strujnice na početku krivine biti skrenute za 4° . Linije pored konkavnog zida se nazivaju pozitivne linije poremećaja, jer svaka prouzrokuje povećanje dubine $h_1 < h_2 < h_3, \dots$, koje odgovara postavljenom uglu skretanja $\Delta\theta = 4^\circ$, tako da je hidraulička karakteristika strujanja toka preko Frudovog broja definisana opadajućim vrednostima $Fr_1 > Fr_2 > Fr_3, \dots$, kao i opadajućim vrednostima brzina $v_1 > v_2 > v_3, \dots$. Talasni uglovi β_i se povećavaju $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3, \dots$, pa zbog postepenog



skretanja toka za $\Delta\Theta = 4^\circ$ dobija se opšta konvergencija linija talasa poremećaja.

Negativne linije poremećaja nastaju usld konveksne strane bočnog zida koji skreće u stranu od toka, što se vidi na slici 3. Svaka linija predstavlja jednu depresiju nivoa pod uglom β_1 usled tetivnog skretanja zida za $\Delta\Theta = 4^\circ$. Sa opadanjem dubine $h_1 > h_2 > h_3, \dots$, smanjuju se uglovi $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3, \dots$, brzine v_1 i Frudovi brojevi Fr_1 rastu $v_1 < v_2 < v_3, \dots$, $Fr_1 < Fr_2 < Fr_3, \dots$. Pošto se talasni uglovi uvek mere u odnosu na pravac prethodne struje, linije poremećaja moraju da divergiraju. Zbog toga se ne mogu da formiraju strmi talasni frontovi kao rezultat konveksnih zidova.

Na slici 4. odvojeno su prikazani uticaji konkavnih zidova kanala kao postojanje pozitivnih linija talasa, i uticaji konveksnih zidova kanala kao postojanje negativnih linija talasa, a nisu prikazani uticaji kada se ove dve zone preklapaju. Pošto su u ovom slučaju komplikovani granični uticaji, autori predlažu da se oni reše superpozicijom pomoću računskih metoda. Autor ovog rada je krenuo drugim putem i smatra da ne treba na silu nametati prirodni strujanja razna uprošćavanja da bi se dobilo odgovarajuće teorijsko rešenje.

Sem navedenih načelnih razmatranja, iz dosadašnjih radova proizašla je procena maksimalnog izdizanja; u knjigama [1] i [2] navodi se da je dvostruko veće nego u mirnom tečenju. Na ovo će se osvrnuti izlaganja, kasnije, pod 3.1. prilikom iznošenja rezultata radi upoređenja sa navedenim. U pomenutim delima nalaze se i neka praktična razmatranja sa svrhom sprečavanja stvaranja talasa u krivinama, jer se strmi talasi pronose nizvodno iza krivine, a to je nepovoljno. O ovome će biti reči u poglavlju 4.

2. OPIS EKSPERIMENTALNE INSTALACIJE

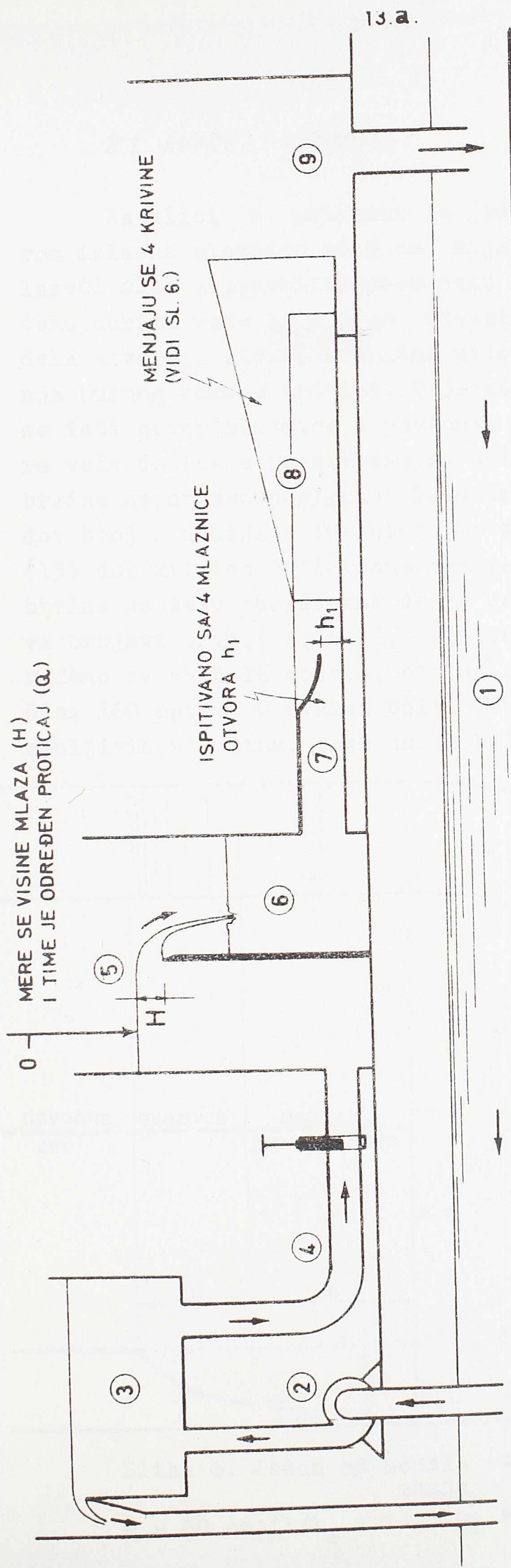
Radi rešavanja zadatka napravljena je eksperimentalna instalacija (slika 5). Njeni glavni sastavni delovi su:

- (1) Donji rezervoar koji omogućava nesmetanu cirkulaciju proticaja;
- (2) Pumpa koja obezbeđuje cirkulaciju proticaja;
- (3) Stabilizacioni rezervoar za izravnavanje proticaja;
- (4) Spojna cev rezervoar-Tomsonova komora;
- (5) Tomsonova komora za merenje proticaja;
- (6) Rezervoar za umirenje koji služi za ostvarivanje pritiska pri isticanju vode;
- (7) Dovodna cev sa mlaznicama za formiranje burnog režima u modelu;
- (8) Model sa ulaznom deonicom;
- (9) Izlazna komora sa odvodnom cevi u donji rezervoar.

Model sa ulaznom deonicom napravljen je u 16 varijanata sa sledećim elementima:

Četiri krivine sa poluprečnikom R i odnosima R/b_1	$R =$	100.	80	60	40 cm
	$\frac{R}{b_1} =$	5	4	3	2
Četiri ulazne mlaznice sa otvorima h_1 i odnosima b_1/h_1	$h_1 =$	$\frac{20}{3}$	5	4	$\frac{10}{3}$ cm
	$\frac{b_1}{h_1} =$	3	4	5	6

Svaka od četiri krivine bila je kombinovana sa svakom od četiri izlazne mlaznice, što čini 16 modela.

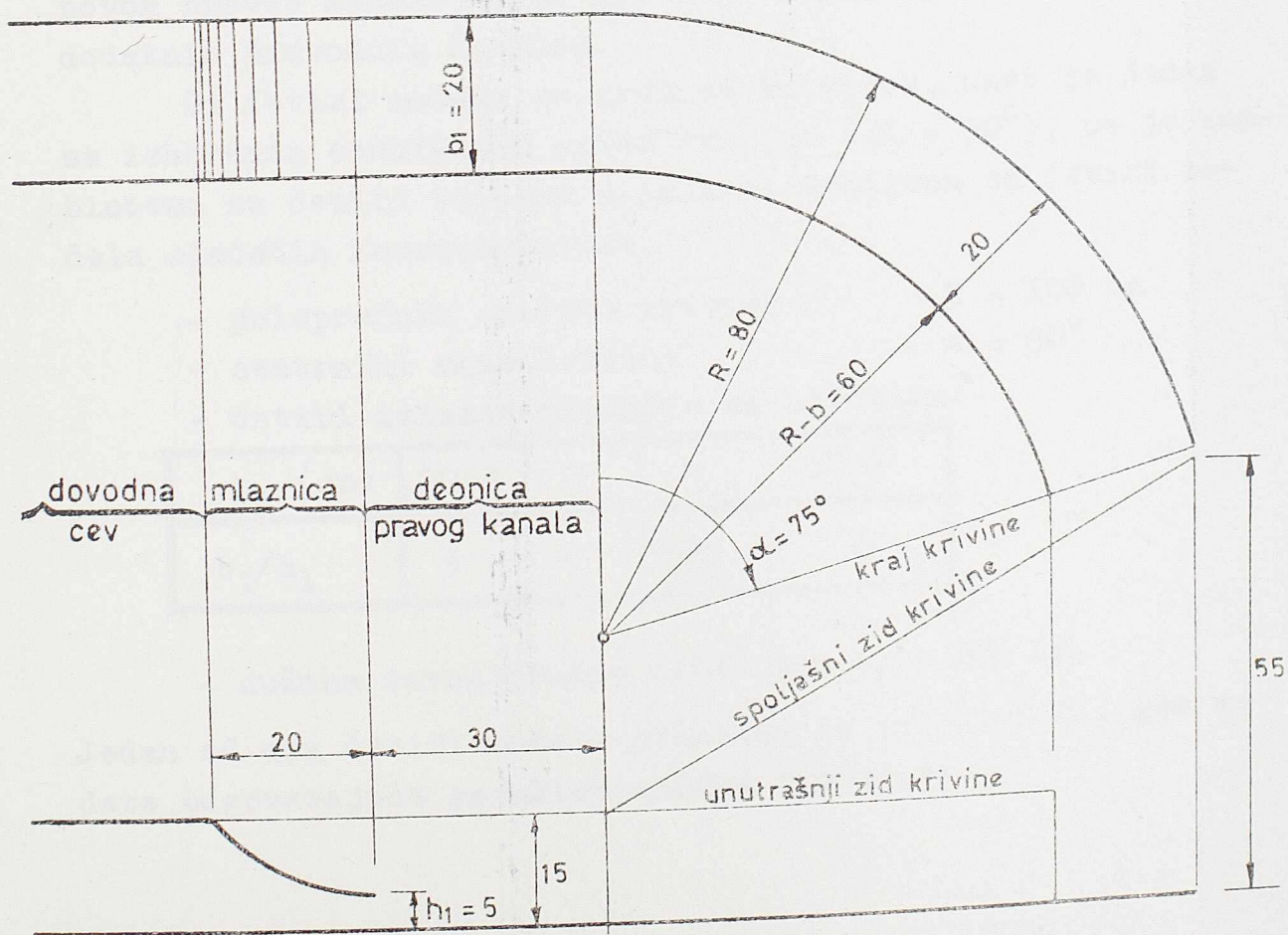


- 1 DONJI REZERVOAR
 2 PUMPA
 3 GORNJI REZERVOAR SA PRELIVOM
 4 SPOJNA CEV REZERVOAR - TOMSONOVA KOMORA, SA ZATVARAČEM ZA REGULACIJU PROTICAJA
 5 TOMSONOV PRELIV ZA MERENJE PROTICAJA
 6 REZERVOAR ZA UMIRENJE VODE
 7 DOVODNA CEV SA MLAZNICOM
 8 MODEL KRIVINE
 9 IZLAZNA KOMORA SA ODVODNOM CEVI

Slika 5. ŠEMA INSTALACIJE

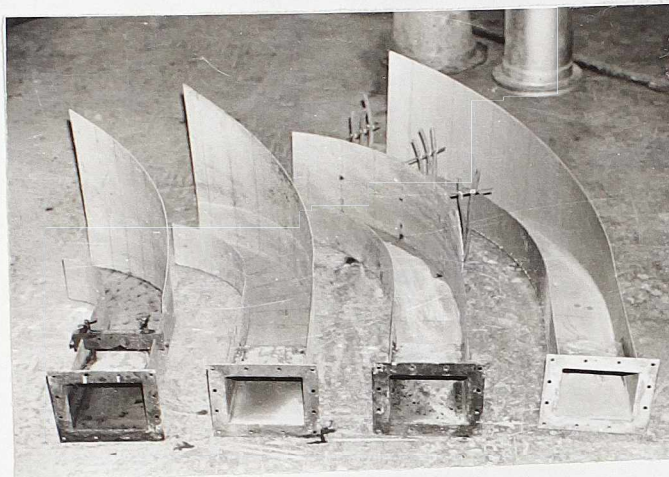
2.1. MODELI KRIVINA

Na slici 6. prikazan je jedan od 16 modela, sa otvorom izlazne mlaznice od 5 cm, koja je tako formirana da izlazeći mlaz u pravolinijskom delu modela zadržava neporemećenu dubinu vode $h_1 = 5$ cm. Mlaznica i pravolinijski deo modela stvaraju ulazni granični uslov za ispitivanje ponašanja burnog toka u krivini. U jednoj seriji opita zadržava se isti otvor mlaznice a povećava proticaj, čime se formira veća dubina u rezervoaru za umirenje, a time i povećava brzina neporemećenog toka. Povećanjem brzine menja se Frudov broj i dobijaju funkcionalne zavisnosti (11), (12) i (13) duž krivine definisane centralnim uglom α . Dolazna brzina je tako podešavana da se zadovolje celobrojni Frudovi brojevi (2,4,6,8,10,12,14,16,18,20). Na ovaj način je rađeno sa svih 16 modela, što uz 10 promena Frudovog broja čini 160 opita. U svakom opitu izvršeno je 21 merenje promenljivih veličina, tako da je bilo ukupno 3360 merenja.



Slika 6. Jedan od modela sa vrednostima koje se menjaju

$$R = 80 \text{ cm}; (R/b_1 = 4) ; h_1 = 5 \text{ cm} (b/h_1 = 4)$$



Slika 7. Četiri izrađena modela.

2.2. MODEL SA DODATNIM NIZVODNIM KANALOM

Da bi se ispitaio poremećaj slobodne površine vode u novom pravcu kanala posle krivine, napravljen je model sa dodatnim nizvodnim kanalom.

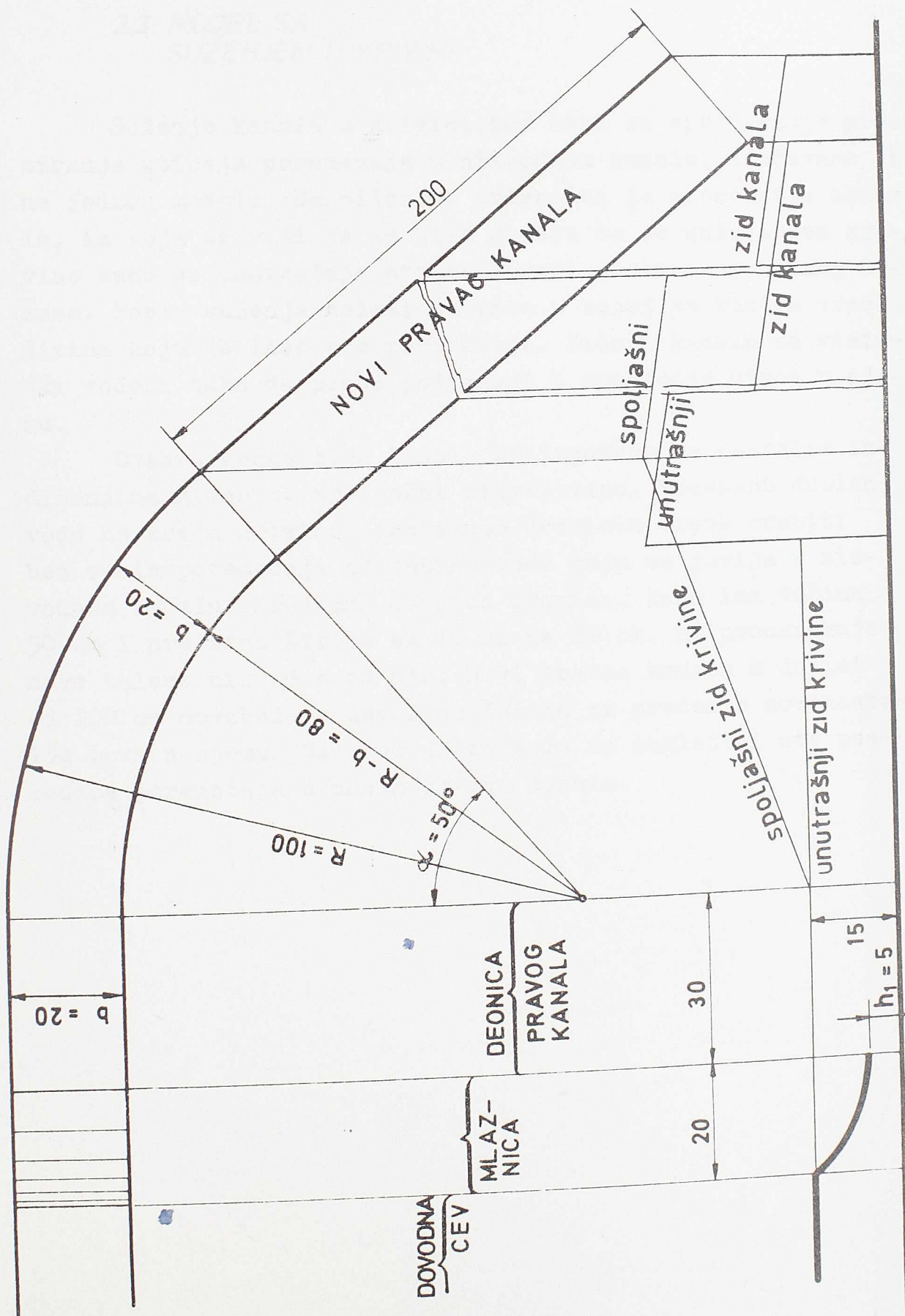
Od četiri modela sa kružnom krivinom, uzet je jedan sa izabranim centralnim uglom krivine ($\alpha = 50^\circ$), pa je kombinovan sa četiri izlazne mlaznice. Dobijena su četiri modela sledećih karakteristika:

- poluprečnik spoljne krivine $R = 100 \text{ cm}$
- centralni ugao krivine $\alpha = 50^\circ$
- četiri izlazne mlaznice sa otvorima:

h_1 (cm)	20/3	5	4	10/3
b_1/h_1	3	4	5	6

- dužina novog pravca uzeta je: $L_0 = 200 \text{ cm}$.

Jedan od ova četiri modela prikazan je na slici 8., gde su date odgovarajuće karakteristične dimenzije.

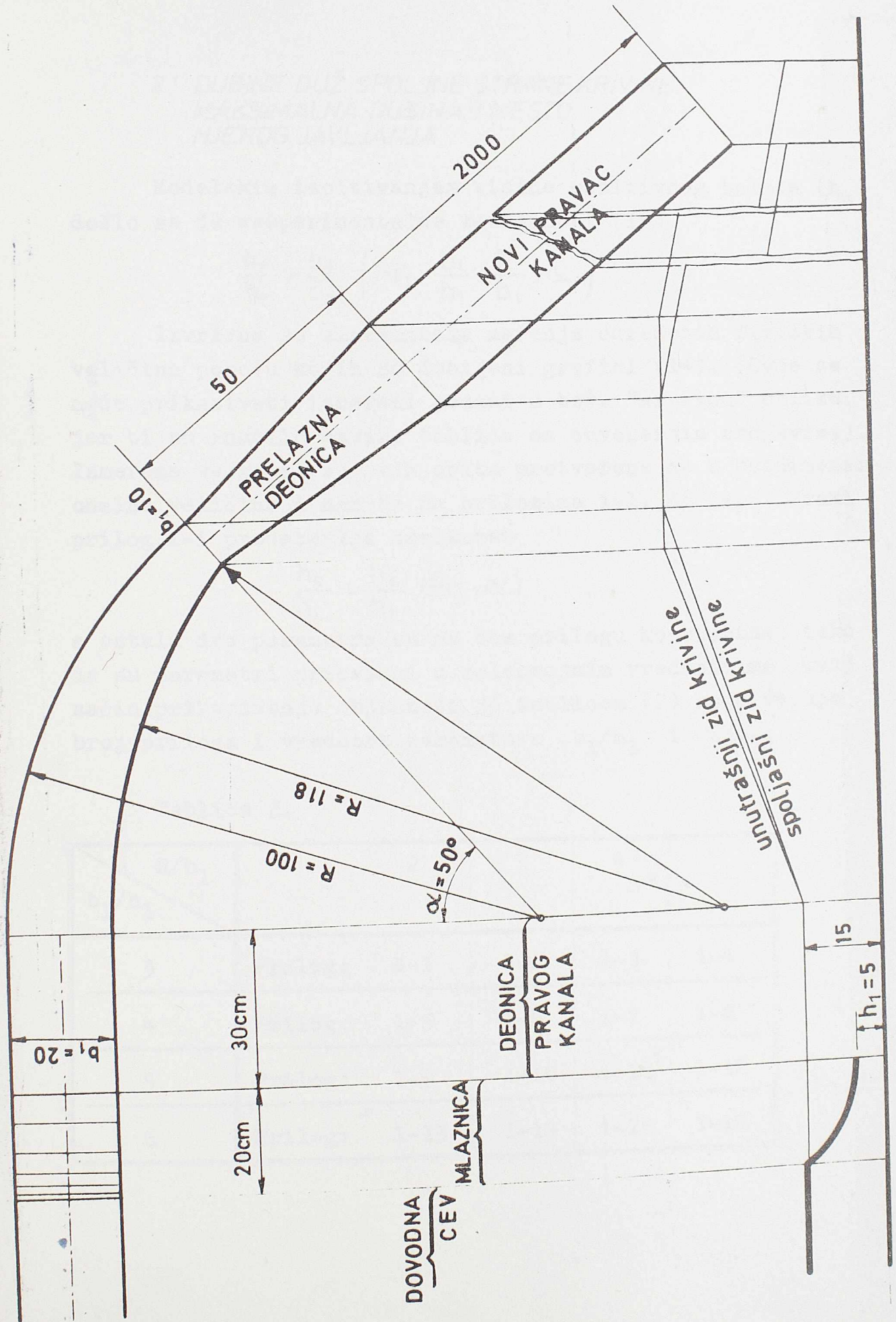


Slika 8. JEDAN OD MODELA SA NIZVODNIM KANALOM

2.3. MODEL SA SUŽENJEM U KRIVINI

Suženje kanala u krivini, kao mera za sprečavanje prostriranja uticaja poremećaja u nizvodnom kanalu, izučavano je na jednom modelu. Na slici 9. prikazana je geometrija modela, iz koje se vidi da je bila namera da se sužavanjem krivine samo sa unutrašnje strane spreči pojava negativnog talasa. Posle suženja dolazi deonica u kojoj se kanalu vraća širina koju je imao pre poremećaja. Zidovi kanala su visinski vođeni tako da prate podizanje i spuštanje nivoa u njemu.

Ovakva geometrija kanala prilagođava se nastalim izdizanjima nivoa uz spoljašni zid krivine. Povećanu dubinu vode na kraju krivine, prelaznom deonicom treba vratiti bez većih poremećaja na dubinu vode koja se javlja u nizvodnom kanalu. Prelazna deonica deonica, koja ima dužinu 50 cm i prelazom širina sa 10 cm na 20 cm, ne prouzrokuje nove talase nizvodno od nje. Novi pravac kanala u dužini od 200 cm obezbeđuje dovoljnu dužinu za praćenje novonastalog toka u njemu. Na ovaj način mogu se sagledati sve posledice poremećaja u novom pravcu kanala.



Slika 9. MODEL SUŽENJA U KRIVINI

3.1. DUBINE DUŽ SPOLJNE STRANE KRIVINE.
MAKSIMALNA DUBINA I MESTO
NJENOG JAVLJANJA.

Modelskim ispitivanjem visine pozitivnog talasa (h_s) došlo se do eksperimentalne zavisnosti (14)

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha \right)$$

Izvršena su sistematska merenja određenih fizičkih veličina pomoću kojih su dobijeni grafici (14). (Ovde se neće prikazivati izmereni podaci u tzv. "sirovom" obliku, jer bi to značilo suviše tablica sa suvoparnim brojevima). Izmerene veličine sa svih opita pretvorene su u bezdimenzionalne veličine i nanete na prilozima 1-1. do 1-16. Svaki prilog 1-i predstavlja zavisnost

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} (Fr_1, \alpha)$$

a ostala dva parametra su na tom prilogu konstantna, tako da su parametri prikazani u celobrojnim vrednostima. Ovaj način prikazivanja objašnjen je tablicom (2) koja vezuje broj priloga i vrednost parametara b_1/h_1 i R/b_1 .

Tablica 2.

R/b_1 b_1/h_1	2	3	4	5
3	Prilog: 1-1	1-2	1-3	1-4
4	Prilog: 1-5	1-6	1-7	1-8
5	Prilog: 1-9	1-10	1-11	1-12
6	Prilog: 1-13	1-14	1-15	1-16

3.
PRIKAZ
I TUMAČENJE
EKSPERIMENTALNIH
REZULTATA

Analizirajući pomenute priloge, dolazi se do izvesnih zaključaka koji razjašnjavaju pojavu izdizanja nivoa uz spoljašni zid krivine. Zadržavanjem konstantnosti parametara Fr_1 , b_1/h_1 i R/b_1 i posmatranjem izdizanja nivoa u zavisnosti od skretnog ugla krivine (α), primećuje se da se izdizanje nivoa povećava sa povećanjem ugla krivine do izvesne granice, a zatim izdizanje opada i pored daljeg povećanja ugla skretanja. Znači da postoji neki ugao (α) koji daje maksimalno izdizanje nivoa, posle koga tok biva odbacivan ka unutrašnjoj strani krivine. Ova pojava maksimalnog izdizanja nivoa i njegovog položaja biće zasebno obrađena. Zadržavajući i dalje konstantnost parametara b_1/h_1 i R/b_1 , dok Fr_1 raste, vidi se da izdizanje nivoa uglavnom raste, što u izvesnim zonama ne važi. Ovo odstupanje od logične promene nastaje pri manjim Fr_1 brojevima i većim skretnim uglovima (α), što se može donekle objasniti sinusoidalnim ponašanjem linije nivoa uz zid krivine. Za ostala dva parametra: b_1/h_1 i R/b_1 ne može da se napravi nikakav zaključak o pravilnosti ponašanja linije nivoa kada se oni menjaju.

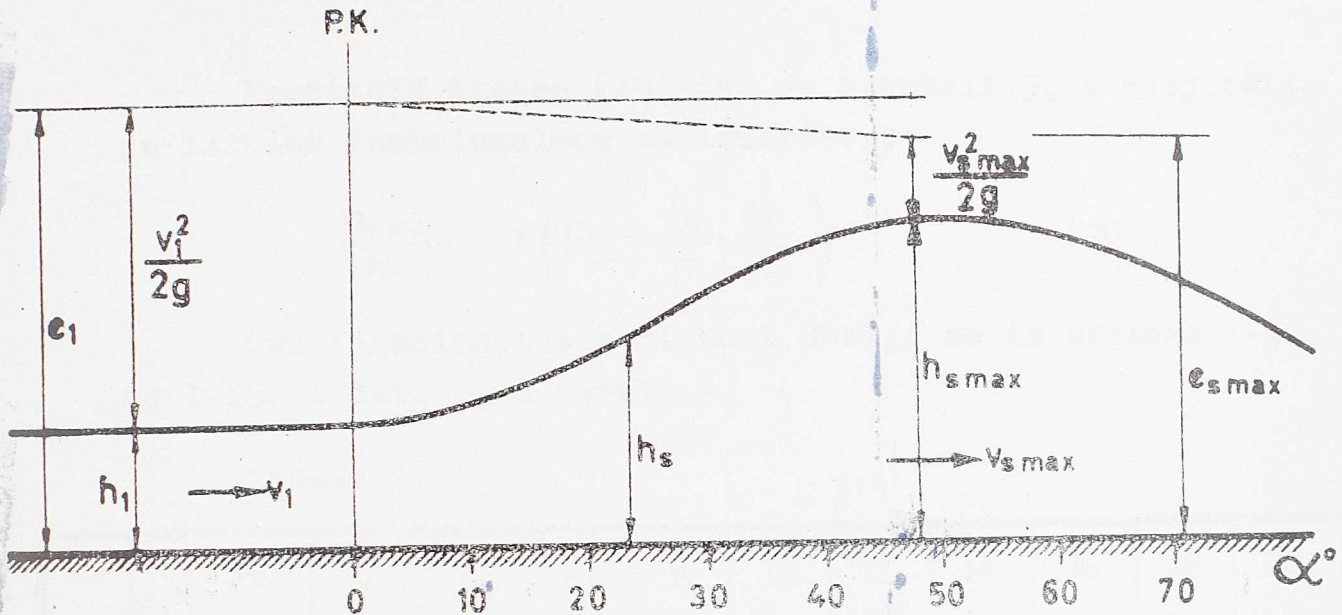
Za inženjere je od značaja da se ispita vrednost maksimalnog izdizanja nivoa vode u pozitivnom stojećem talasu, kao i položaj istog u pravcu strujanja. Ako se nacрта podužni presek duž zida spoljne krivine sa linijom nivoa i energetsom linijom (slika 16), sa energetsom gubitkom, dobiće se sledeća analiza

Zbir dubine i brzinske visine (tzv. "specifična energija") u ulaznom preseku iznosi:

$$e_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (17)$$

Uspostavlja se odnos e_1/h_1

$$\frac{e_1}{h_1} = 1 + \frac{v_1^2}{2g h_1}$$



Slika 10.

Kako je Frudov broj već definisan dolaznom brzinom

$$Fr_1 = \frac{v_1^2}{g h_1}$$

gornji odnos dobijamo u zavisnosti od Frudovog broja

$$\frac{e_1}{h_1} = 1 + \frac{1}{2} Fr_1 \quad (18)$$

Za ispitivane vrednosti Frudovih brojeva ovaj odnos bi iznosio:

Tabela 3.

Fr_1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\frac{e_1}{h_1}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Maksimalnu dubinu $h_{s \max}$ treba porediti sa dola-
zećom energijom e_1 ; to se pogodno predstavlja odnosom

$$C = \frac{h_{s \max}}{e_1}$$

ili

$$C = \frac{\frac{h_{s \max}}{h_1}}{\frac{e_1}{h_1}} \quad (19)$$

Imenitelj izraza (19) dat je u tabeli 3, a brojitelj je izražen funkcionalnom zavisnošću:

$$\frac{h_{s \max}}{h_1} = f \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right) \quad (20)$$

Ova funkcionalna zavisnost dobija se iz priloga 1-1. do 1-16. i data je u tabeli 4.

Tabela 4.

$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
2	3		2,08	2,82	3,72	4,45						
	4		1,90	2,75	3,55	4,28						
	5		1,84	2,76	3,62	4,36	5,06					
	6		1,82	2,84	3,66	4,30	5,00	5,60				
3	3		1,64	2,31	3,05	3,66	4,34					
	4		1,56	2,15	2,82	3,34	4,00	4,45	4,94			
	5		1,62	2,16	2,66	3,20	3,76	4,32	4,84	5,26		
	6		1,60	2,36	2,98	3,58	4,23	4,86	5,00	5,98		
4	3		1,44	1,95	2,53	3,08	3,59	4,00	4,54	5,07		
	4		1,44	1,90	2,35	2,90	3,62	4,30	4,75	5,14	5,42	5,72
	5		1,44	2,04	2,42	2,96	3,30	3,86	4,25	5,08	5,40	5,72
	6		1,45	1,92	2,43	2,88	3,40	3,80	4,25	4,85	5,36	5,78
5	3		1,40	1,76	2,22	2,62	3,04	3,48	3,96	4,32	4,98	5,38
	4		1,41	1,78	2,17	2,53	2,98	3,38	3,80	4,26	4,57	4,88
	5		1,44	1,83	2,13	2,55	2,95	3,30	3,64	4,16	4,42	4,84
	6			1,82	2,19	2,60	2,93	3,24	3,54	3,94	4,30	4,65

Pomoću podataka iz tabela (3) i (4) dobijene su numeričke vrednosti za

$$C = f \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right)$$

i date u tabeli (5).

Tabela 5.

$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
2	3		1,04	0,94	0,93	0,89						
	4		0,95	0,92	0,89	0,86						
	5		0,92	0,92	0,90	0,88	0,84					
	6		0,91	0,95	0,92	0,86	0,84	0,80				
3	3		0,82	0,77	0,76	0,73	0,72					
	4		0,78	0,72	0,70	0,67	0,67	0,64	0,62			
	5		0,81	0,72	0,66	0,64	0,63	0,62	0,60	0,59		
	6		0,80	0,78	0,75	0,72	0,71	0,69	0,63	0,65		
4	3		0,72	0,65	0,63	0,62	0,59	0,57	0,57	0,56		
	4		0,72	0,63	0,59	0,58	0,60	0,61	0,59	0,57	0,54	0,52
	5		0,72	0,68	0,60	0,59	0,55	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52
	6		0,72	0,64	0,61	0,58	0,57	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53
5	3		0,70	0,58	0,56	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,50	0,49
	4		0,70	0,59	0,54	0,51	0,49	0,48	0,47	0,47	0,46	0,44
	5		0,72	0,61	0,53	0,51	0,49	0,47	0,46	0,46	0,44	0,44
	6			0,61	0,55	0,52	0,49	0,46	0,44	0,44	0,43	0,43

Posmatrajući tabelu (5) zaključuje se o vrednostima uvedenog parametra "C" u zavisnosti od:

- Frudovog broja neporemećenog toka. Parametar "C" opada sa porastom Fr_1 ;

- odnosa poluprečnika krivine i širine neporemećenog toka. Parametar "C" opada sa porastom odnosa R/b_1 ;

- odnosa širine i dubine neporemećenog toka. Parametar "C" nema određenu tendenciju promene sa promenom odnosa b_1/h_1 . Može se videti da raste, opada, pa čak zadržava konstantnu vrednost pri promeni odnosa b_1/h_1 od vrednosti 3 do vrednosti 6, na osnovu čega je tražena srednja vrednost za "C" u odnosu na parametar b_1/h_1 .

$$\bar{C} = \frac{C_3 + C_4 + C_5 + C_6}{4}$$

gde su indeksi 3,4,5 i 6 vrednosti odnosa $b_1/h_1 = 3,4,5,6$.
 Vrednosti za " \bar{C} " dobijene iz tabele (5) date su u tabeli (6) i nacrtane na slici (11).

Tabela 6.

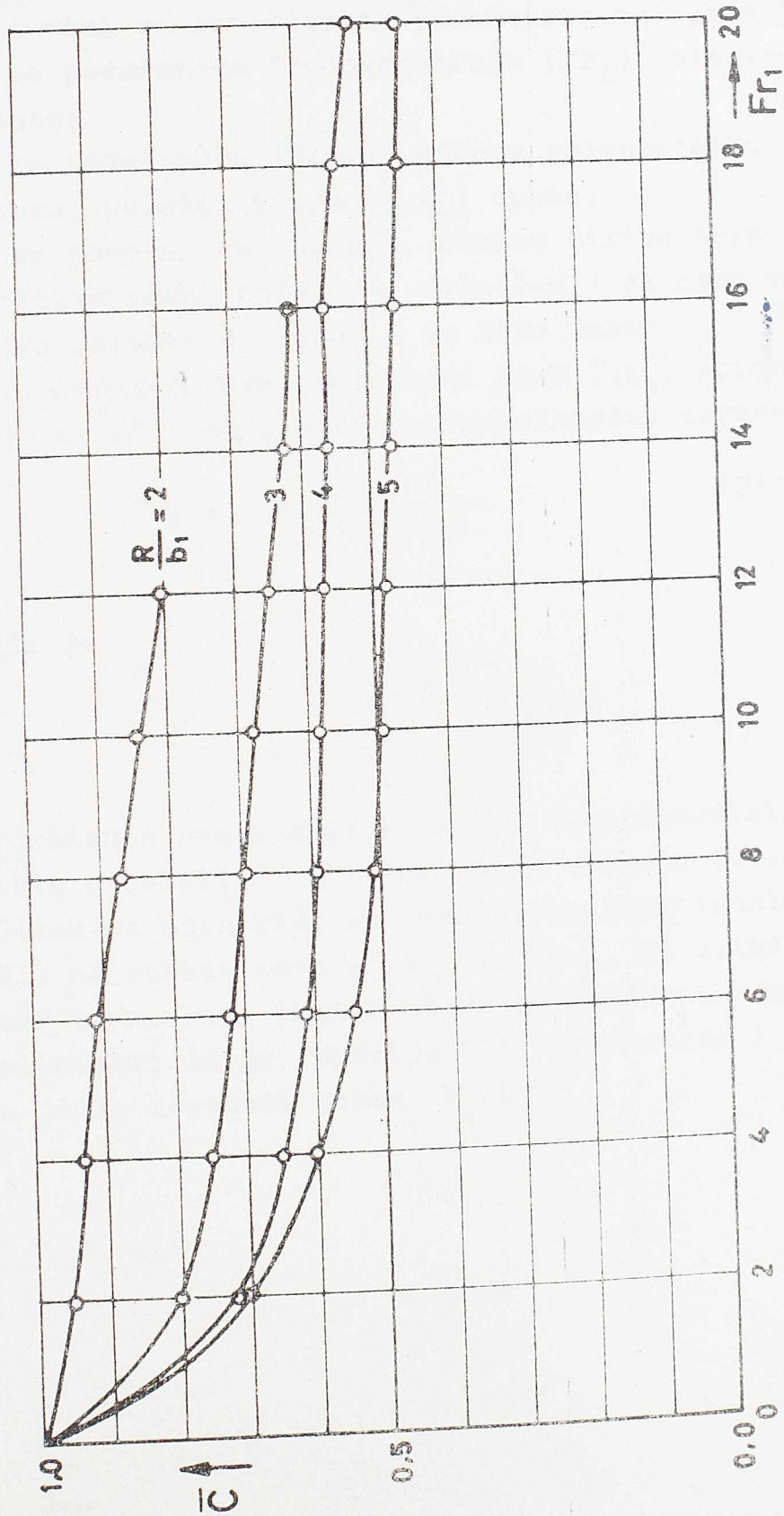
C	R $\frac{R}{b_1}$	Fr ₁	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
			2	0,95	0,93	0,91	0,80					
3	0,80	0,75	0,75	0,69	0,68	0,65	0,62	0,62				
4	0,72	0,65	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,56	0,54	0,52		
5	0,71	0,60	0,54	0,51	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45		

Mesto na kome se formira maksimalna dubina h_s max u krivini, određeno je centralnim uglom α_s . Vađenjem vrednosti za α_s iz priloga (1-1. do 1-16) dobija se tabela 7.

Tabela 7.

$\frac{b_1}{h_1}$	R $\frac{R}{b_1}$	Fr ₁	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
			3	2	39°	52°	62°	75°				
3	3	30°	42°	52°	60°	65°	71°					
	4	23°	33°	41°	47°	53°	59°	64°	69°			
	5	14°	24°	31°	38°	44°	49°	53°	58°	61°	64°	
	2	34°	47°	57°	68°							
	3	26°	38°	47°	53°	58°	63°	67°				
4	4	19°	30°	38°	42°	47°	51°	55°	59°	62°	65°	
	5	11°	21°	28°	34°	38°	42°	46°	49°	52°	55°	
	2	31°	44°	53°	61°	69°						
5	3	24°	36°	44°	49°	54°	59°	63°	68°			
	4	16°	28°	35°	39°	43°	47°	50°	53°	56°	59°	
	5	9°	19°	26°	32°	35°	38°	41°	44°	46°	48°	
6	2	29°	40°	49°	56°	62°	69°					
	3	22°	34°	40°	46°	51°	56°	59°	63°	67°	70°	
	4	15°	26°	32°	37°	40°	44°	47°	50°	53°	55°	
	5	8°	17°	24°	30°	33°	36°	39°	41°	42°	43°	
	5	9°	19°	26°	32°	35°	38°	41°	44°	46°	48°	

ZAVISNOST $\bar{C} = f(Fr_1 \cdot \frac{R}{b_1})$



Slika 11.

Analizirajući podatke iz tabele (7) vidi se da položaj maksimalnog izdizanja nivoa vode na konkavnoj strani krivine zavisi od ispitivanih parametara na sledeći način:

- sa povećanjem Frudovog broja (Fr_1) položajni ugao (α_s) raste;
- sa povećanjem (R/b_1), odnosa poluprečnika krivine i širine toka, položajni ugao (α_s) opada;
- sa povećanjem (b_1/h_1), odnosa širine toka i dubine neporemećenog toka, položajni ugao (α_s) za neke vrednosti ostala dva parametra opada, a za neke raste

Proučavajući ovaj položajni ugao (α_s) autori literature [1] i [2] daju sledeću funkcionalnu zavisnost:

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{b_1}{R} \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \quad (21)$$

gde je

$$\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{Fr_1}}$$

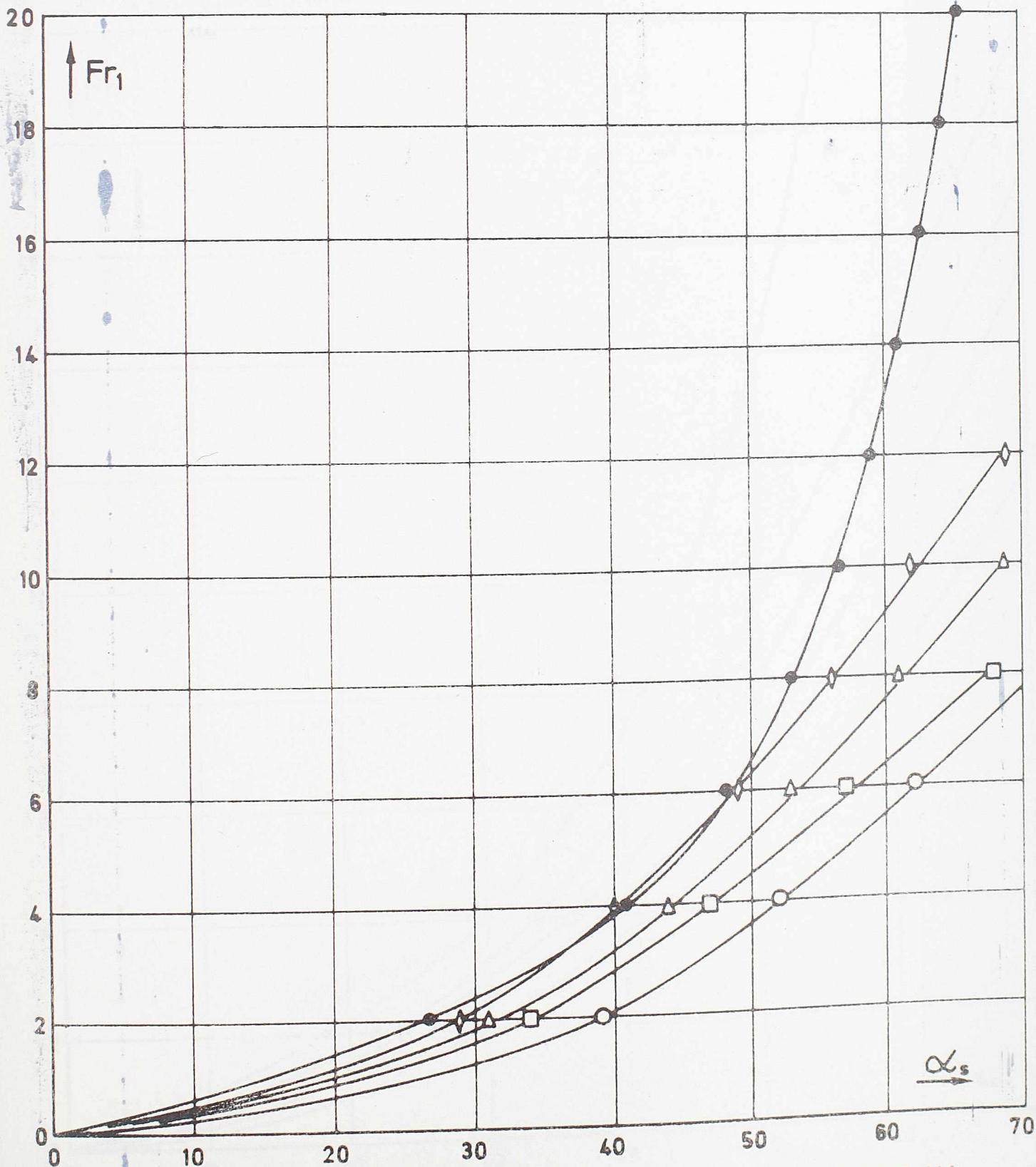
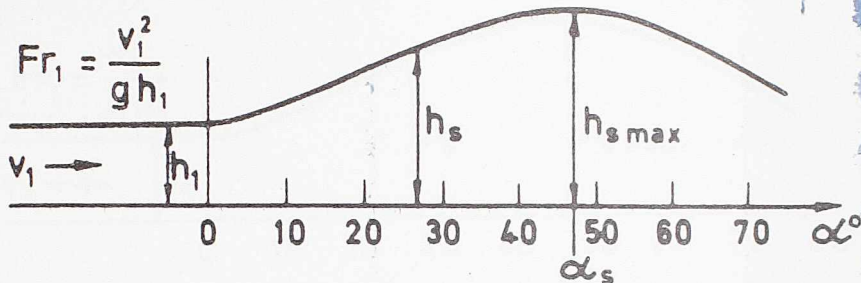
Poređenje ove funkcije (21) i eksperimentalnih rezultata datih u tabeli 7. urađeno je na slikama (12, 13, 14 i 15).

Odnah se mora reći da predložena funkcionalna zavisnost (21) od strane autora [1] i [2], ne uzima u obzir parametar b_1/h_1 koji znatno utiče na vrednost α_s . Može se konstatovati da je funkcija (21) predložena i odgovara samo za jedan određen odnos b_1/h_1 .

$$\frac{R}{b_1} = 2$$

b_1/h_1			
3	4	5	6
○	□	△	◇

● TEORIJSKA KRIVA

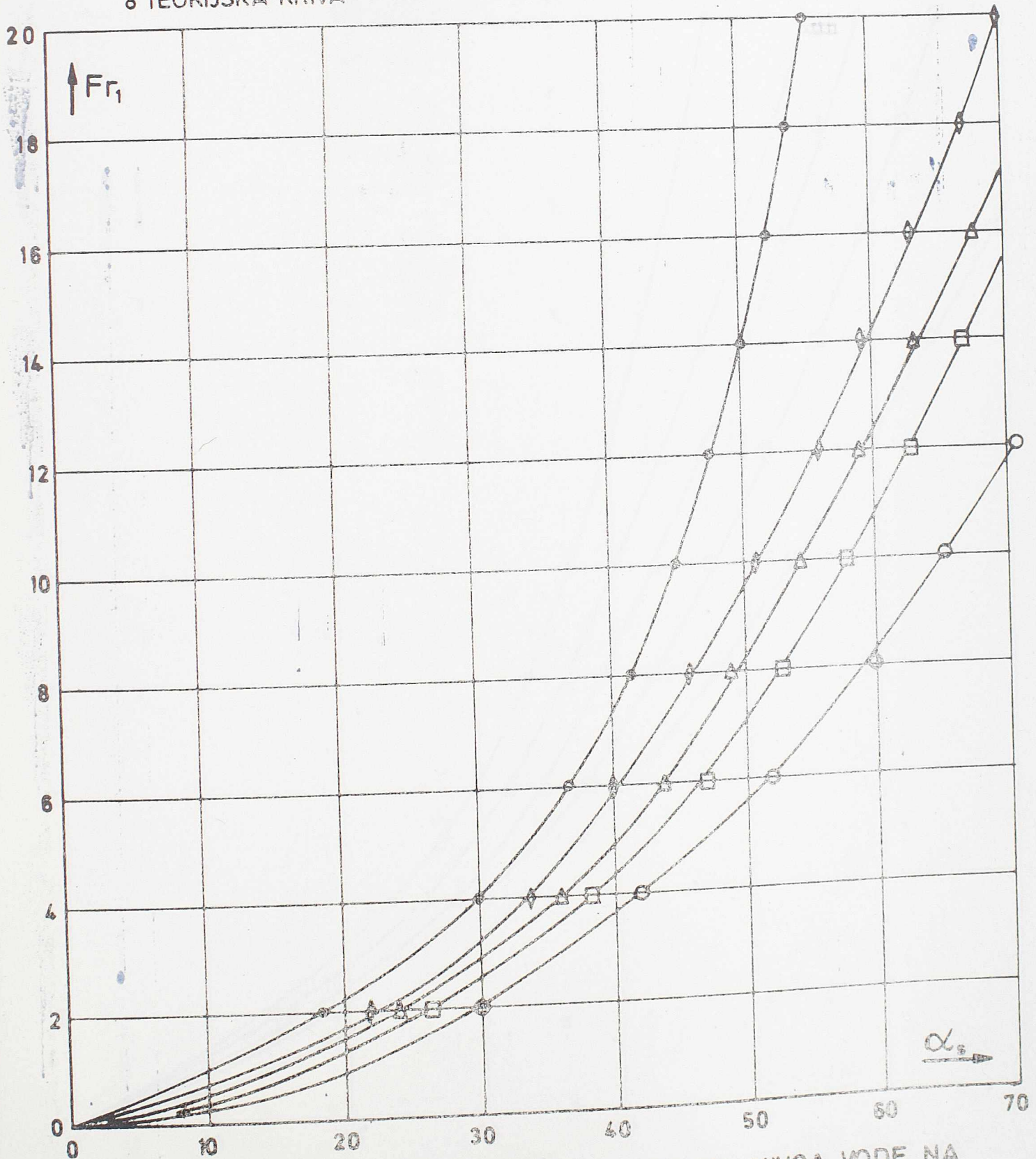
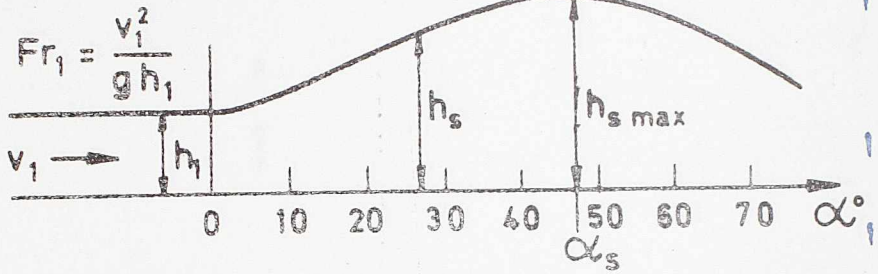


Slika 12. POLOŽAJ MAKSIMALNOG IZDIZANJA NIVOA VODE NA KONKAVNOJ STRANI KRIVINE

$$\frac{R}{b_1} = 3$$

b_1/h_1			
3	4	5	6
○	□	△	◇

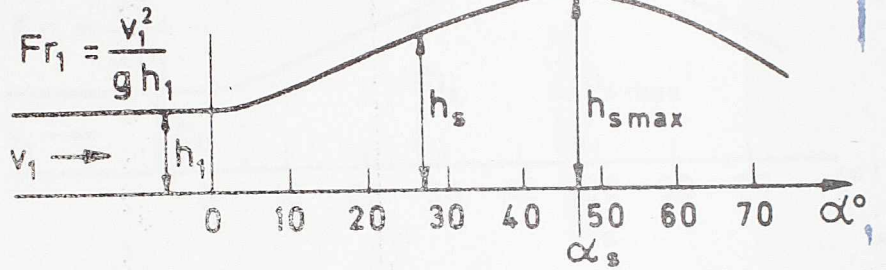
○ TEORIJSKA KRIVA



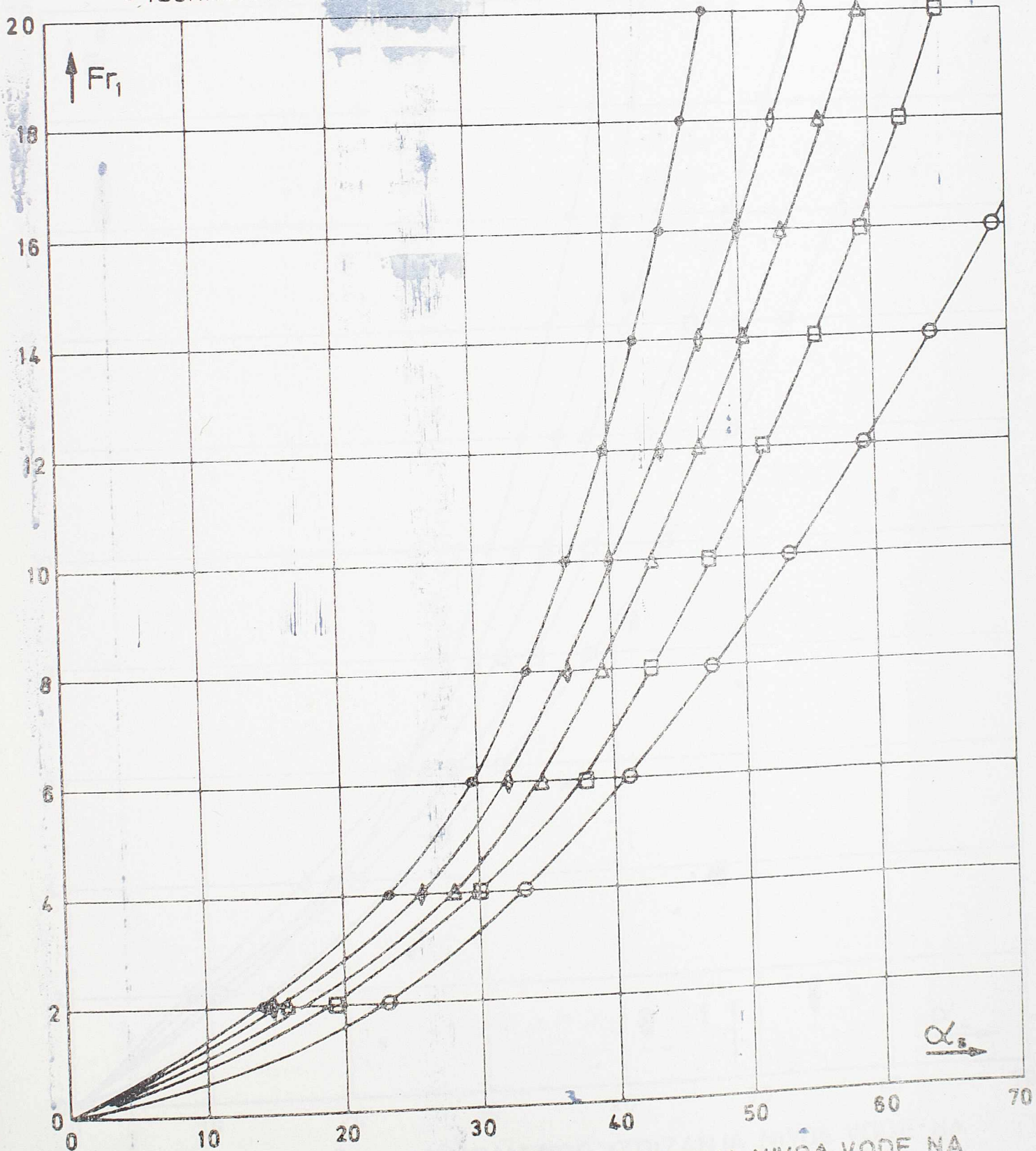
Slika 13. POLOŽAJ MAKSIMALNOG IZDIŽANJA NIVOVA VODE NA KONKAVNOJ STRANI KRIVINE

$$\frac{R}{b_1} = 4$$

b_1/h_1			
3	4	5	8
○	□	△	◇



● TEORIJSKA KRIVA



Slika 14. POLOŽAJ MAKSIMALNOG IZDIZANJA NIVŌA VODE NA KONKAVNOJ STRANI KRIVINE

$$\frac{R}{b_1} = 5$$

b_1/h_1			
3	4	5	6
○	□	△	◇

• TEORIJSKA KRIVA

$$Fr = \frac{v_1^2}{gh_1}$$

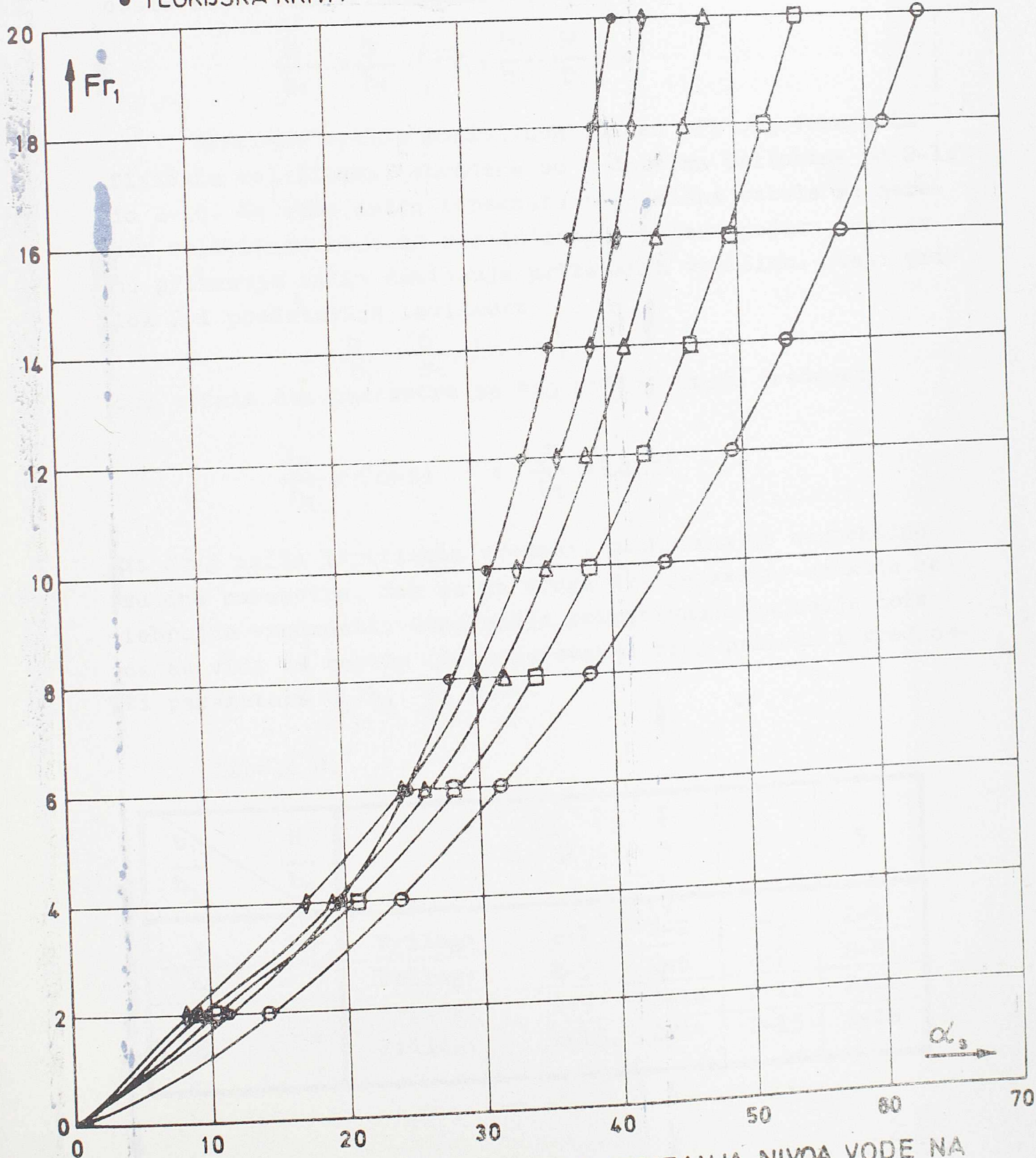
$v_1 \rightarrow$

h_1

0 10 20 30 40 50 60 70 α°

h_s

$h_{s \max}$



Slika 15. POLOŽAJ MAKSIMALNOG IZDIZANJA NIVOA VODE NA KONKAVNOJ STRANI KRIVINE

3.2. ŠIRINA POZITIVNOG TALASA

Modelskim ispitivanjem širine pozitivnog talasa (b) došlo se do eksperimentalne zavisnosti (funkcija 15):

$$\frac{b}{b_1} = \frac{b}{b_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha \right)$$

Izmerene širine pozitivnog talasa pri odgovarajućim fizičkim veličinama, obrađene su i date na priložima od 2-1. do 2-16. Na ovaj način izbegnute su suvišne tabele sa merenim veličinama koje ne objašnjavaju željenu pojavu, već samo prikazuju način dobijanja prikazanih veličina. Svaki prilog 2-1 predstavlja zavisnost

$$\frac{b}{b_1} = \frac{b}{b_1} (Fr_1, \alpha)$$

dok ostala dva parametra za taj prilog imaju vrednost:

$$\frac{b_1}{h_1} = \text{Const} \quad \text{i} \quad \frac{R}{b_1} = \text{Const}$$

Na ovaj način ispitivana vrednost prikazana je neprekidno za dva parametra, dok se za druga dva parametra uzimaju celobrojne vrednosti. Ovaj način prikazivanja najbolje može da se vidi iz tabele (8) koja vezuje broj priloga i vrednosti parametara b_1/h_1 i R/b_1 .

Tabela 8.

$\frac{b_1}{h_1} \backslash \frac{R}{b_1}$	2	3	4	5
3	Prilog: 2-1	2-2	2-3	2-4
4	Prilog: 2-5	2-6	2-7	2-8
5	Prilog: 2-9	2-10	2-11	2-12
6	Prilog: 2-13	2-14	2-15	2-16

Analizirajući ove priloge koji daju predstavu o širenju pozitivnog talasa kroz krivinu, dolazi se do sledećih zaključaka: Sa porastom Frudovog broja, širina pozitivnog talasa opada, talas se sve više priljubljuje uz spoljnu (konkavnu) stranu krivine. Objašnjenje ovoga je kroz izraz za centrifugalnu silu koja zavisi od ulazne brzine u krivini i raste sa kvadratom brzine. Na osnovu delovanja ove sile masa vode teži da se priljubi uz spoljnu stranu krivine. Sa porastom ugla (α) odnos b/b_1 uglavnom raste, izuzevši slučaj za $\alpha > 50^\circ$ i $Fr_1 > 16$ u zavisnosti od ostala dva parametra, kada odnos b/b_1 opada. Ova pojava uočena je posebno na prilogu 2-2, i u manjoj meri na priložima 2-6, 2-10 i 2-14. Za ostala dva parametra R/b_1 i b_1/h_1 ne može se sa sigurnošću reći kako se ponaša širina pozitivnog talasa.

Za inženjere je od velike važnosti da znaju mesto udara pozitivnog talasa u unutrašnju stranu krivine. Ovo mesto je karakteristično u hidrauličkom pogledu jer se posle tog ugla javljaju složeni talasi u krivini, pa se više ne može govoriti o pravilnom javljanju pozitivnog i negativnog talasa. Iz priloga 2-1. do 2-16. izvađeni su podaci o uglu α_u za ovo mesto i dati u tabeli (9).

Mesto udara pozitivnog talasa u unutrašnju (konveksnu) stranu krivine definisan je uglom

$$\alpha_u = \alpha_u \left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1} \right)$$

Na osnovu podataka iz tabele (9) nacrtane su slike 16, 17, 18 i 19. koje grafički prikazuju mesto udara pozitivnog talasa u unutrašnji zid krivine funkcijom:

$$\alpha_u = \alpha_u \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1} \right) \quad (22)$$

Prazna mesta u tabeli (9) ne znače da za te vrednosti parametara Fr_1 , b_1/h_1 i R/b_1 ne postoji (α_u) kao mesto udara već to znači da za te vrednosti pojava je izašla iz domena ispitivanja pa u opsegu $0 < \alpha < 70^\circ$ nema rešenja.

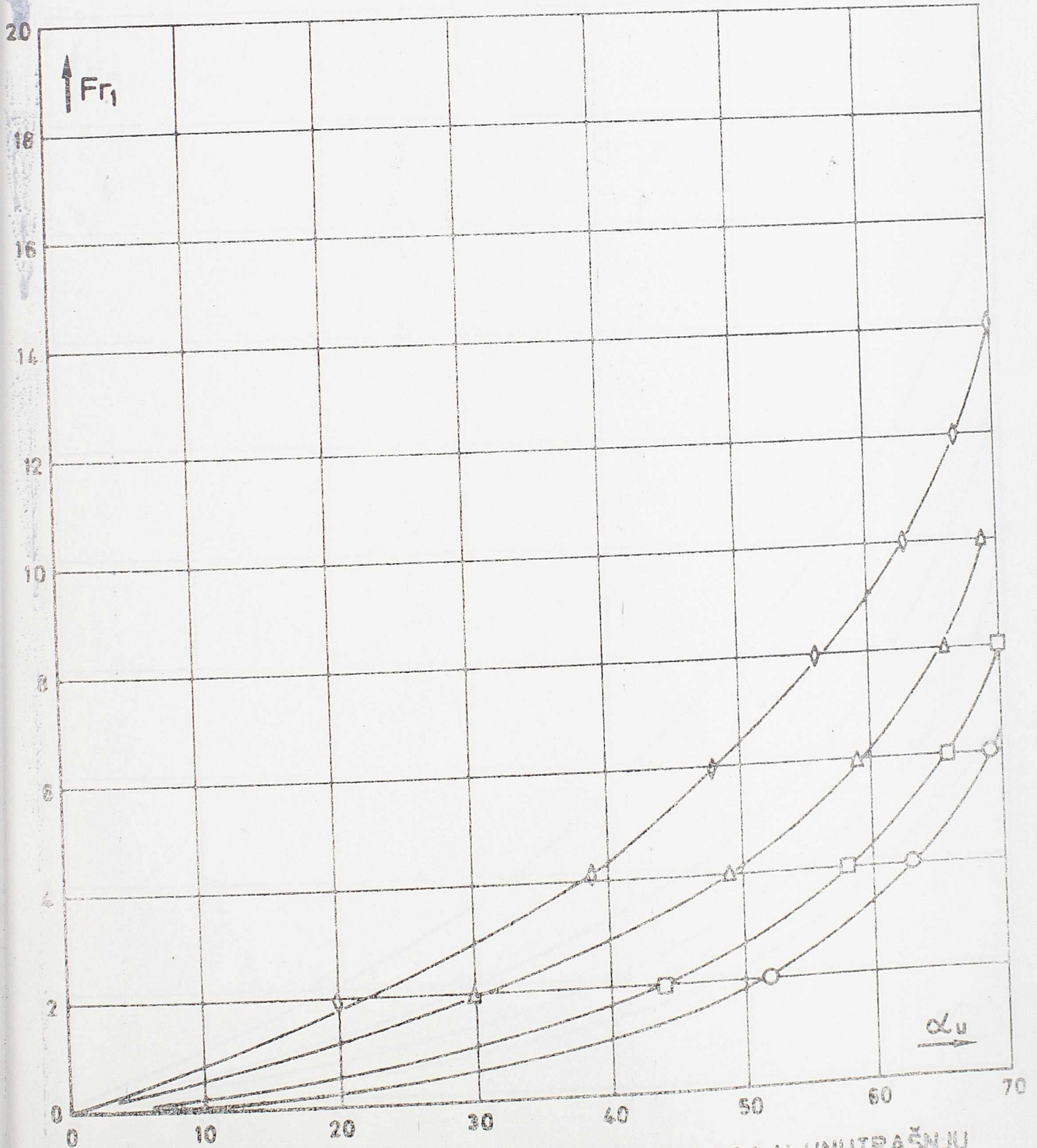
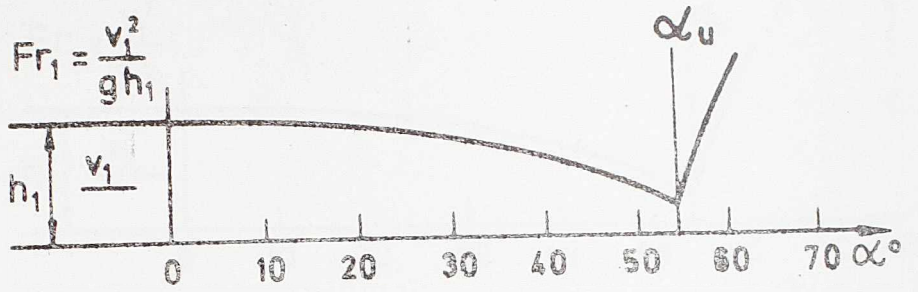
Tabela 9.

$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
2	3		52°	63°	69°							
	4		49°	61°	68°							
	5		45°	58°	65°	69°						
	6		42°	56°	62°	68°						
3	3		44°	58°	66°	70°						
	4		40°	55°	63°	68°	70°					
	5		38°	51°	58°	63°	67°					
	6		37°	48°	56°	61°	65°					
4	3		30°	49°	59°	66°	69°					
	4		29°	46°	55°	61°	66°	69°				
	5		28°	42°	49°	54°	59°	64°	68°			
	6		27°	41°	47°	51°	55°	59°	67°	70°		
5	3		20°	39°	48°	56°	63°	67°	70°			
	4		18°	33°	42°	50°	57°	62°	66°	69°		
	5		17°	31°	38°	44°	50°	55°	59°	65°	69°	
	6		16°	28°	34°	38°	40°	44°	48°	52°	55°	58°

$$\frac{b_1}{h_1} = 3$$

R/b ₁			
2	3	4	5
○	□	△	◇

$$Fr_1 = \frac{v_1^2}{gh_1}$$

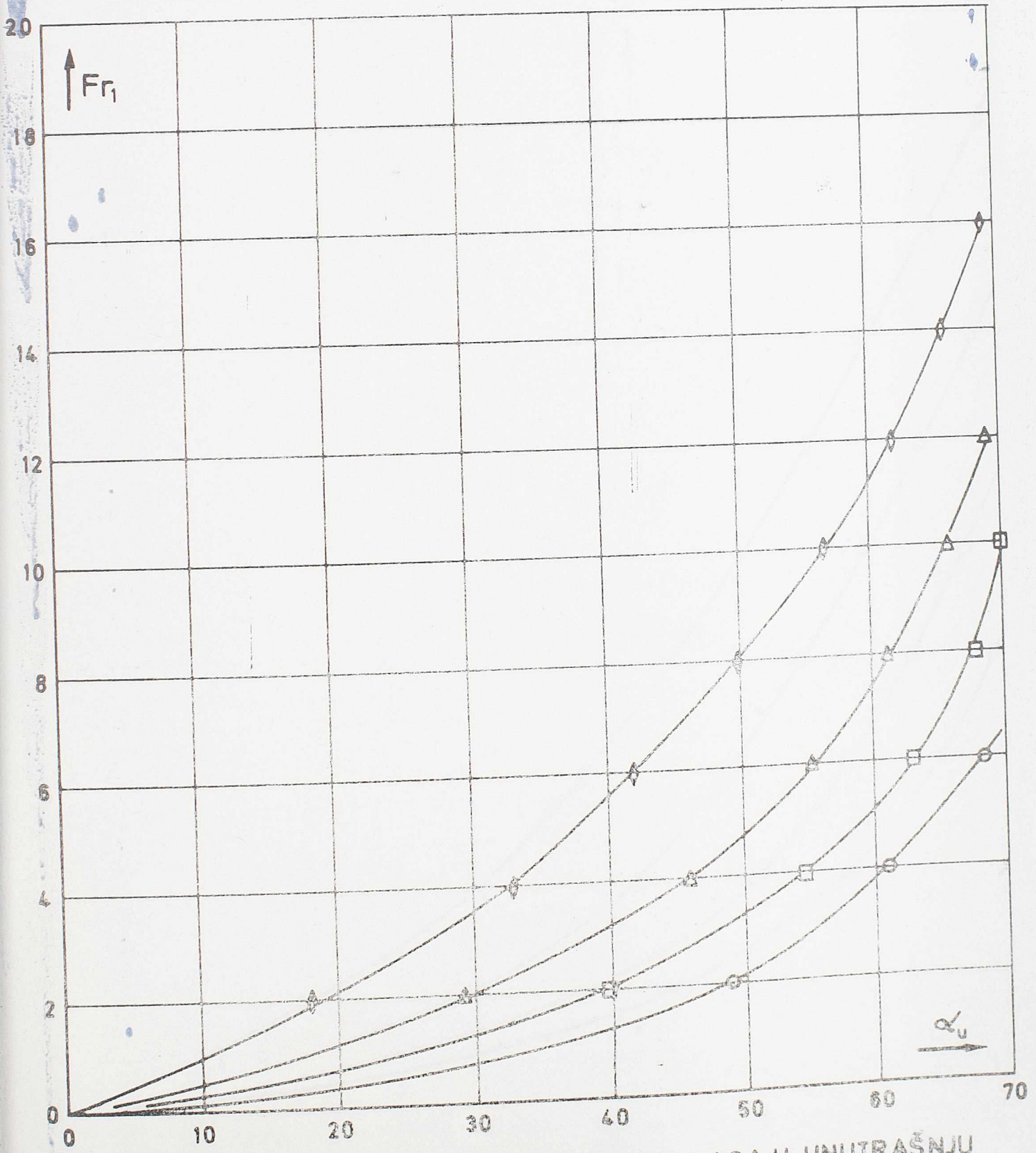
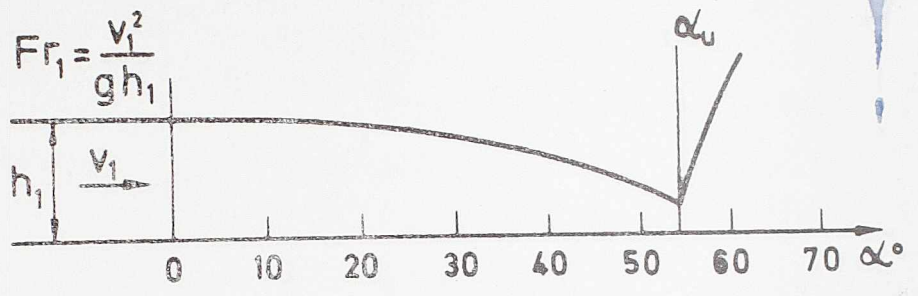


Slika 16. MESTO UDARA POZITIVNOG TALASA U UNUTRAŠNJU (KONVEKSNJU) STRANU KRIVINE

$$\frac{b_1}{h_1} = 4$$

$$Fr_1 = \frac{v_1^2}{gh_1}$$

R/b ₁			
2	3	4	5
○	□	△	◇

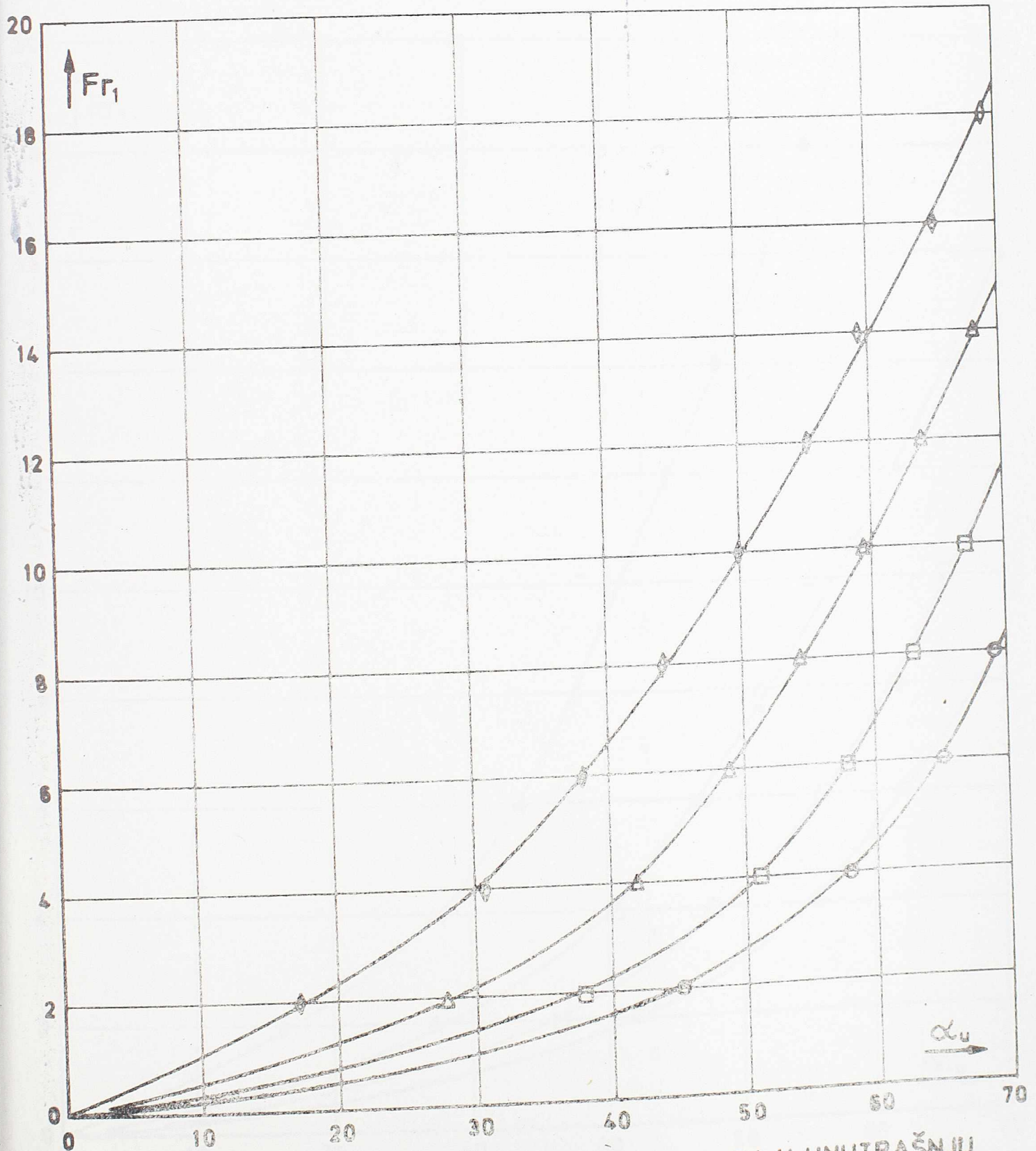
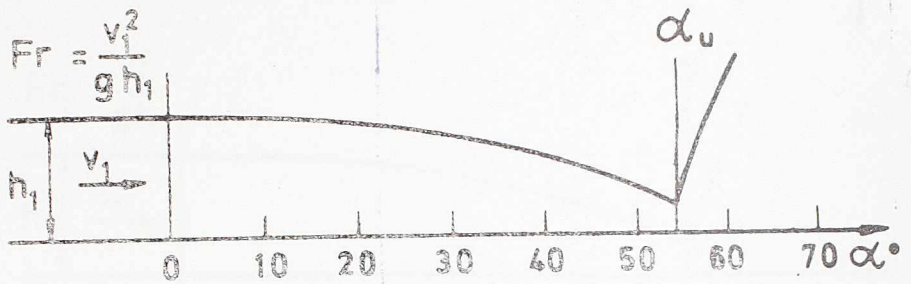


Slika 17. MESTO UDARA POZITIVNOG TALASA U UNUTRAŠNJU (KONVEKSNU) STRANU KRIVINE

$$\frac{b_1}{h_1} = 5$$

R/b ₁			
2	3	4	5
○	□	△	◇

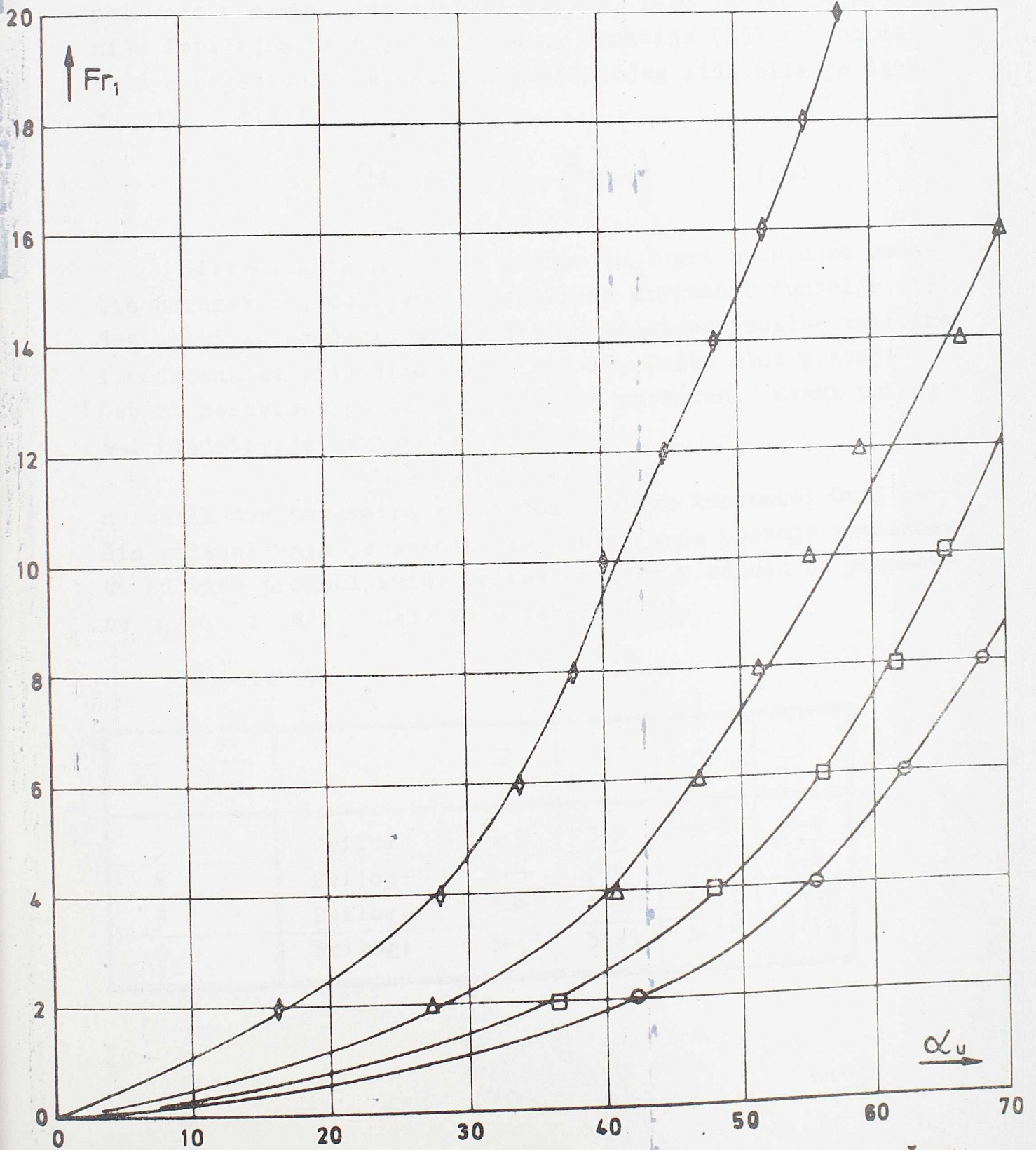
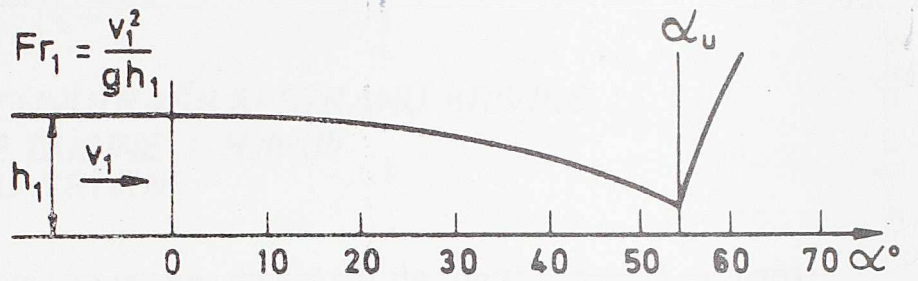
$$Fr = \frac{v_1^2}{gh_1}$$



• Slika 18. MESTO UDARA POZITIVNOG TALASA U UNUTRAŠNJU KONVEKSNU STRANU KRIVINE

$$\frac{b_1}{h_1} = 6$$

R/b ₁			
2	3	4	5
○	□	△	◇



Slika 19. MESTO UDARA POZITIVNOG TALASA U UNUTRAŠNJU (KONVEKSNU) STRANU KRIVINE

3.3. DUBINA UZ UNUTRAŠNJU STRANU KRIVINE. MINIMALNE DUBINE I NJIHOV POLOŽAJ U KRIVINI.

Negativni talas koji se formira na unutrašnjoj strani krivine usled konveksnog skretanja toka meren je samo dubinom vode u njemu, jer njegova širina, kako je već rečeno, nije izražajna pa nije ni merena. Funkcija (15) za dubinu vode u negativnom talasu duž unutrašnjeg zida bila je data ranije, i glasi

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha \right) \quad (15)$$

Sistematskim merenjem dubine (h_u) pri promenama ostalih parametara, dobijena je grafička zavisnost funkcije (15). Svi opiti su sređeni, prebačeni na bezdimenzionalne veličine i nacrtani na priložima 3-1. do 3-16. Pošto ovde postoje četiri nezavisna parametra, a jedan zavistan, svaki prilog 3-i predstavlja zavisnost

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} (Fr_1, \alpha)$$

a ostala dva parametra su na tom prilogu konstante. Ovaj način prikazivanja je pogodan za slučaj kada postoje zavisnosti od više promenljivih. Prikaz priloga u odnosu na parametre b_1/h_1 i R/b_1 daje se u tabeli (10).

Tabela 10.

$\frac{b_1}{h_1} \backslash \frac{R}{b_1}$	2	3	4	5
3	Prilog: 3-1	3-2	3-3	3-4
4	Prilog: 3-5	3-6	3-7	3-8
5	Prilog: 3-9	3-10	3-11	3-12
6	Prilog: 3-13	3-14	3-15	3-16

Razmatranjem ovih priloga dolazi se do sledećih zaključaka:

Parametar h_u/h_1 , dubina vode u negativnom talasu, u odnosu na ostale parametre ima sledeće promene:

- Parametar h_u/h_1 sa porastom ugla (α) postepeno opada, pa za određeni ugao (α) naglo raste da bi opet opadao. Ovaj porast se dešava na mestu gde se pozitivni talas proširi do unutrašnjeg zida krivine;

- Parametar h_u/h_1 sa porastom Frudovog broja opada, pa čak dobija i nultu vrednost, koja će biti zasebno ispitivana;

- Parametar h_u/h_1 sa porastom odnosa R/b_1 raste što se može tumačiti time da odnos R/b_1 ustvari predstavlja zakrivljenost zidova kanala koju vodeni tok treba da prati, pa ukoliko je taj broj veći, zakrivljenost je manja, pa je i razlog za pojavu negativnog talasa manja. Ukoliko bi se išlo u krajnost, pri težnji $R/b_1 \rightarrow \infty$, onda $h_u/h_1 \rightarrow 1$, što znači da nema zakrivljenosti, pa nema ni negativnog talasa;

- Što se tiče uticaja parametra b_1/h_1 , ne može se sa sigurnošću reći kako se ponaša negativni talas, pa ovde neće ni biti govora o njegovom uticaju. Naravno, ovde se misli samo na ispitivani domen parametra b_1/h_1 .

Osim ovih načelnih objašnjenja ponašanja negativnog talasa, obrađuju se zasebno sledeće pojave koje karakterišu negativni talas:

Minimalna vrednost ($h_{u \min}$) negativnog talasa koja se javlja pri kretanju toka kroz kružnu krivinu. Ova vrednost ne zavisi od parametra (α), već samo od ostale tri parametra:

$$\frac{h_{u \min}}{h_1} = f \left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1} \right)$$

Iz priloga (3-1. do 3-16) izvađene su ove vrednosti i sredene u tabeli (11), iz koje se može zaključiti da parametar b_1/h_1 ne utiče na ovu vrednost odnosa minimalne dubine (h_u) prema neporemećenoj dubini (h_1) u ispitivanom opsegu odnosa b_1/h_1 , pa se u tabeli odmah daju i srednje vrednosti, tako da prethodna funkcija ustvari može da se napiše na sledeći način:

$$\frac{h_{u \min}}{h_1} = f\left(Fr_1, \frac{R}{b_1}\right) \quad (23)$$

Grafički prikaz ove funkcije dat je na slici (20). Dobijeni grafici su logični, pošto su za oštriju krivinu $R/b_1 = 2$, vrednosti najmanje i kada bi moglo da se pusti da $R/b_1 \rightarrow 1$, što znači da nema unutrašnjeg zida, ovaj grafik bi se poklopio sa ordinatom, a sa porastom $R/b_1 \rightarrow \infty$, grafik bi prešao u pravu koja je paralelna sa apscisom sa vrednošću $\frac{h_{u \min}}{h_1} \rightarrow 1$.

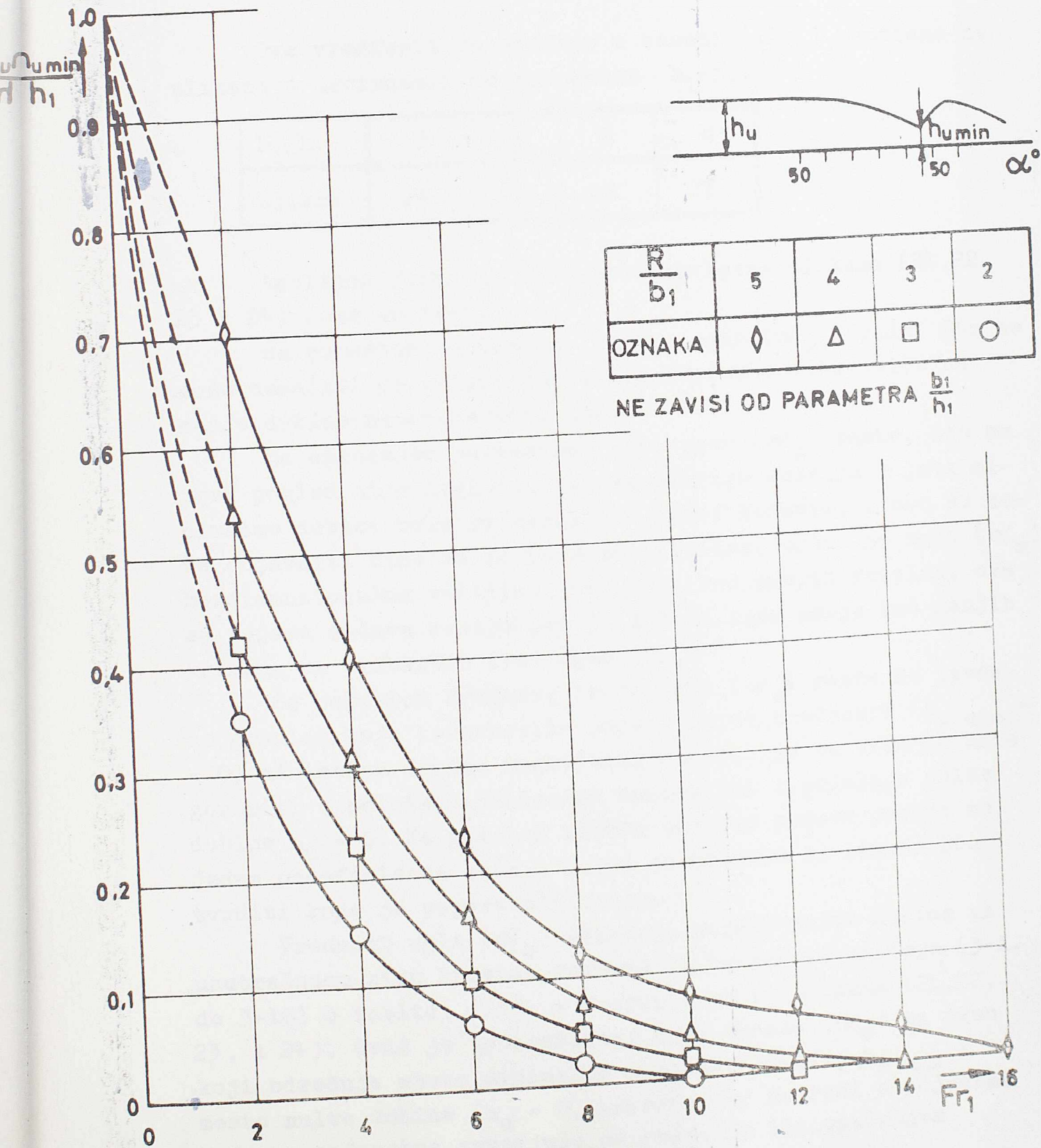
Minimalne vrednosti negativnog talasa

$$\frac{h_{u \min}}{h_1} = f\left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1}\right)$$

Tabela 11.

$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1	2	4	6	8	10	12	14	16
2	3		0,35	0,14	0,06	0,02	0,00			
	4		0,36	0,16	0,05	0,02	0,00			
	5		0,34	0,15	0,06	0,02	0,00			
	6		0,36	0,16	0,07	0,02	0,00			
	S.V.		0,35	0,15	0,06	0,02	0,00			
3	3		0,43	0,24	0,10	0,05	0,02	0,00		
	4		0,41	0,23	0,09	0,05	0,02	0,00		
	5		0,42	0,24	0,09	0,05	0,02	0,00		
	6		0,41	0,23	0,10	0,05	0,02	0,00		
	S.V.		0,42	0,23	0,10	0,05	0,02	0,00		
4	3		0,56	0,31	0,16	0,06	0,04	0,01	0,00	
	4		0,55	0,30	0,17	0,07	0,04	0,01	0,00	
	5		0,53	0,30	0,16	0,07	0,04	0,01	0,00	
	6		0,50	0,31	0,16	0,08	0,04	0,01	0,00	
	S.V.		0,54	0,31	0,16	0,07	0,04	0,01	0,00	
5	3		0,70	0,40	0,22	0,11	0,08	0,06	0,04	0,00
	4		0,70	0,40	0,23	0,13	0,07	0,05	0,04	0,00
	5		0,68	0,43	0,23	0,11	0,07	0,05	0,04	0,00
	6		-	0,41	0,24	0,15	0,10	0,07	0,04	0,00
	S.V.		0,70	0,40	0,23	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00

MINIMALNE VREDNOSTI NEGATIVNOG TALASA NA KONVEKSNOJ STRANI KRIVINE



Slika 20.

Položaj minimalne vrednosti u negativnom talasu je analiziran i obrađen na sledeći način:

Iz priloga 3-1. do 3-16. izvađeni su uglovi (α_m) kao mesta minimalnih vrednosti (h_u), u zavisnosti od ostalih parametara. To se može napisati u obliku:

$$\alpha_m = \alpha_m \left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1} \right) \quad (24)$$

Ove vrednosti su sređene u tabeli (12) i nacrtane na slikama u zavisnosti od parametra b_1/h_1 .

b_1/h_1	3	4	5	6
Slika:	24	25	26	27

Analizom funkcije (24) predstavljene slikama (21, 22, 23 i 24) može se reći:

Sa porastom parametra b_1/h_1 ugao (α_m) opada, što se može tumačiti da zakrivljenje zida krivine više utiče na manje dubine neporemećenog toka.

Sa opadanjem parametra R/b_1 ugao (α_m) raste, što na prvi pogled nije logično, jer za oštriju krivinu pojava minimalne dubine bila bi kasnije u toku. Međutim, i ovo se može objasniti time da je to samo prividno, pošto je ugao (α_m) bezdimenzionalna veličina; ustvari, kod manjih krivina, ova se pojava dešava ranije jer je dužina luka manja kod manjih krivina za približno isti ugao (α_m).

Sa porastom Frudovog broja ugao (α_m) raste do izvesne granice koja karakteriše pojavu nulte vrednosti ($h_u \min = 0$) minimalne dubine negativnog talasa, pa se više ne može govoriti o položaju minimalne dubine već o položaju nulte dubine $h_u = 0$. Na granici između ove dve pojave javlja se jedna nedefinisana zona u kojoj se ne može sa sigurnošću tvrditi koja je pojava u pitanju.

Vrednost ugla (α_m) položaja pojave nulte dubine na unutrašnjem zidu krivine sređene su na osnovu priloga (3-1. do 3-16) u tablici (13), a nacrtane su na slikama (21, 22, 23. i 24). Ovde je upotrebljena ista oznaka (α_m) za ugao koji određuje mesto minimalne vrednosti dubine $h_u \min$ i mesto nulte dubine $h_u = 0$, namerno jer se radi o pojavama koje se međusobno zamenjuju sa porastom ili opadanjem Frudovog broja.

Položaj minimalne vrednosti negativnog
talasa $h_u \min$

$$\alpha_m = \alpha_m \left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1} \right)$$

Tabela 12.

$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1							
2	3		52	63	69	73			
	4		49	61	68	71			
	5		45	58	65	69			
	6		42	56	62	68			
3	3		44	58	66	70	73		
	4		40	55	63	68	70		
	5		38	51	58	63	67		
	6		37	48	56	61	65		
4	3		30	49	59	66	69	72	
	4		29	46	55	61	66	69	
	5		28	42	49	54	59	64	
	6		27	41	47	51	55	59	
5	3		19	39	48	56	63	67	70
	4		18	33	42	50	57	62	66
	5		17	31	38	44	50	55	59
	6		16	28	34	38	42	45	48

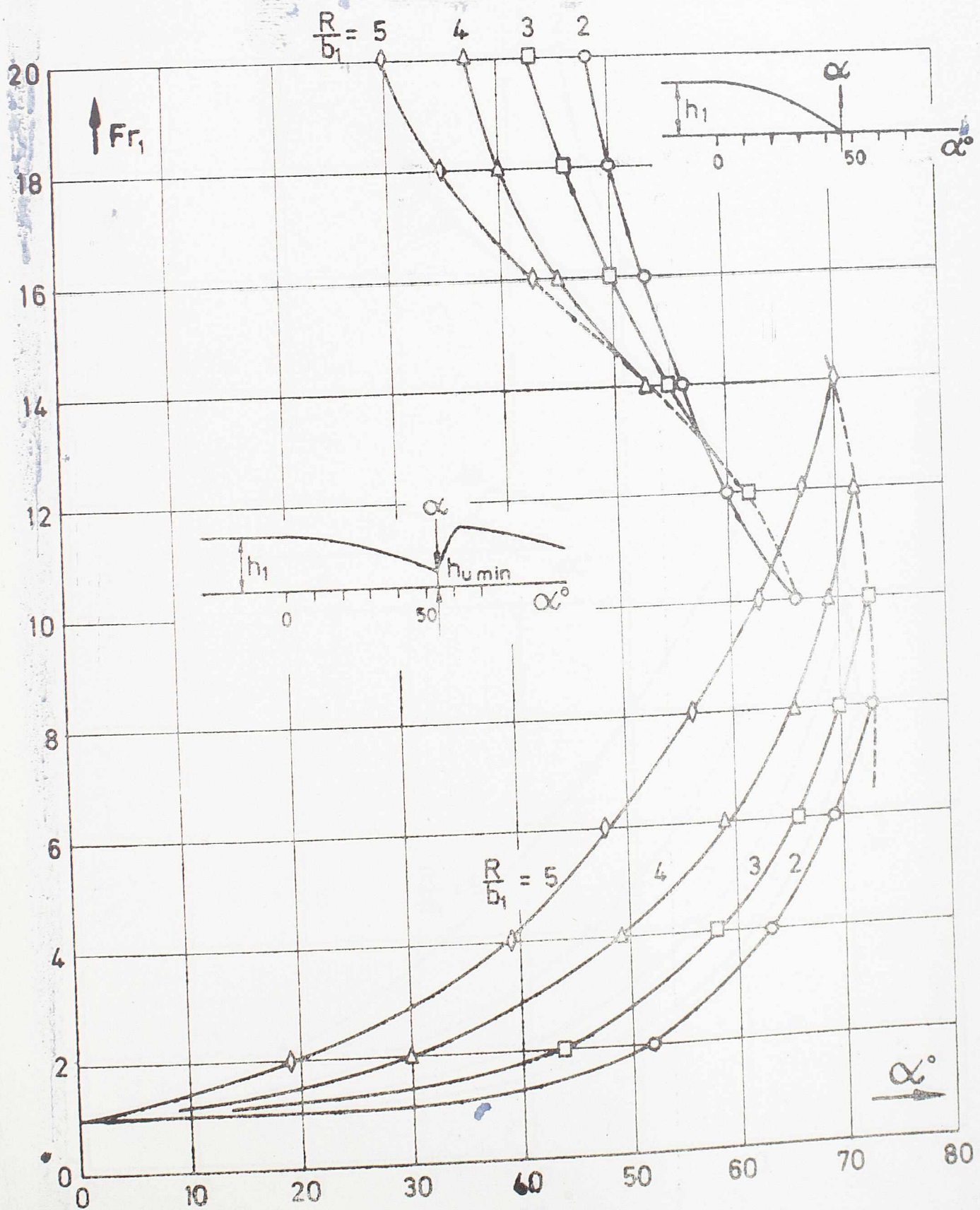
Položaj pojave nulte dubine $h_u = 0$
po unutrašnjoj (konveksnoj) strani krivine

$$\alpha_m = \alpha_m \left(Fr_1, \frac{R}{b_1}, \frac{b_1}{h_1} \right)$$

Tabela 13.

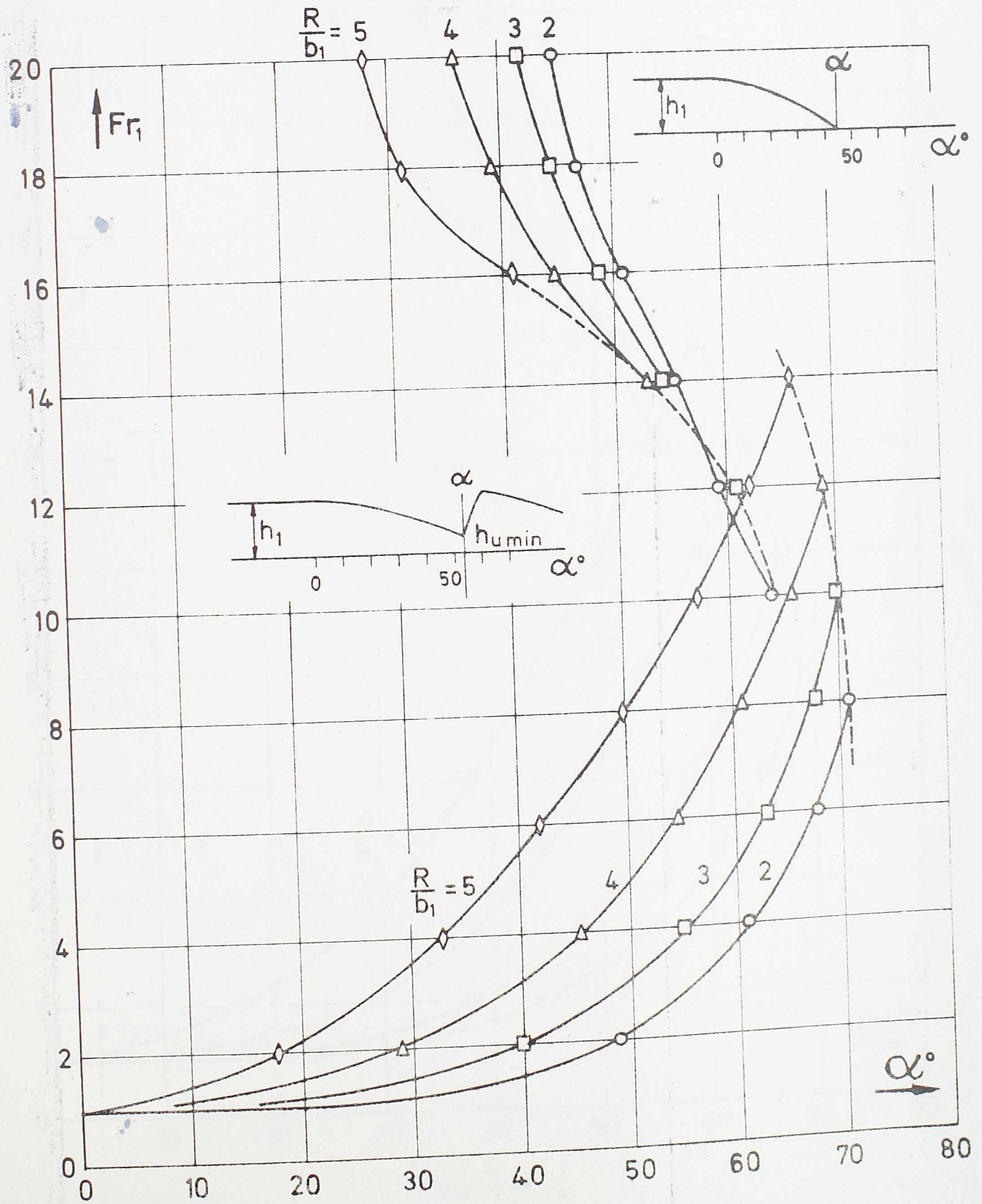
$\frac{R}{b_1}$	$\frac{b_1}{h_1}$	Fr_1						
2	3		66	60	56	53	50	48
	4		64	59	55	51	47	45
	5		62	56	51	47	44	43
	6		67	62	57	53	50	48
3	3			62	55	50	46	43
	4			61	54	49	44	42
	5			60	52	46	42	41
	6			61	54	48	44	41
4	3				53	45	40	37
	4				53	45	39	36
	5				53	43	38	35
	6				50	42	36	34
	3					43	35	30
	4					41	31	28
	5					39	31	27
	6					35	28	25

$b_1/h_1 = 3$



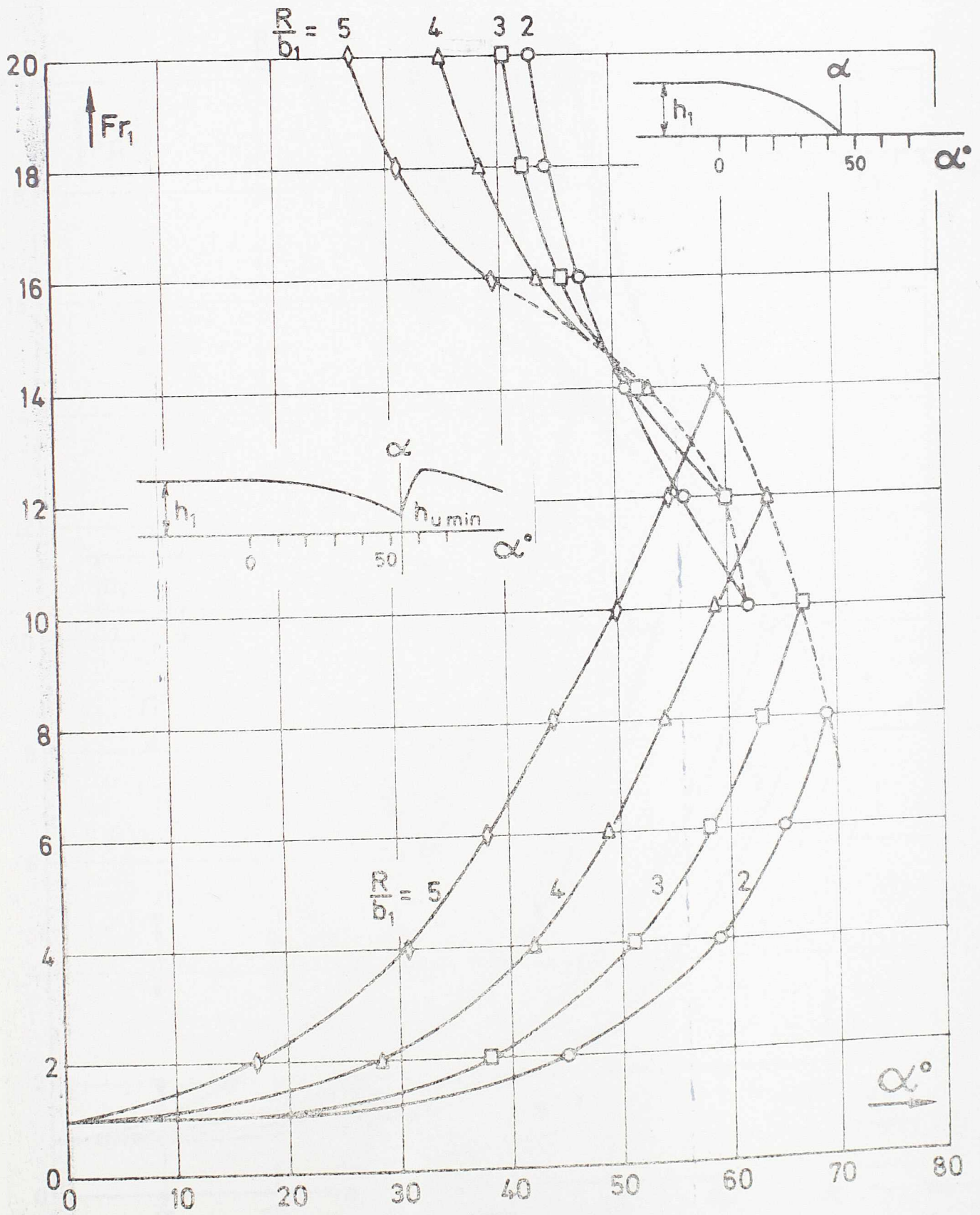
Slika 21.

$$b_1/h_1 = 4$$



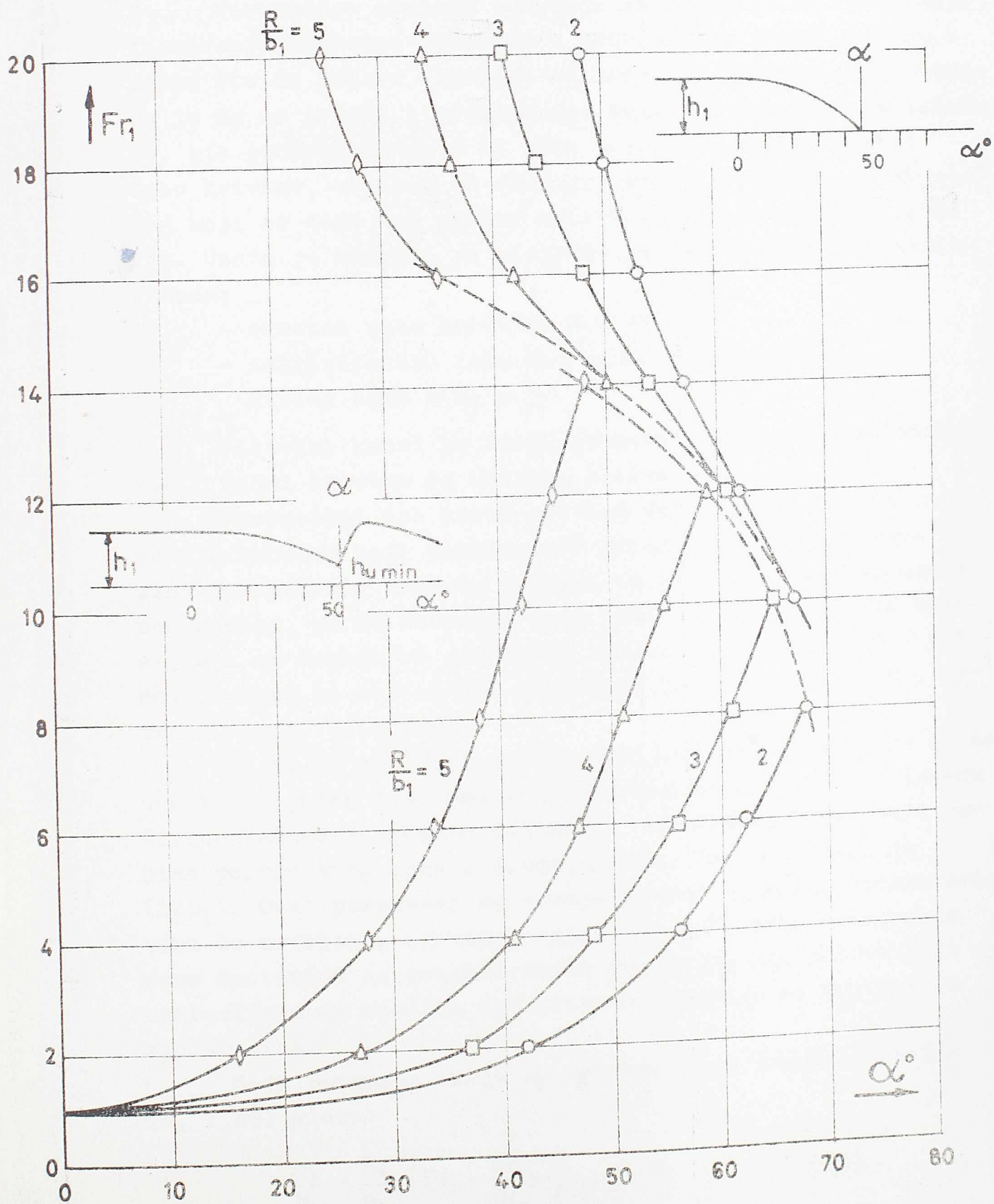
Slika 22.

$$b/h_1 = 5$$



Slika 23.

$b/h_1 = 6$



Slika 24.

3.4. DUBINE U PRODUŽETKU KANALA NIZVODNO OD KRIVINE

Dosadašnja analiza uglavnom se odnosila na izučavanje formiranja slobodne površine u krivini, ne vodeći računa o onome što se dešava nizvodno od krivine. Međutim, od interesa je da se prouči i propagacija talasa i nizvodno od krivine, gde geometrija može da bude različita kao i skretni ugao krivine, zavisno od slučaja. Ovde je izabran jedan slučaj koji se daje kao primer načina obrade i toka ispitivanja. Uzeta je krivina sa sledećim geometrijskim karakteristikama:

- skretni ugao krivine: $\alpha = 50^\circ$;
- zakrivljenost toka kao odnos poluprečnika i širine toka $R/b_1 = 5$.

Nizvodni kanal je istih geometrijskih karakteristika kao i kanal uzvodno od krivine (slika 8).

Poremećeni tok usled krivine dobija novi pravac nizvodnim kanalom koji nameće nove granične uslove. Pravac brzine poremećenog toka ne poklapa se sa novim pravcem uzvodnog kanala, pa se stvaraju novi pozitivni i negativni talasi koji se šetaju od jednog do drugog zida (slika 25). Ovi novi talasi su mereni duž nizvodnog kanala; menjan je parametar b_1/h_1 (3,4,5,6).

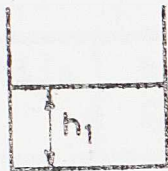
Da bi se obradili podaci dobijeni merenjima mora da se uvede još jedan bezdimenzionalni član koji daje vezu između širine kanala i njegove dužine (L) do mesta gde se meri dubina poremećenog toka u novom pravcu. Taj novi član je (L/b_1). Ovaj poremećaj se vezuje za već ispitanu kružnu krivinu do usvojenog skretnog ugla $\alpha = 50^\circ$, tako da se sada samo nastavlja sa prikazivanjem rezultata duž zidova koji se nastavljaju na spoljni zid krivine, odnosno na unutrašnji zid krivine.

Novе funkcije (koje su ustvari samo dopuna funkcija 14. i 16) glase:

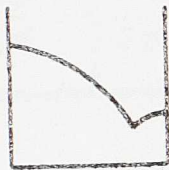
$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha, \frac{L}{b_1} \right) \quad (25)$$

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha, \frac{L}{b_1} \right) \quad (26)$$

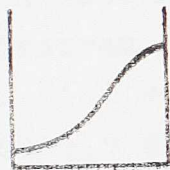
poprečni presecci



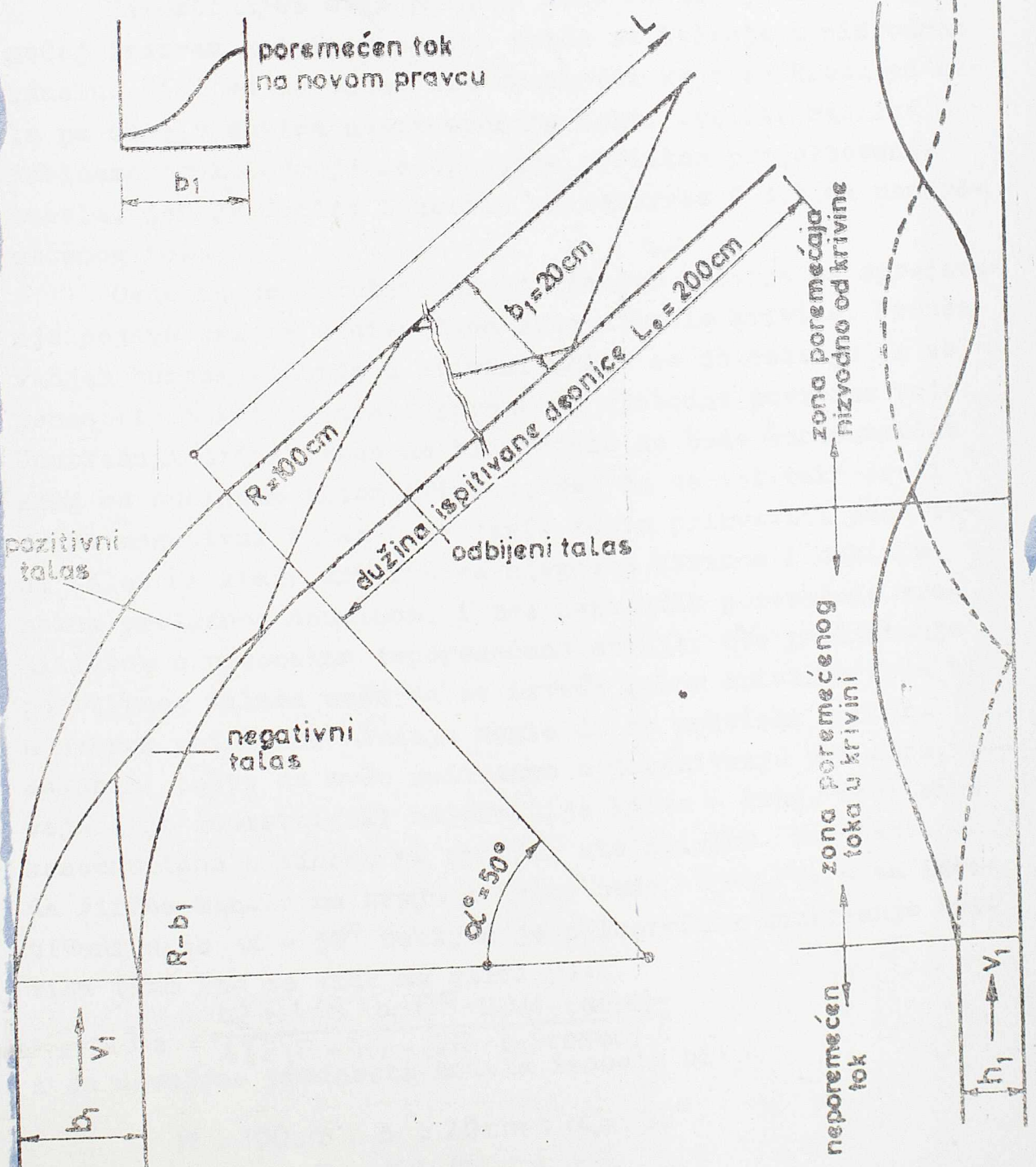
neporemećen tok



poromećen tok u krivini



poromećen tok na novom pravcu



slika 25.

Funkcije (25) i (26) prikazane su na priložima čiji brojevi zavise od parametra (b_1/h_1):

Funkcija	$\frac{b_1}{h_1}$	3	4	5	6
25	Prilog:	4-1	4-2	4-3	4-4
26	Prilog:	5-1	5-2	5-3	5-4

Razmatranjem ovih priloga može se zaključiti da poremećaj izazvan krivinom znatno utiče na tečenje u nizvodnom kanalu. Vidi se da talas ima vrednosti koje se kreću od nule pa do 5,5 dubina neporemećenog toka. Ovolika razlika u dubinama praktično je nedopustiva prilikom projektovanja kanala, jer je dubina inascula sa rezervom 6 dubina neporemećenog toka.

Ovde će se pokušati sa nalaženjem rešenja za sprečavanje pojave talasa u nizvodnom kanalu posle krivine. Proučavanjem burnog tečenja u krivini došlo se do rešenja da se geometrijom kanala prati poremećaj slobodne površine vode. Unutrašnji zid krivine ne bi trebalo da bude koncentričan krug sa spoljnim zidom krivine, već da se tok tako prati da se negativni talas i ne javi; zatim prihvatiti pozitivni talas na kraju krivine sa njegovom širinom i dubinom, nekom prelaznom deonicom, i bez naknadnih poremećaja vratiti tok u prvobitno neporemećeno stanje. Ovo prihvatanje pozitivnog talasa može da se izvede nekom krivinom koja bi u svakom pojedinom slučaju mogla da se modelski dobije. Međutim, pošto se ovde radi samo o dokazivanju principa, usvojena je geometrijski najprostija kriva - krug, koji nije koncentričan u odnosu na spoljni zid krivine. Usvojeno je da širina kanala na kraju krivine bude $b_s = b_1/2$, a za ispitivani ugao $\alpha = 50^\circ$ dobijen je poluprečnik unutrašnje krivine (kao što se vidi na slici 9).

$$R_u = \frac{b_1^2 + 4(R - b_1)(2R - b_1)(1 - \cos\alpha)}{4[2(R - b_1) - (2R - b_1)\cos\alpha]}$$

i za usvojene vrednosti modela iznosio bi:

$$R = 100\text{cm}; b_1 = 20\text{cm}; \alpha = 50^\circ$$

$$R_u = 118\text{cm}$$

Analiza ovog pokušaja daje se u poglavlju 4.

4.

KRIVINA SA SUŽENJEM
KAO REŠENJE
KOJIM SE UBLAŽAVAJU
NEPOŽELJNI UTICAJI
KRIVINE
NA NIZVODNO
TEČENJE

Pojave u krivini u burnom tečenju, upravo nadvišenje nivoa na spoljnoj i snižavanje nivoa na unutrašnjoj strani treba shvatiti kao početak jednog dalekosežnog prostiranja tih nadvišenja i snižavanja na nizvodni nastavak kanala, što je i prikazano u poglavlju 3.4. (slika 28). Treba istaći činjenicu da i za krivine gde je središnji ugao suviše mali da bi u krivini došlo do maksimalnog izdizanja, do nje- ga ipak dolazi iza krivine (i to skoro do istog do kakvog bi došlo u krivini da je središnji ugao veći), pa se dalje javljaju smenjivanja znatnih izdizanja i spuštanja. Iz toga proizilazi praktičan zaključak da na pojave u krivini treba uticati ne zbog njih samih, nego zbog toga što su one uzrok nepoželjnim pojavama u celom nizvodnom toku.

Već je navedeno, pod 1.5, da se prema dosadašnjim istraživanjima preporučljivo da se dno u spoljašnjoj strani krivine spusti tako da se tu dobije veća dubina, a bez oset- nijeg izdignuća. Ustvari, veća dubina se postiže spuštanjem dna umesto nadvišenja nivoa, pa ne dolazi do prvog talasa, a onda neće biti ni ostalih. Drugi način je da se usmeriva- čima u dnu spreči nadiranje vode ka spoljnoj strani krivine. Te mere i daju izvesne rezultate. Pošto određeno rešenje odgovara određenom proticaju, svaki slučaj zahteva da se pro- nađe najpovoljnije rešenje. Kod rešenja sa spuštanjem dna nepovoljne su okolnosti što se u udubljenju zadržava voda i kada ne teče; tu se deponuje i nanos.

U okviru rada na ovoj disertaciji učinjen je, na kra- ju, i jedan drugačiji pokušaj da se nepovoljni uticaj kri- vine na nizvodno tečenje ublaži. Pokušaj je učinjen ugrađi- vanjem suženja u krivinu (slika 26), upravo zamenom obične krivine (sa konstantnom širinom dna kakvu ima kanal iza i ispred nje) sa krivinom u kojoj se obrazuje suženje (u kri- vini se obavlja i sužavanje dna). Obrazloženje za ovakvo rešenje je sledeće:

Sužavanjem kanala u krivini oduzima se onaj deo kana- la gde voda skoro ne bi ni tekla, a koji bi poslužio samo za stvaranje izrazitog poprečnog nagiba nivoa. U suženom

poprečnom preseku nivo će biti znatno ujednačeniji, a onda kada je prvo nadvišenje slabije izraženo, biće i prvo suženje manje izraženo, a potom i sva ostala nadvišenja i snižavanja u nizvodnom kanalu.

Na slici 26. se vidi da je kanal sa suženjem u krivini priključen na isto mesto gde su se priključivali i svi modeli krivina. Na taj način će se uporediti sa odgovarajućim rešenjem sa običnom krivinom. Iz slike se vidi da se radi o krivini sa elementima: $R/b_1 = 5$; $\alpha = 50^\circ$. Potrebno je naglasiti da će naredna izlaganja o rezultatima opita važiti za takvu krivinu i za nametnute ulazne granične uslove. Ispred krivine na dužini $\lambda = 1,5 b_1$ nalazi se mlaznik iz koga ističe mlaz određene dubine h_1 i brzine v_1 (tako je rađeno tokom celog rada). Praktično uzevši to može da znači isticanje ispod zatvarača, ili ispod ustave, u kanal koji otpočinje krivinom. Dno kanala je horizontalno. Za dva obavljena opita dubina je bila ista $h_1 = 1/5 b_1$, tj. $h_1 = 4$ cm (vidi slike 27. i 28.), sa brzinama v_1 koje odgovaraju Frudovim brojevima $Fr_1 = v_1^2/gh_1 = 20$ i 14 (tj. sa brzinama na modelu $v_1 = 3,05$, odnosno 2,34 m/s).

Za opit sa slike 27. ($Fr_1 = 20$) dolazni uslovi nisu bili promenjeni sužavanjem, ali su nadvišenja i snižavanja u sužavanoj krivini, a pogotovo iza nje, bila znatno ublažena u odnosu na krivinu bez sužavanja za iste uslove.

Za opit sa slike 28. ($Fr_1 = 14$) sužavanje u krivini potapalo je ulaznu dubinu (na početku krivine bila je 3,2 puta veća od neporemećene), maksimalno izdizanje nivoa kod suženja bilo je čak neznatno veće nego kod obične krivine bez suženja, ali poprečnog nagiba nije bilo. Stoga iza krivine nije bilo nikakvih talasa.

Ova dva opita ukazuju da se sužavanjem krivine može postići željeno, tj. tečenje nizvodno od krivine bez uticaja krivine, odnosno sa ublaženim uticajem.

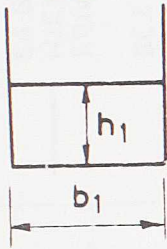
Treba uočiti da navedeno potapanje u drugom slučaju ($Fr_1 = 14$) dovodi do maksimalne dubine $h_{max} = 4,7 h_1$, koja je približna dubini koja hidrauličkim skokom potapa burno kretanje - ova druga ($Fr_1 = 14$) iznosi $4 h_1$. Ovo nameće sledeće rasuđivanje: Ako se smirivanje uticaja krivine obavlja

dubinom kojom se može ispred krivine burno kretanje preobratiti u mirno, onda to treba i omogućiti i onda će smireno tečenje proći kroz krivinu. Treba napomenuti da je to moguće u svim praktičnim slučajevima gde se ispred krivine kanal pruža na dovoljnoj dužini. Međutim, smisao predloženog rešenja nije u tome - njime se želi postići da se nepoželjni uticaji krivine spreče, ili ublaže, a da se ostane u burnom tečenju (kao kod prvog primera, $Fr_1 = 20$). Sprečavanje potapanja i prevelikog dizanja nivoa postići će se ako se krivina postavi u podužnom padu tako da suženi presek bude na koti (može i znatno nižoj) nižoj od ulaza. Uostalom u svakom pojedinačnom slučaju može se krivina sa suženjem i prelaz iza nje ponovo u kanal konstantne širine dna, visinski postavljati prema željama i zahtevima. Dalje, stepen sužavanja treba izabrati da daje najpovoljnije uticanje (u opitima, primera radi, uzeto je sužavanje na polovinu). Na taj način može se potpuno izbeći potapanje, može se delimično, odnosno u potpunosti, iskoristiti. Jasno je da rešenje mora da odgovara svim proticajima do maksimalnog očekivanog, pa će se tražiti najpogodnije za dati praktični zadatak.

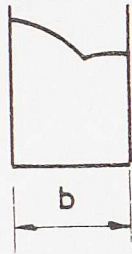
Ovde nije pokušano da se dâ opšte rešenje, jer je ono, kao što se iz izloženog vidi zavisno od niza okolnosti i može se tražiti za svaki pojedinačni zadatak. Treba naglasiti da se ukazalo na jedan od načina na koji se može pronaći rešenje za određeni zadatak, a to je sužavanje u krivini.

poprečni presecci

neporemećen tok



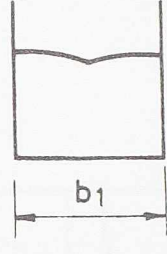
tok u krivini



tok u suženom preseku



tok u novom pravcu



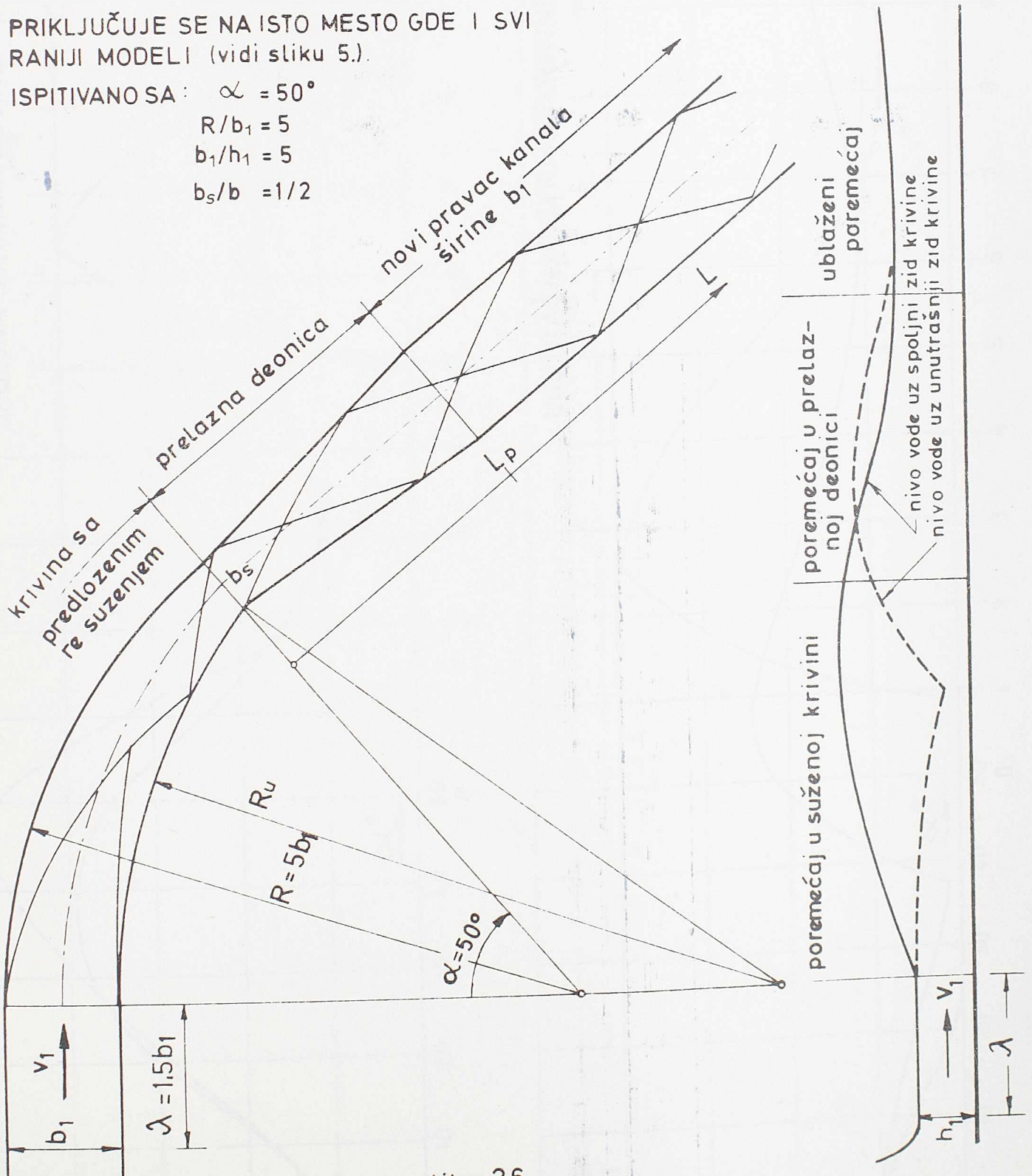
PRIKLJUČUJE SE NA ISTO MESTO GDE I SVI RANIJI MODELI (vidi sliku 5.).

ISPITIVANO SA: $\alpha = 50^\circ$

$$R/b_1 = 5$$

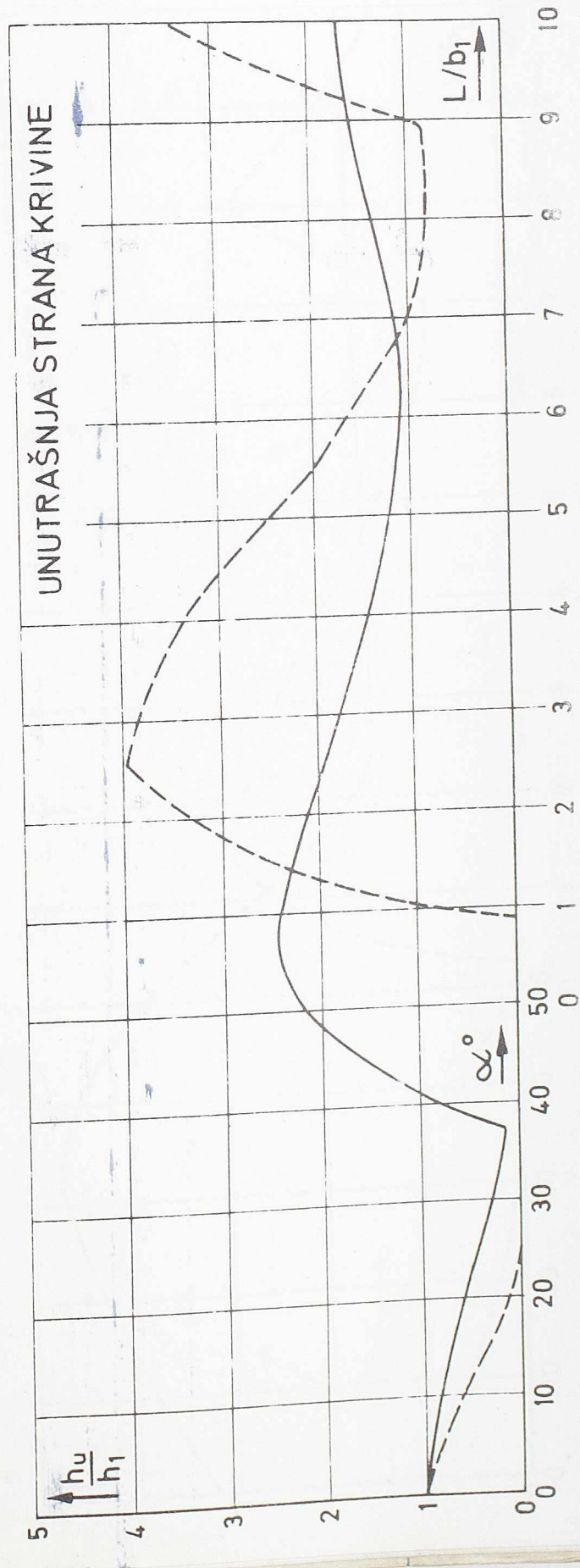
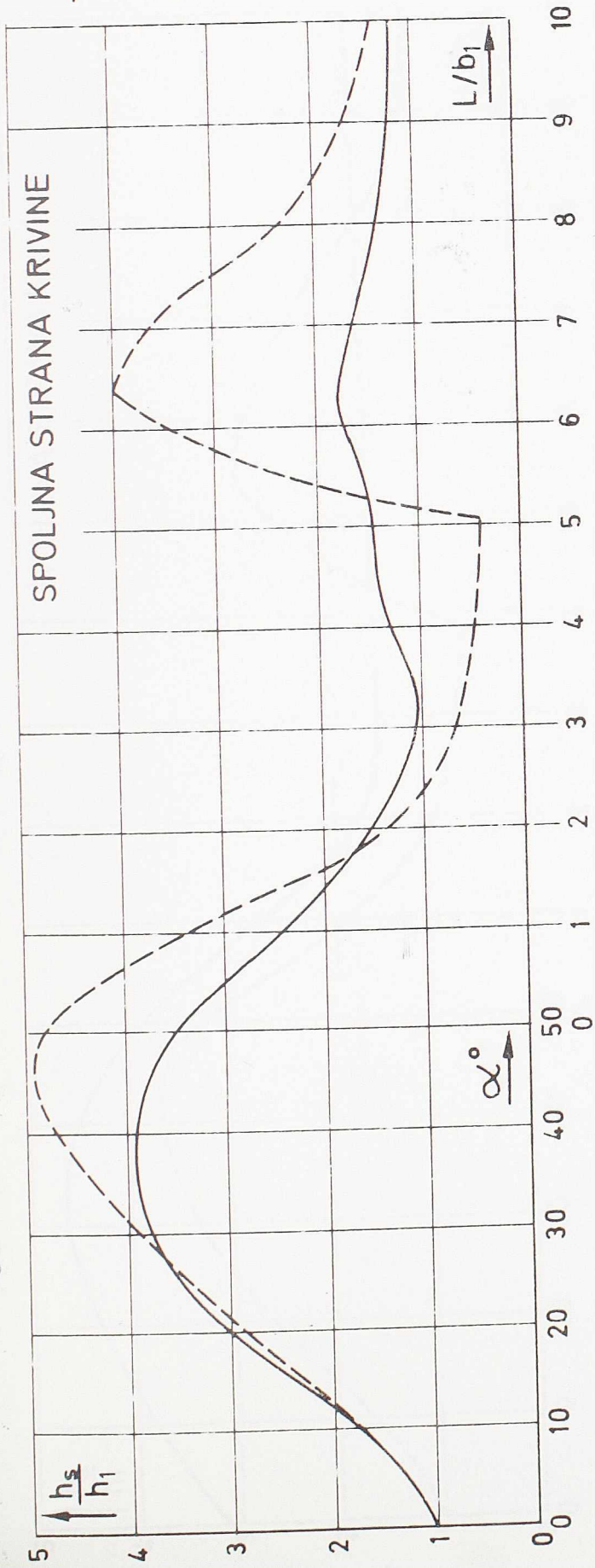
$$b_1/h_1 = 5$$

$$b_s/b = 1/2$$



slika 26.

PRIKAZ NIVOVA VODE U KRIVINI SA SUŽENJEM



— SA BOČNIM SUŽENJEM U KRUŽNOJ KRIVINI

- - - BEZ BOČNOG SUŽENJA U KRUŽNOJ KRIVINI

SL. 27. UTICAJ BOČNOG SUŽENJA U KRUŽNOJ KRIVINI SA NEPOTOPLJENIM TEČENJEM KROZ KRUŽNU KRIVINU

$$Fr_1 = 20$$

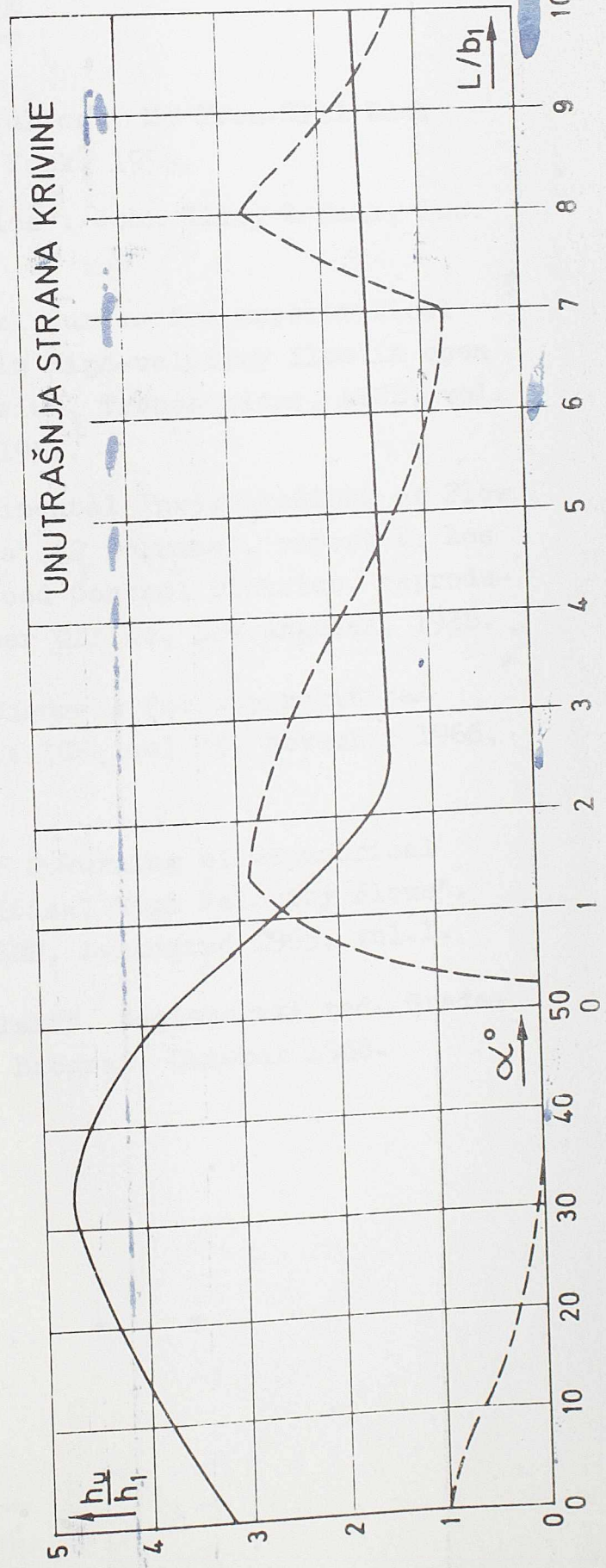
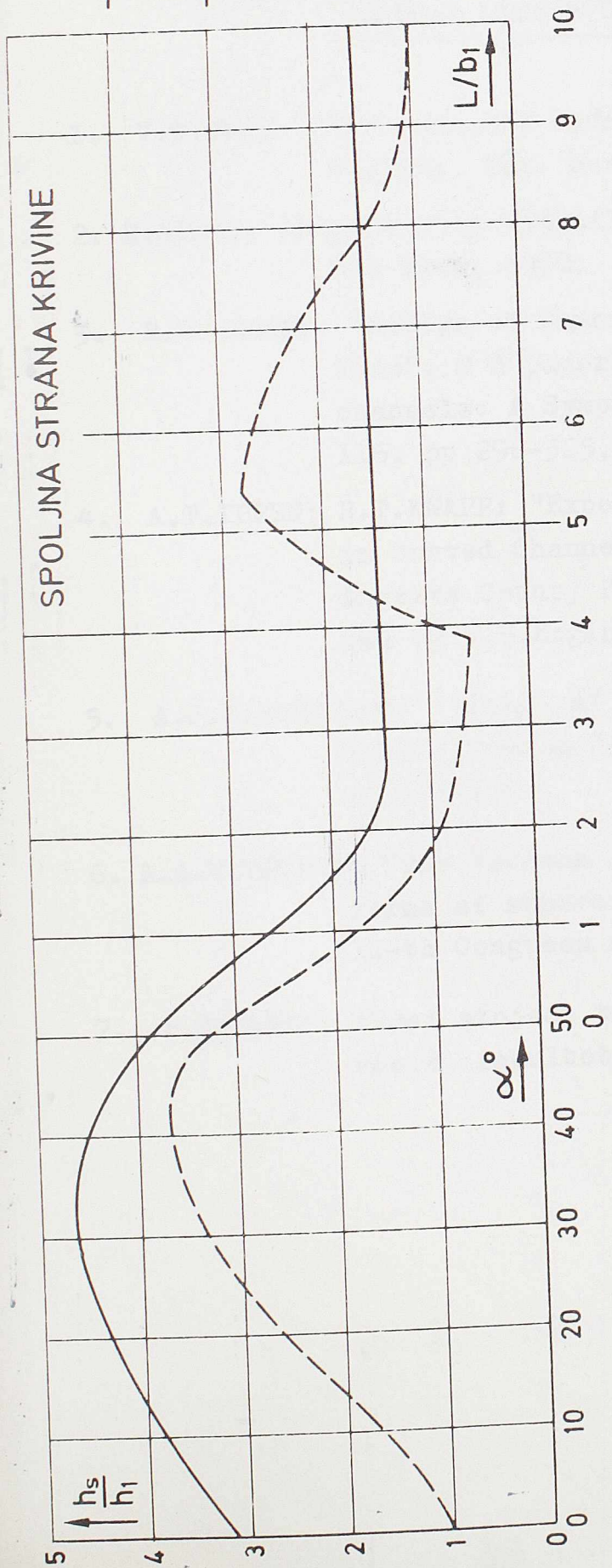
$$\frac{R}{b_1} = 5$$

$$\frac{b_1}{h_1} = 5$$

— SA BOČNIM SUŽE-
NJEM U KRUŽNOJ
KRIVINI
- - - BEZ BOČNOG SU-
ŽENJA U KRUŽNOJ
KRIVINI

SL.28. UTICAJ BOČNOG
SUŽENJA U
KRUŽNOJ KRI-
VINI SA POTOP-
LJENIM TEČE-
NJEM KROZ
KRUŽNU
KRIVINU

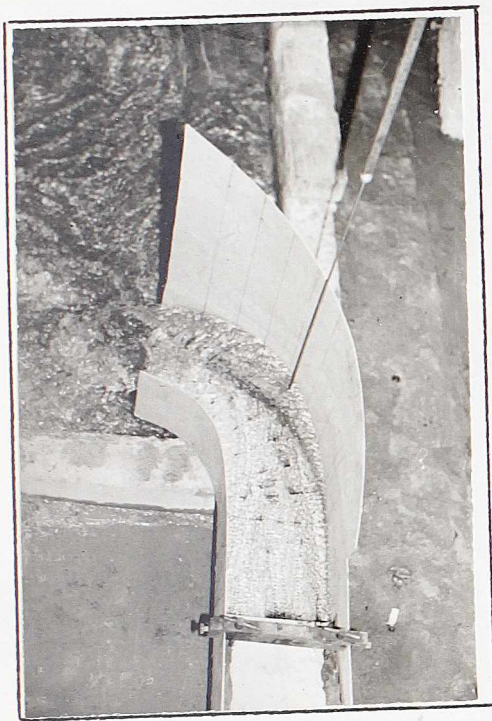
$Fr_1 = 14$
 $\frac{R}{b_1} = 5$
 $\frac{b_1}{h_1} = 5$



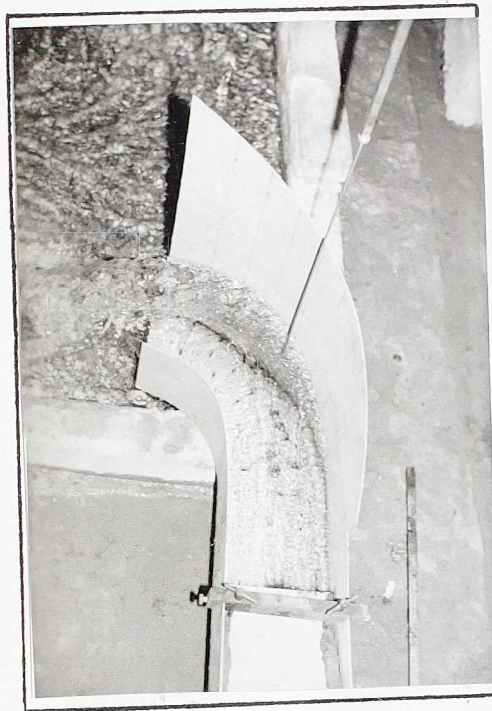
SPISAK LITERATURE

1. V.T.CHOW: "Open-channel Hydraulics". Mc Fraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1959.
2. H.ROUSE: "Engineering Hydraulics". John Wiley & Sons, Inc. New York, 1950.
3. R.T. KNAPP: "Design of Channel Curves for supercritical Flow". 2 d paper in High-velocity flow in open channels: A Symposium, Transactions, ASCE, vol. 116, pp 296-325, 1951.
4. A.T.IPPEN; R.T.KNAPP: "Experimental Investigations of Flow in Curved Channels" (2 volumes), report to Los Angeles County Flood Control District, reproduced by U.S.Engineer Office, Los Angeles, 1938.
5. A.J.M.HARRISON: "Design of Channels for supercritical Flow". Proceedings ICE, vol 35, November 1966, pp 475-490.
6. A.A.TURSUNOV: "The Methods of Governing of Geometrical Forms of supercritical High Velocity Flows". 11-th Congress AIRH, Leningrad 1965, vol.I.
7. B.BATINIĆ: "Kosi stojeći talasi". Magistarski rad. Građevinski fakultet, Beograd. Oktobar 1968.

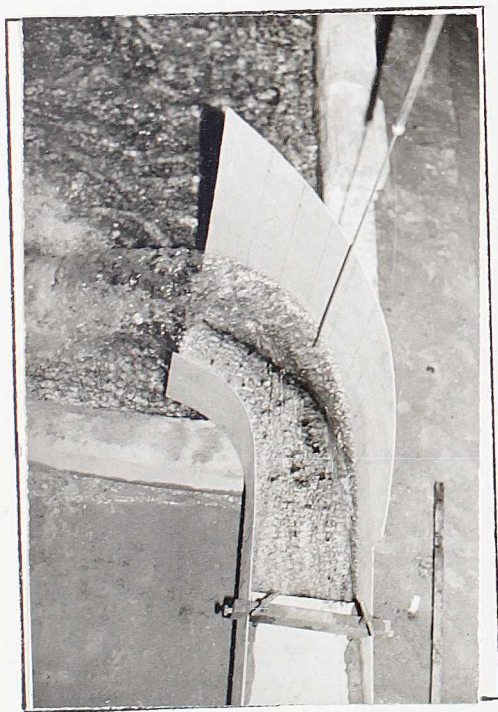
5.
FOTOGRAFIJE



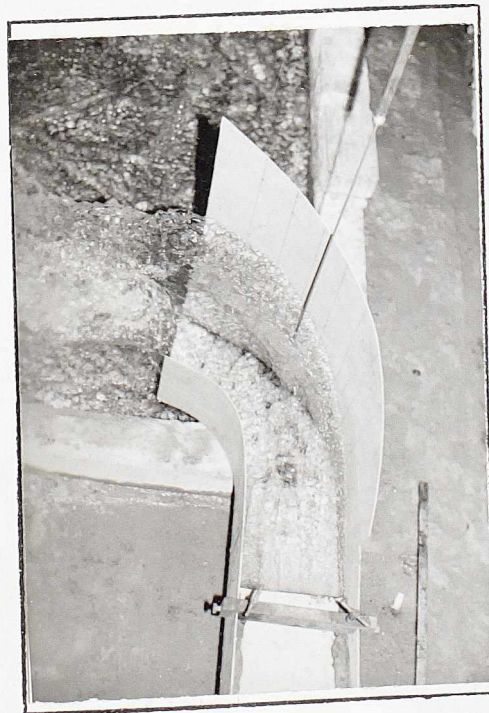
$$b_1/h_1 = 6$$



$$b_1/h_1 = 5$$

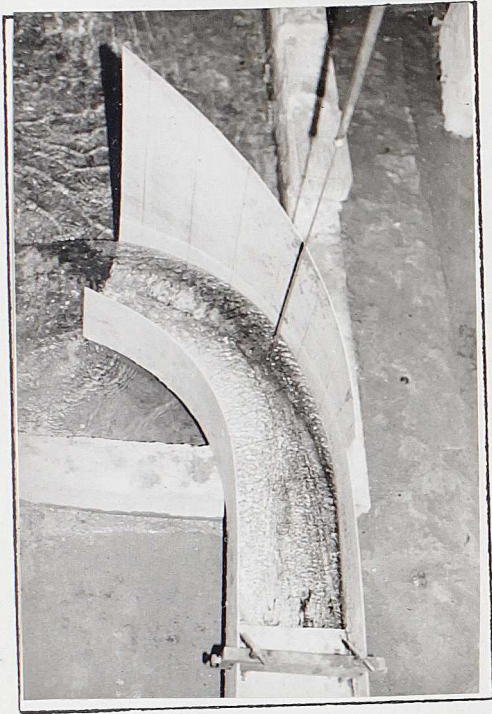


$$b_1/h_1 = 4$$

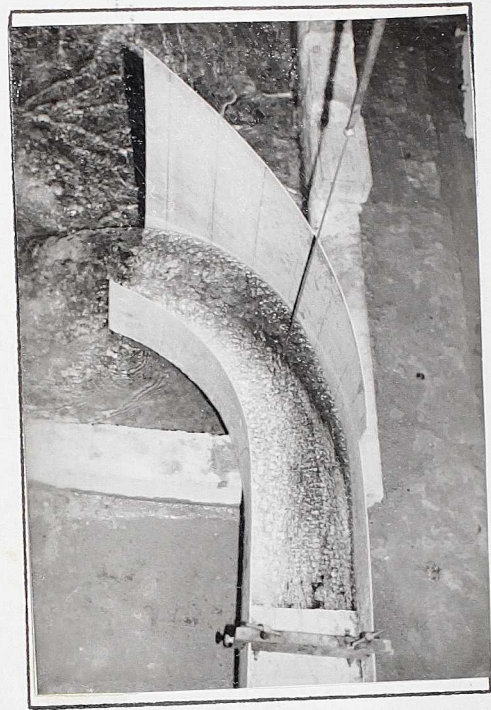


$$b_1/h_1 = 3$$

Foto. 1. Pozitivni talasi za: $Fr_1 = 10$; $R/b_1 = 2$



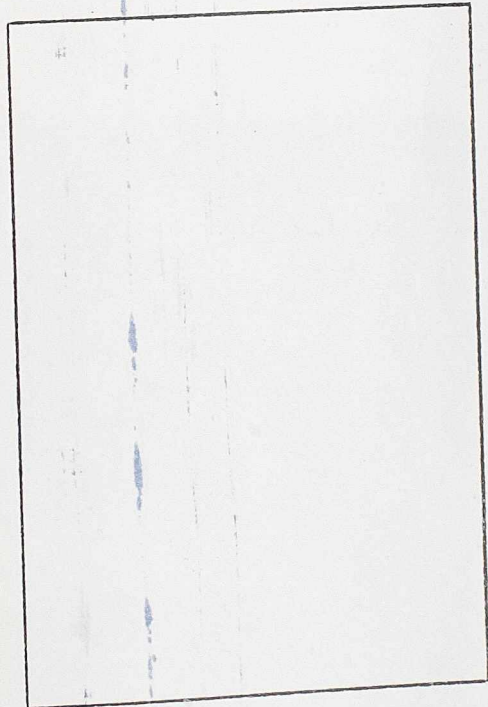
$$b_1/h_1 = 6$$



$$b_1/h_1 = 5$$

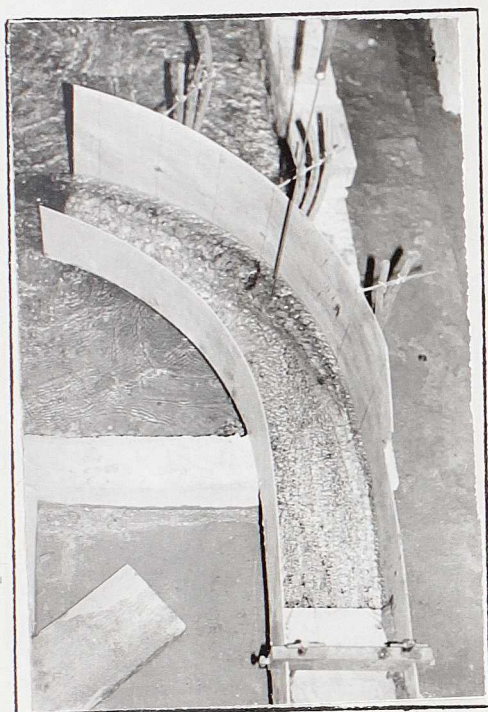


$$b_1/h_1 = 4$$

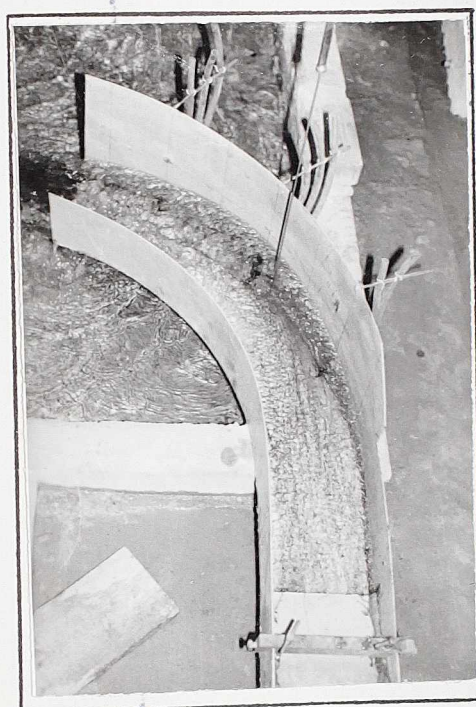


$$b_1/h_1 = 3$$

Foto. 2. Pozitivni talasi za: $Fr_1 = 10$: $R/b_1 = 3$



$$b_1/h_1 = 6$$



$$b_1/h_1 = 5$$



$$b_1/h_1 = 4$$

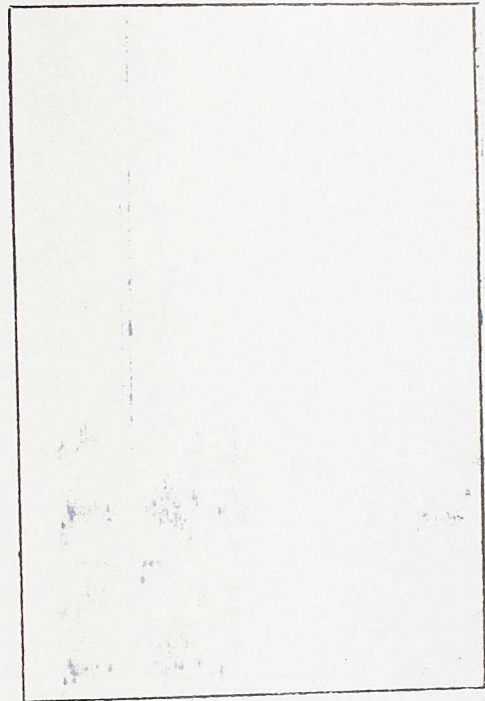


$$b_1/h_1 = 3$$

Foto. 3. Pozitivni talasi za: $Fr_1 = 10$; $R/b_1 = 4$



$$b_1/h_1 = 6$$



$$b_1/h_1 = 5$$



$$b_1/h_1 = 4$$



$$b_1/h_1 = 3$$

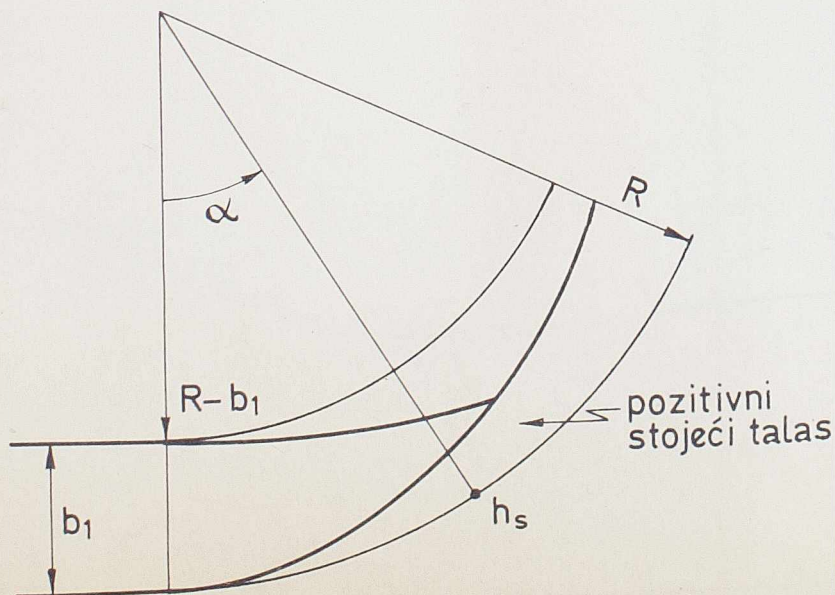
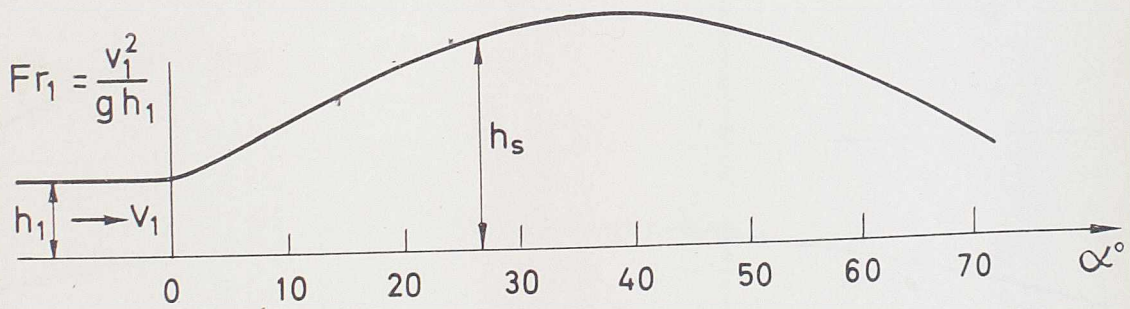
Foto. 4. Pozitivni talasi za: $Fr_1 = 10$; $R/b_1 = 5$

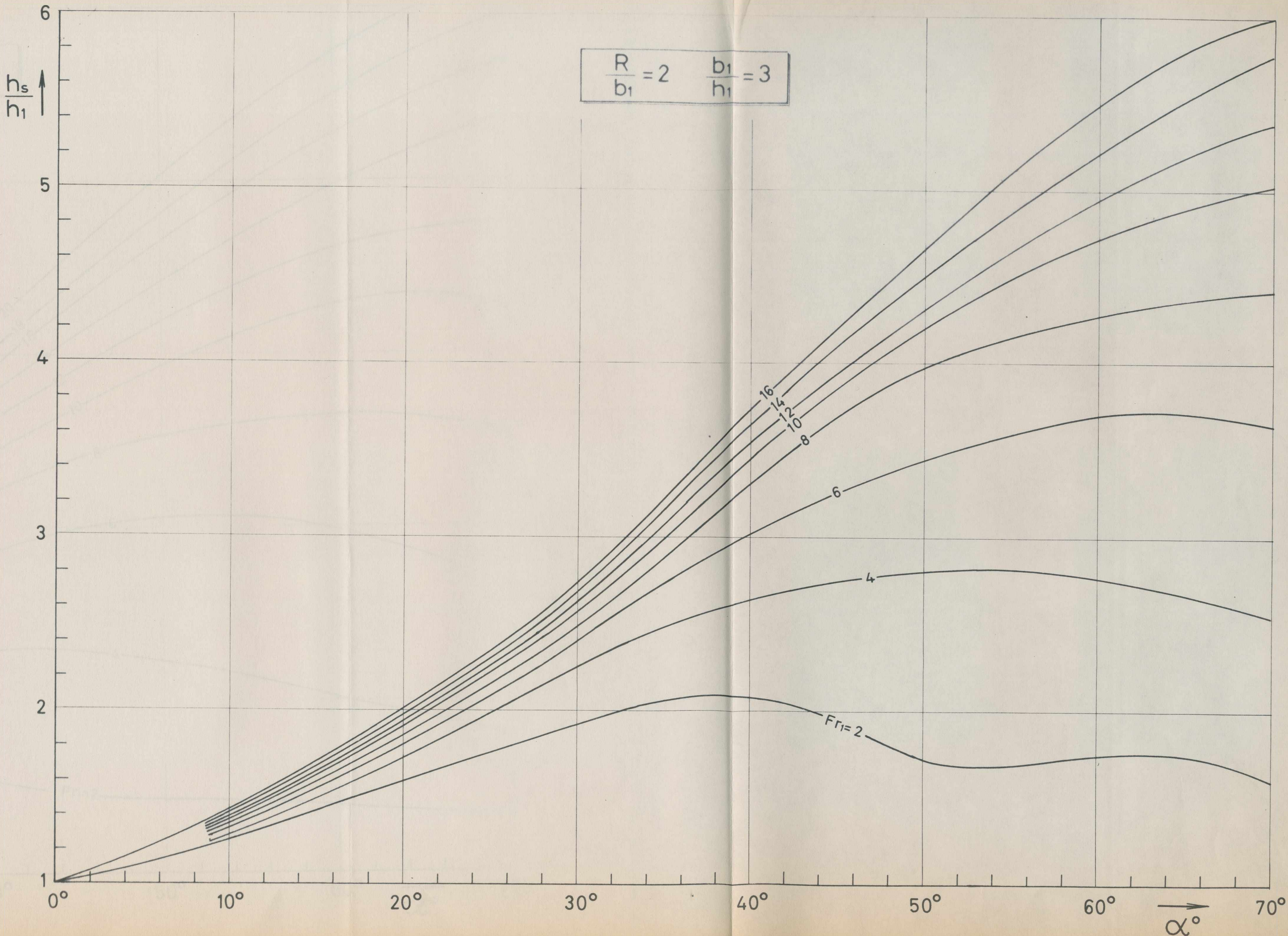
6.
PRILOZI

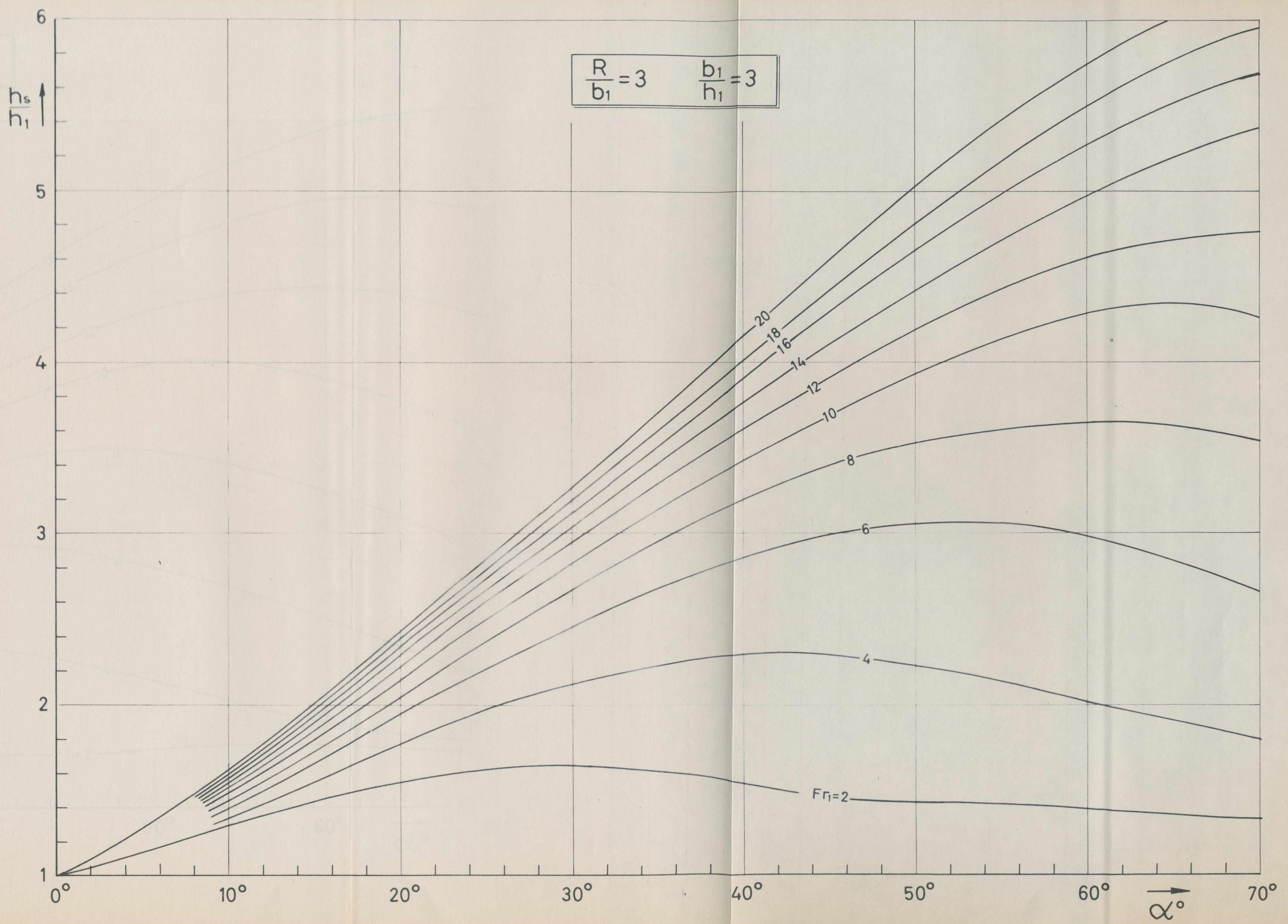
SPISAK PRILOGA KOJI GRAFIČKI
PRIKAZUJU FUNKCIJU

$$\frac{h_s}{h_1} = \frac{h_s}{h_1} \left(Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha \right) \dots \dots \dots (10)$$

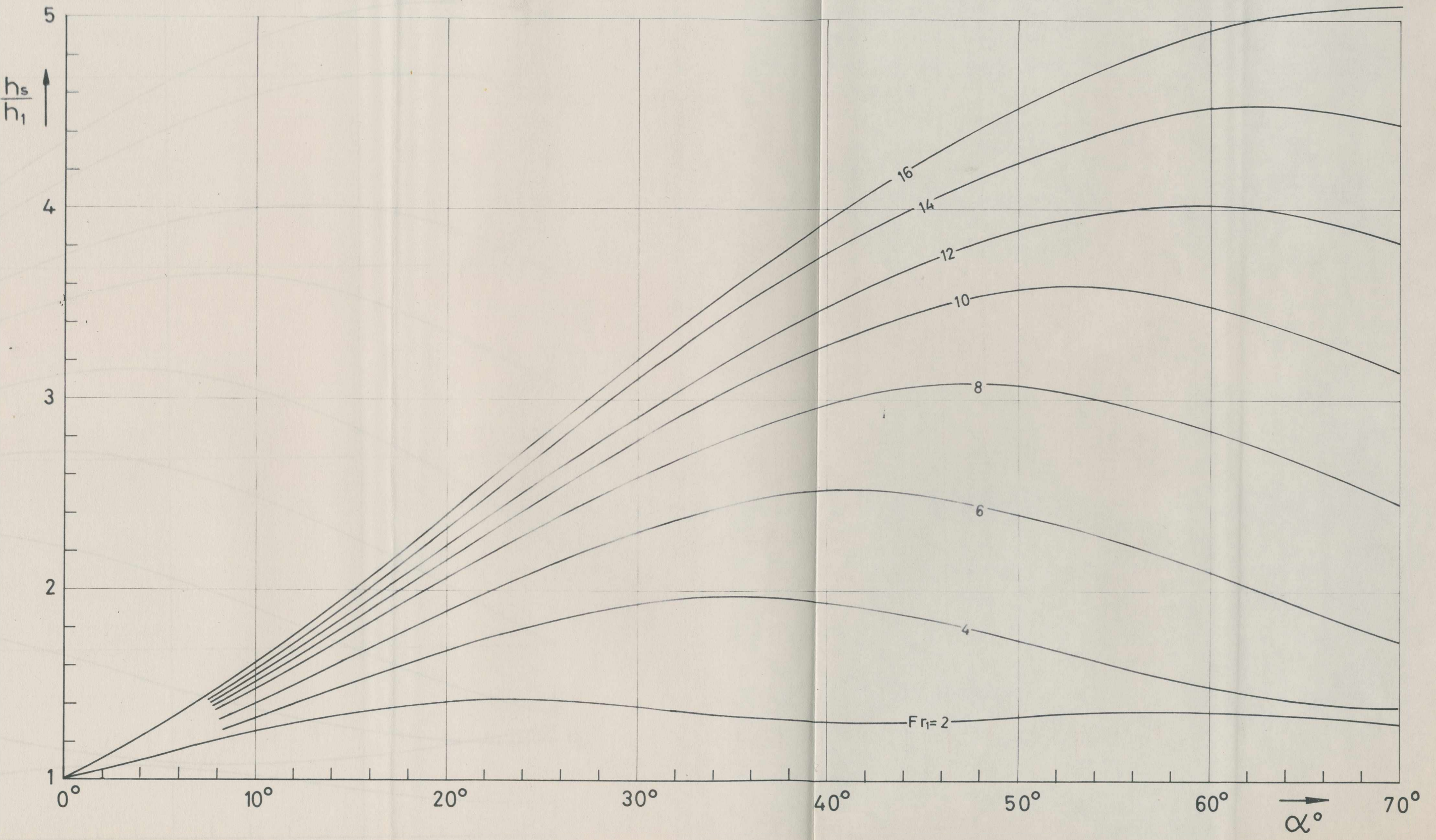
$\frac{b_1}{h_1} \backslash \frac{R}{b_1}$		2	3	4	5
3	P R I L O G	1-1	1-2	1-3	1-4
4		1-5	1-6	1-7	1-8
5		1-9	1-10	1-11	1-12
6		1-13	1-14	1-15	1-16

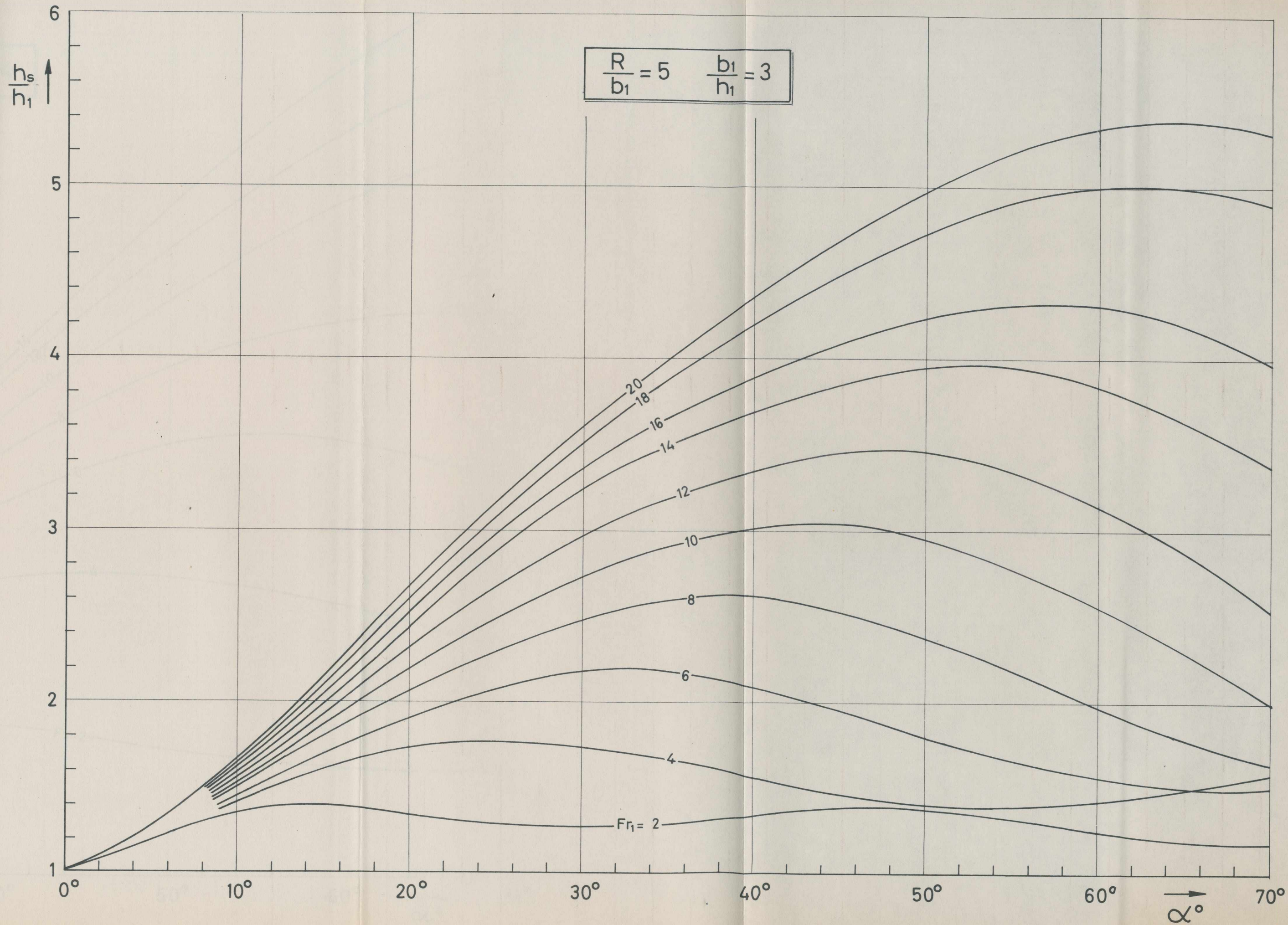


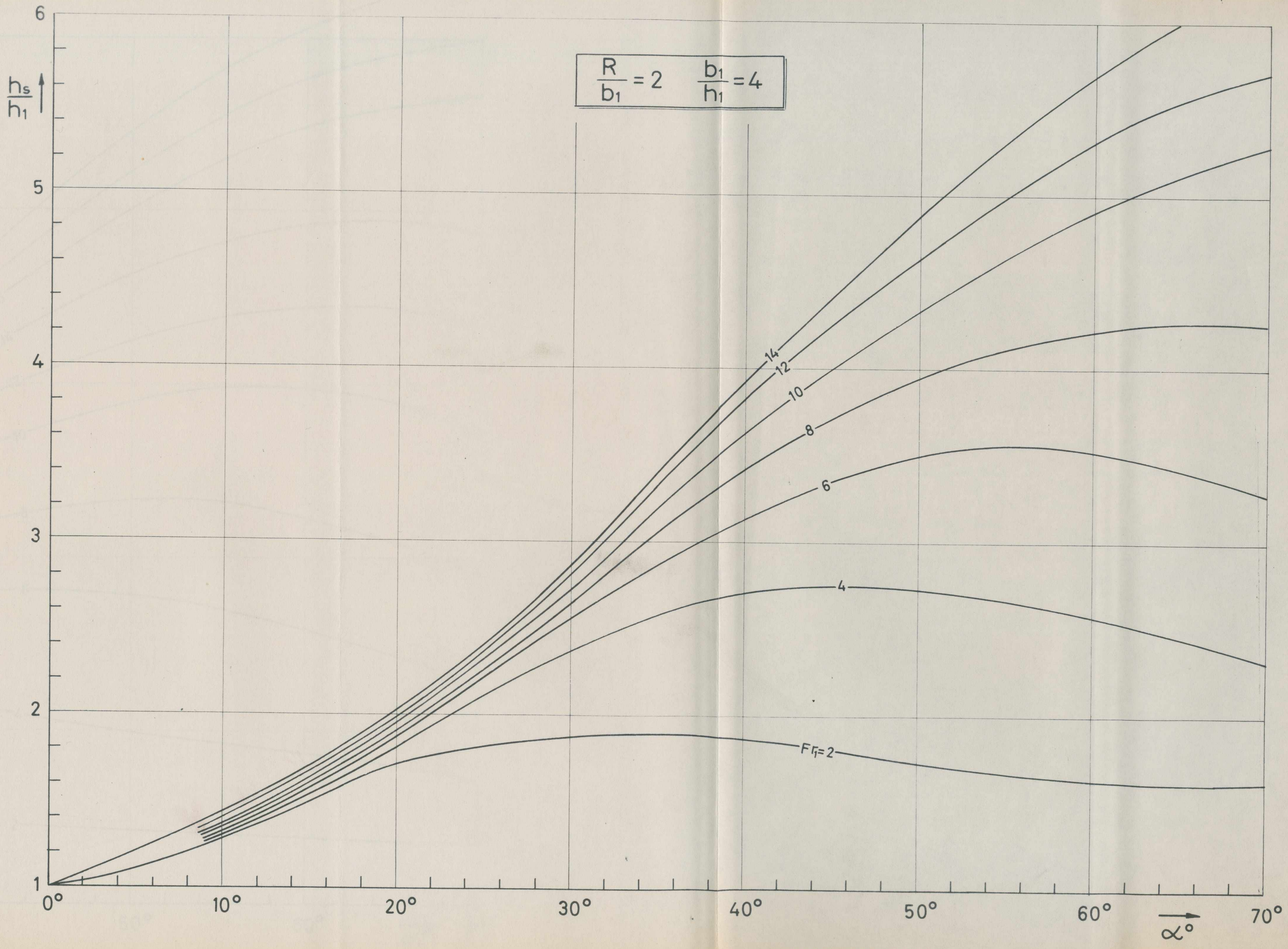


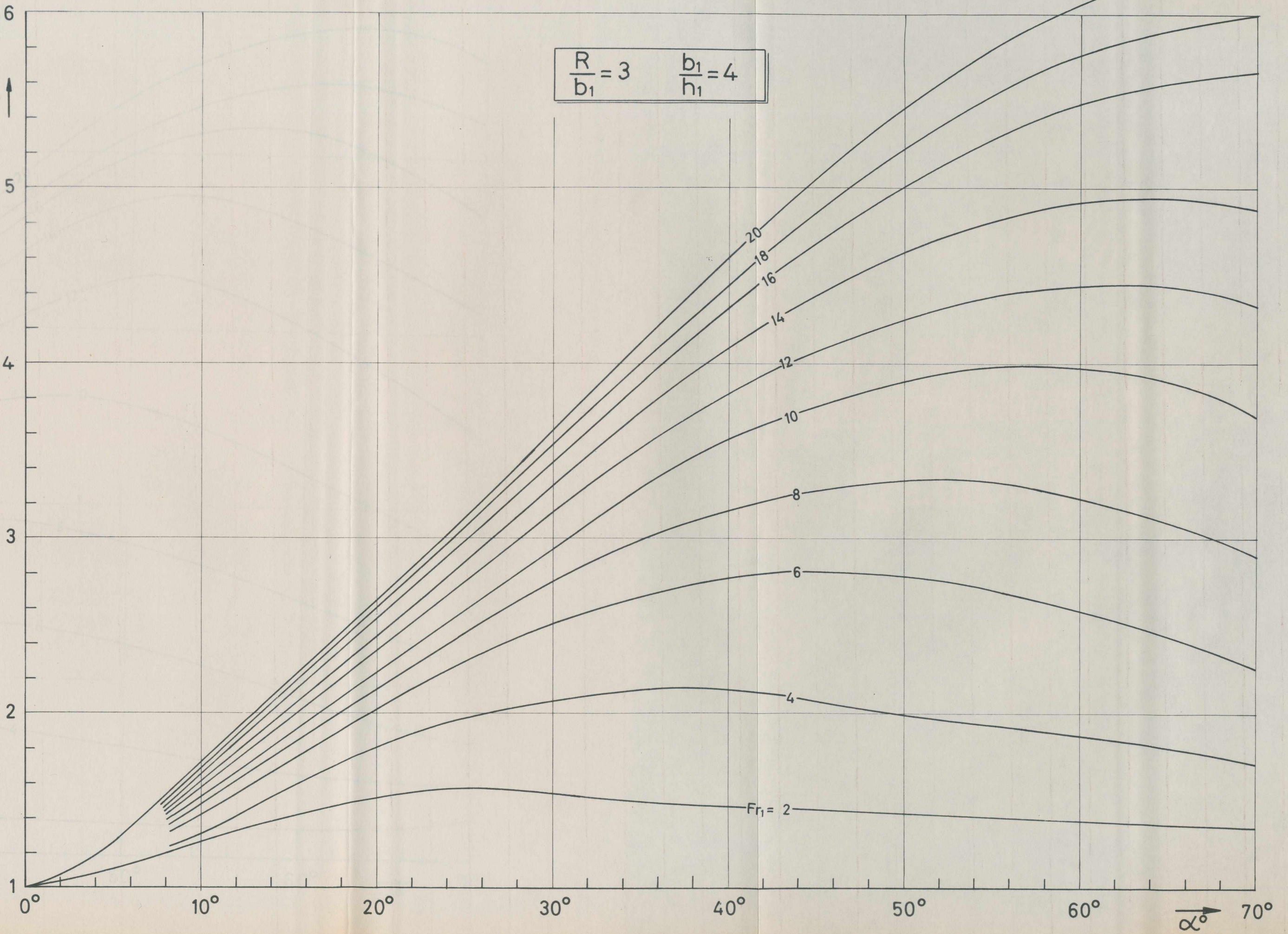


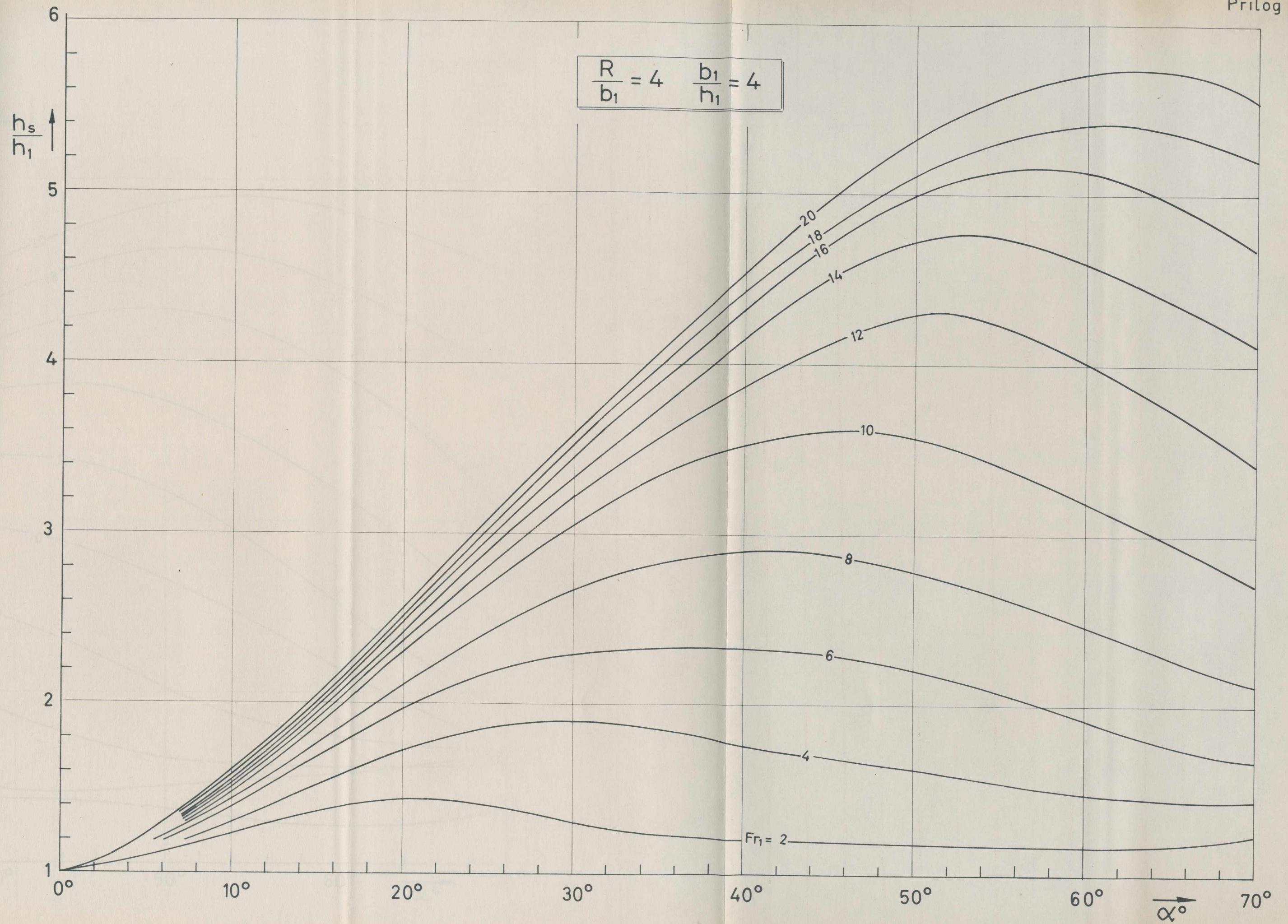
$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$



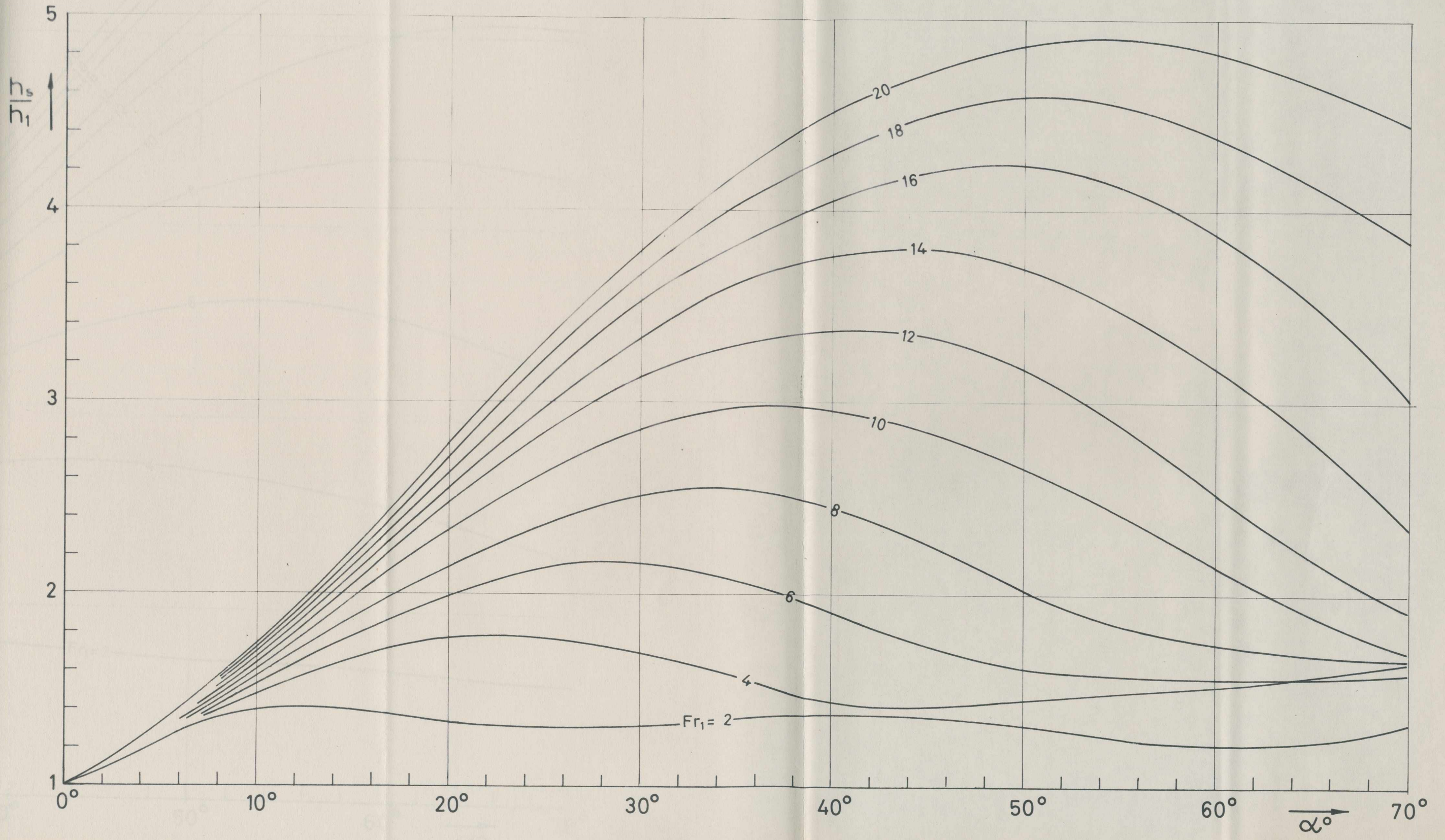


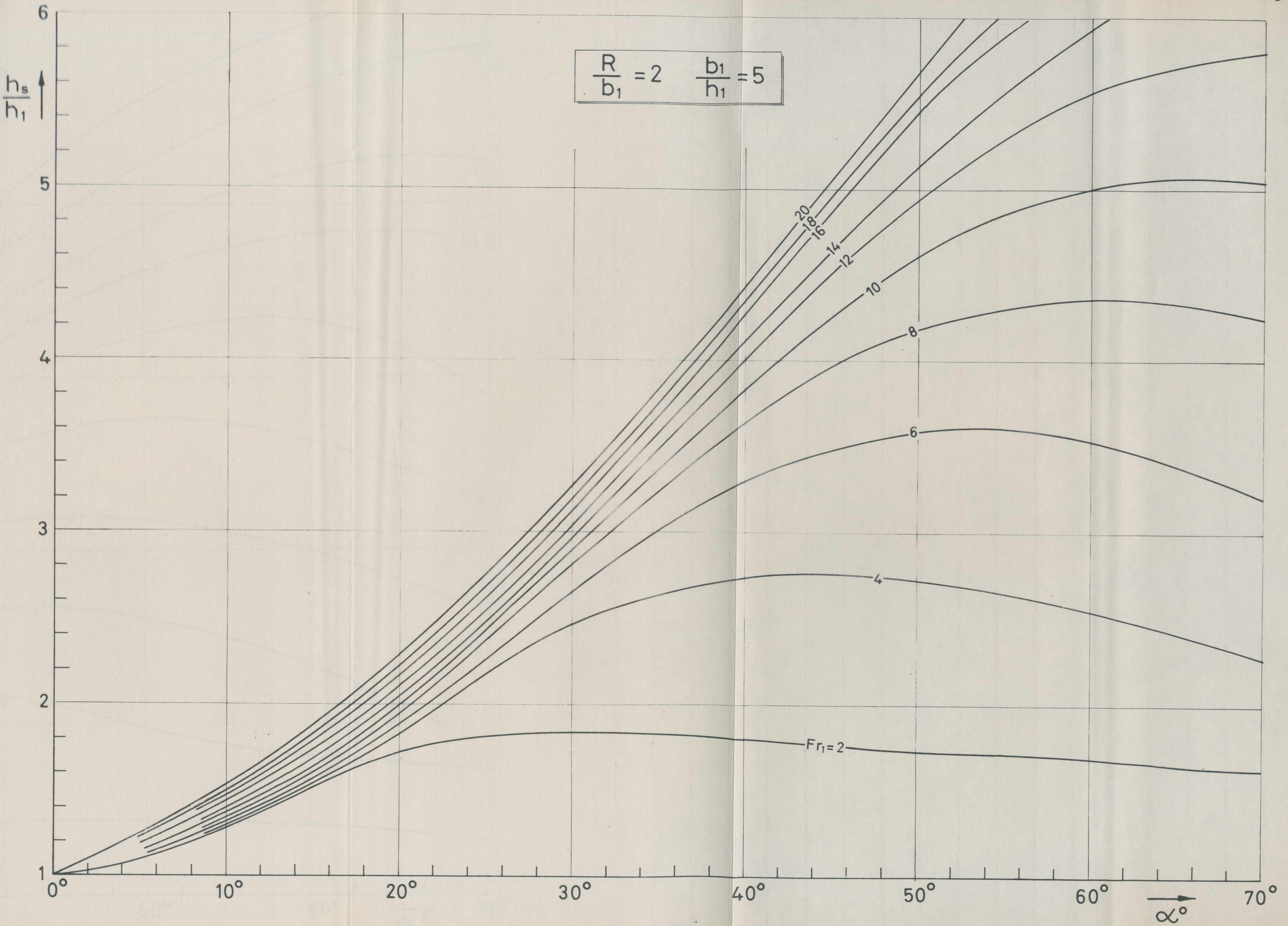




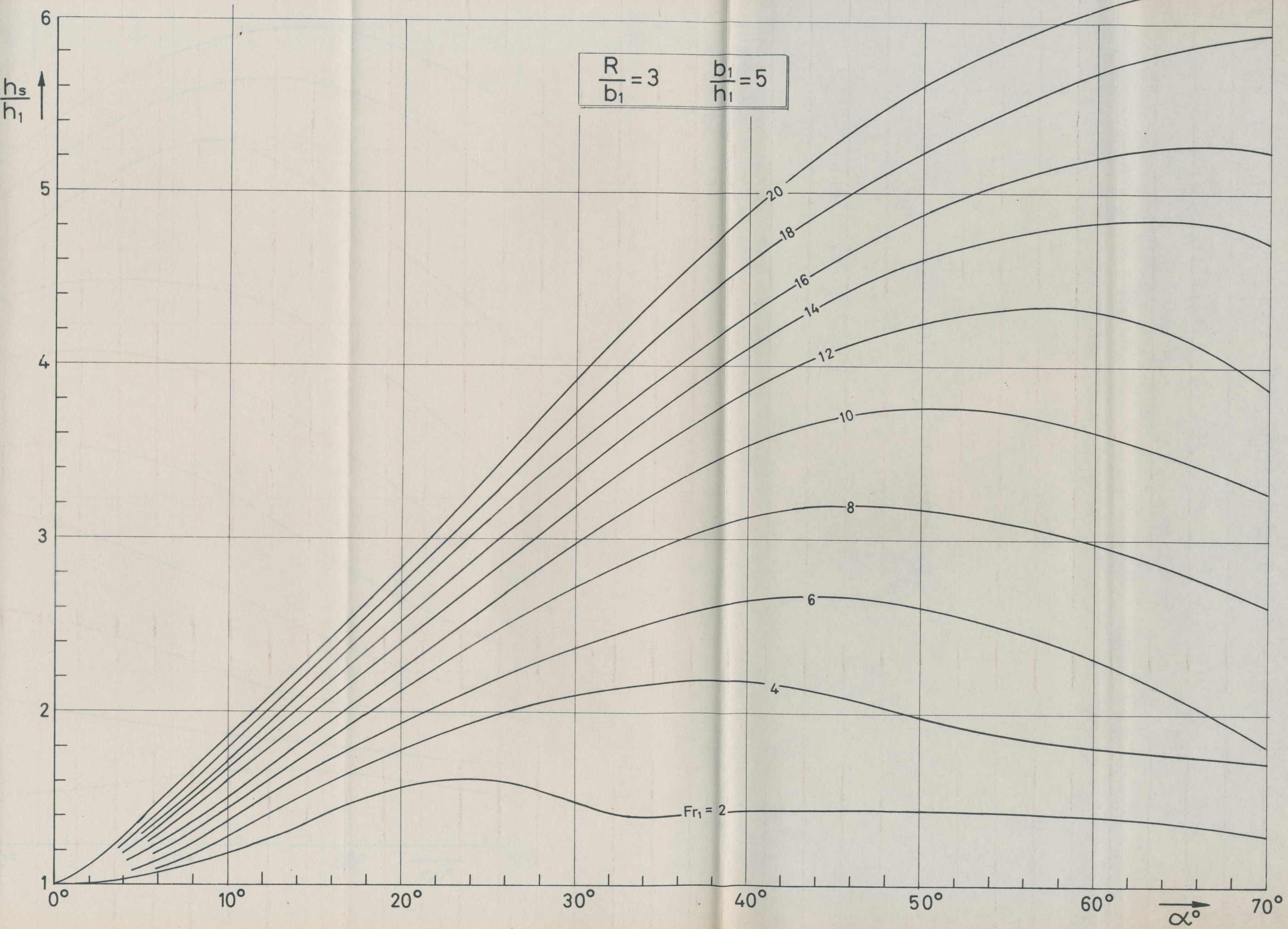


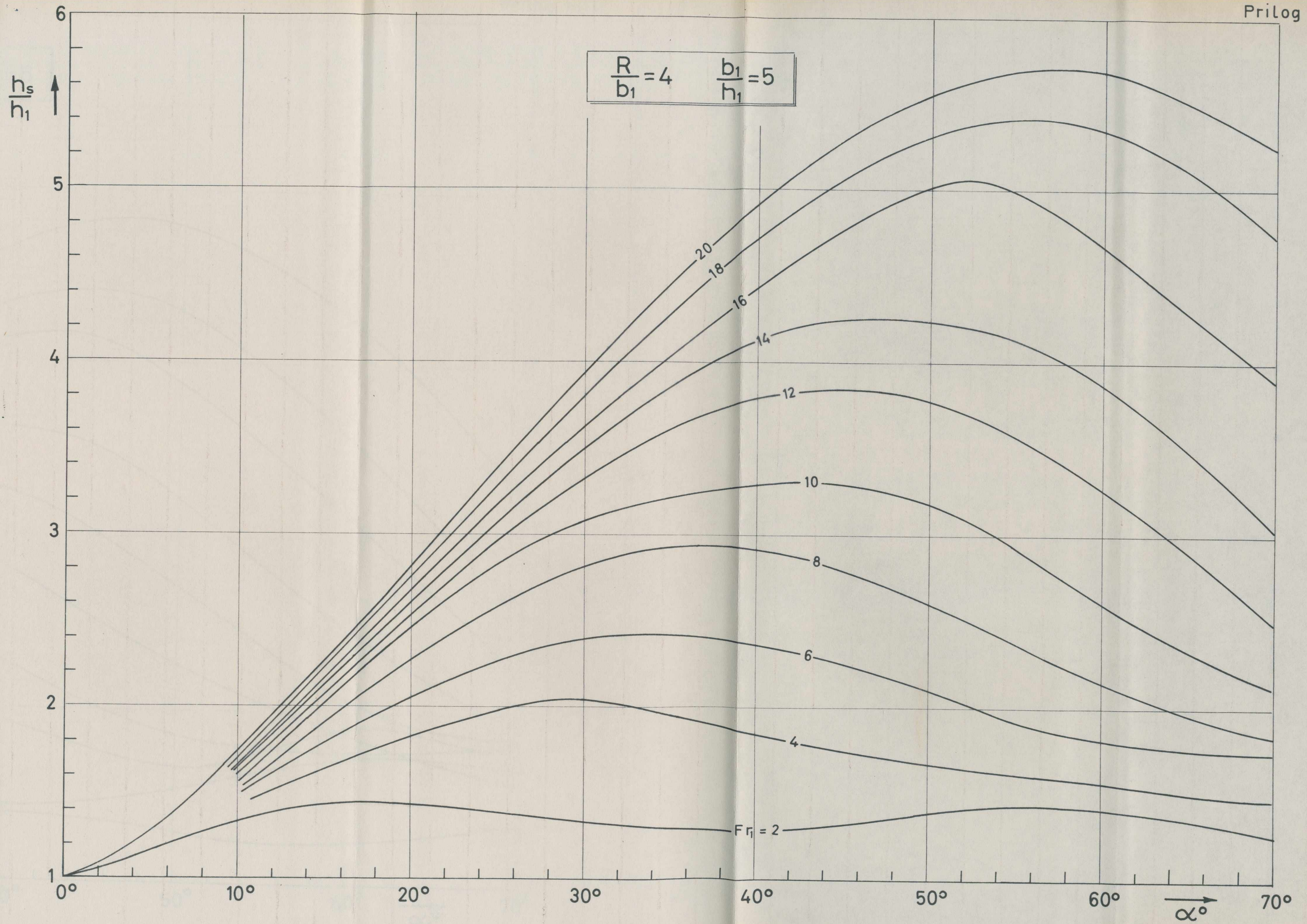
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



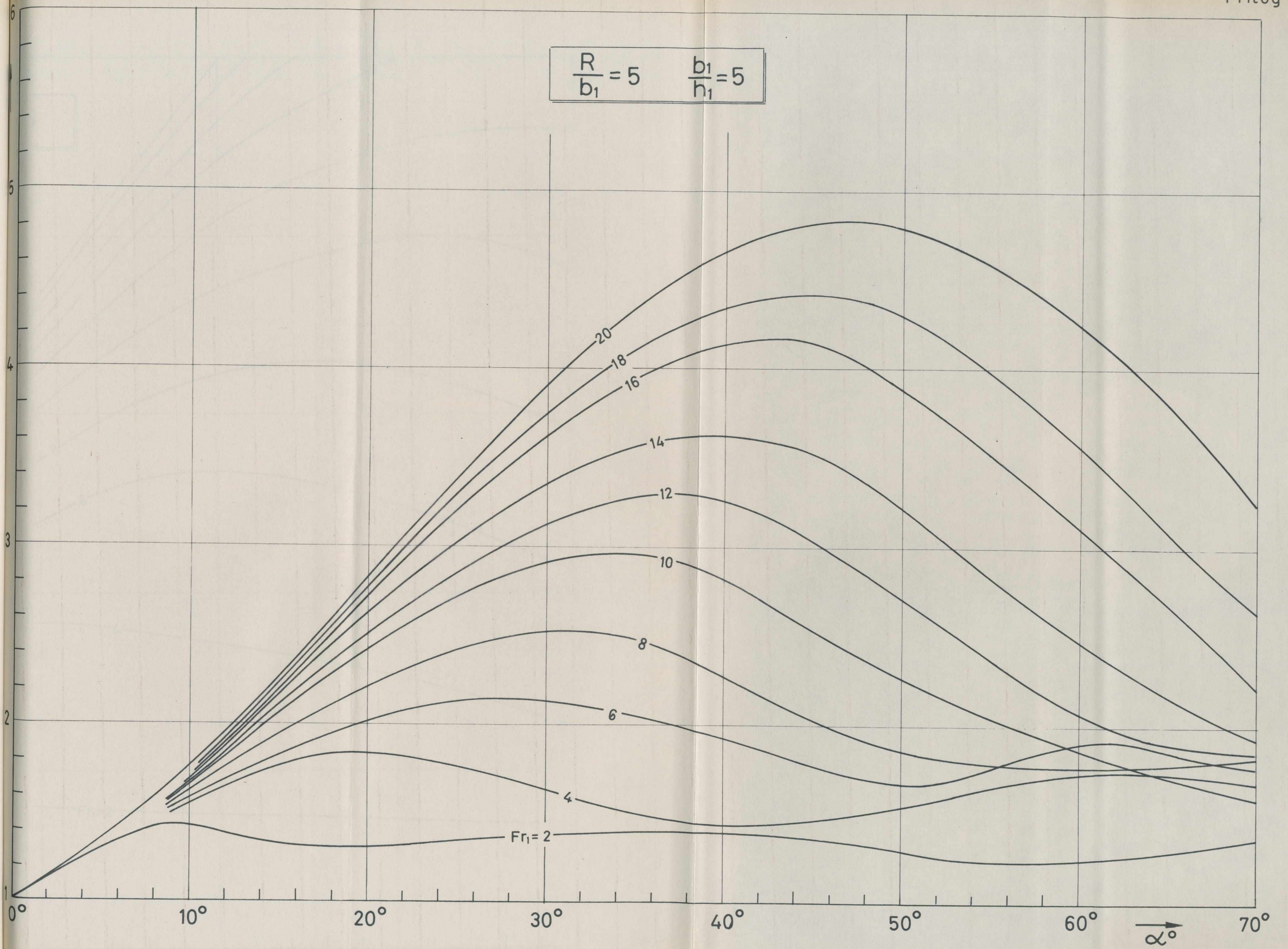


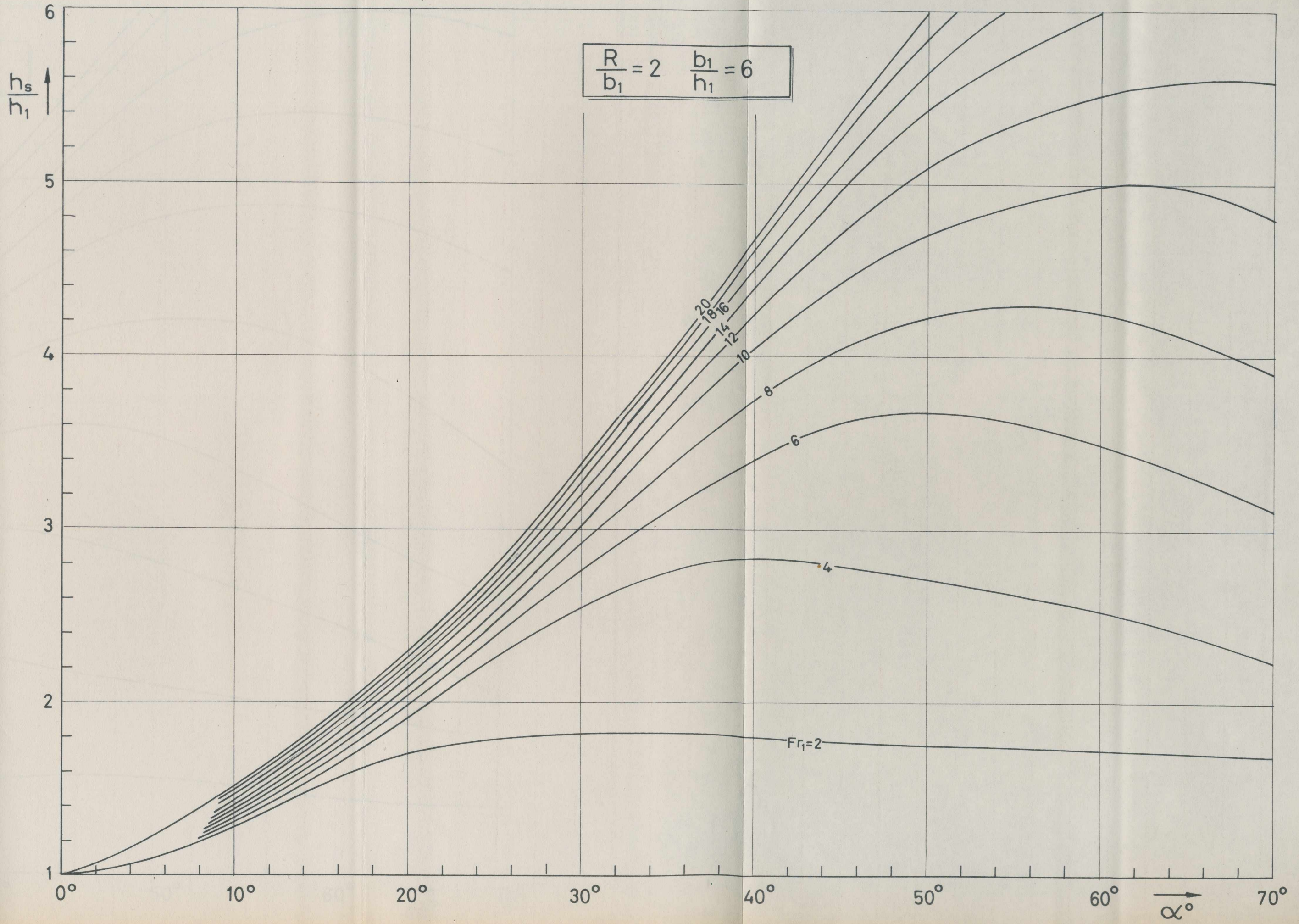
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$

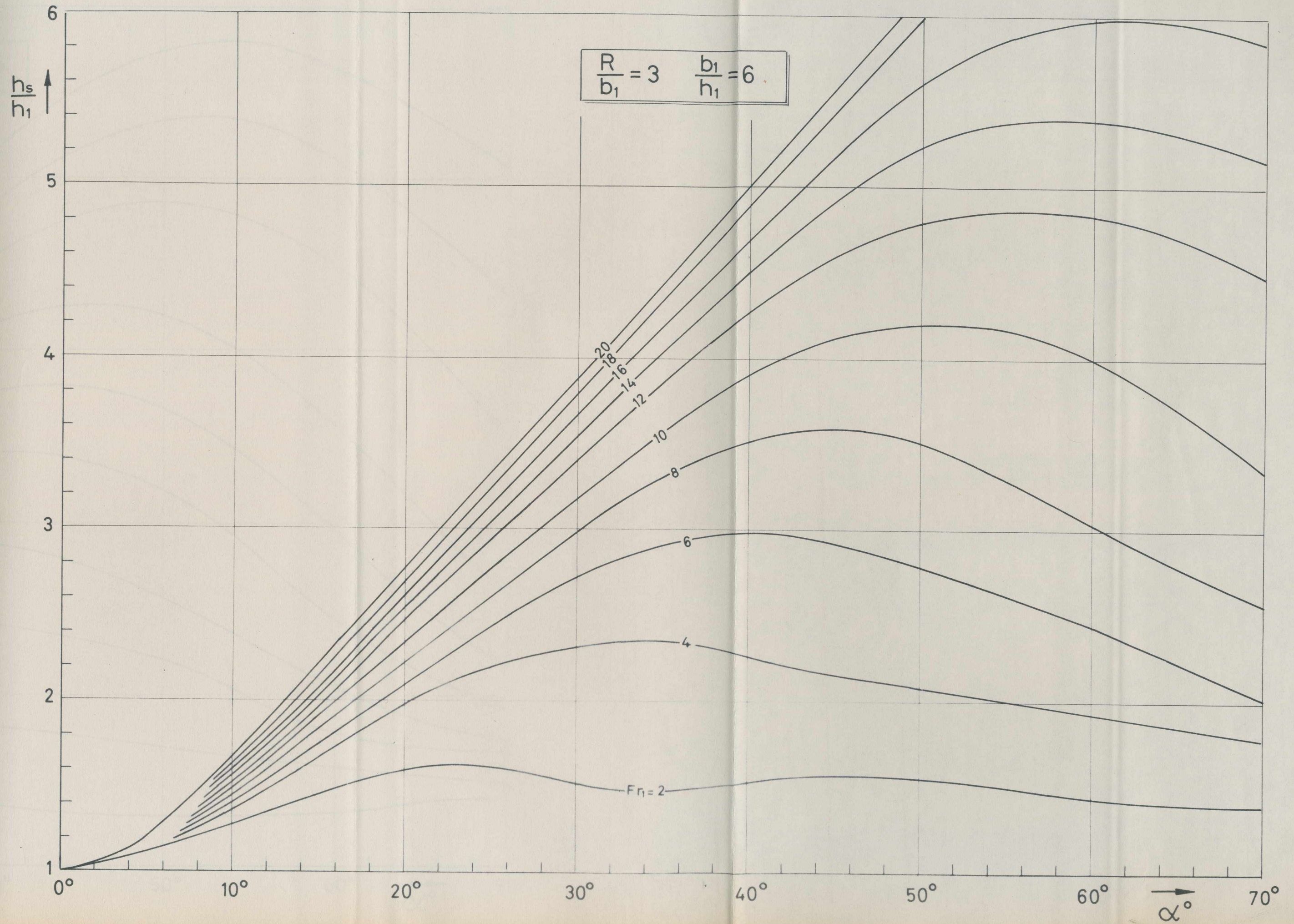




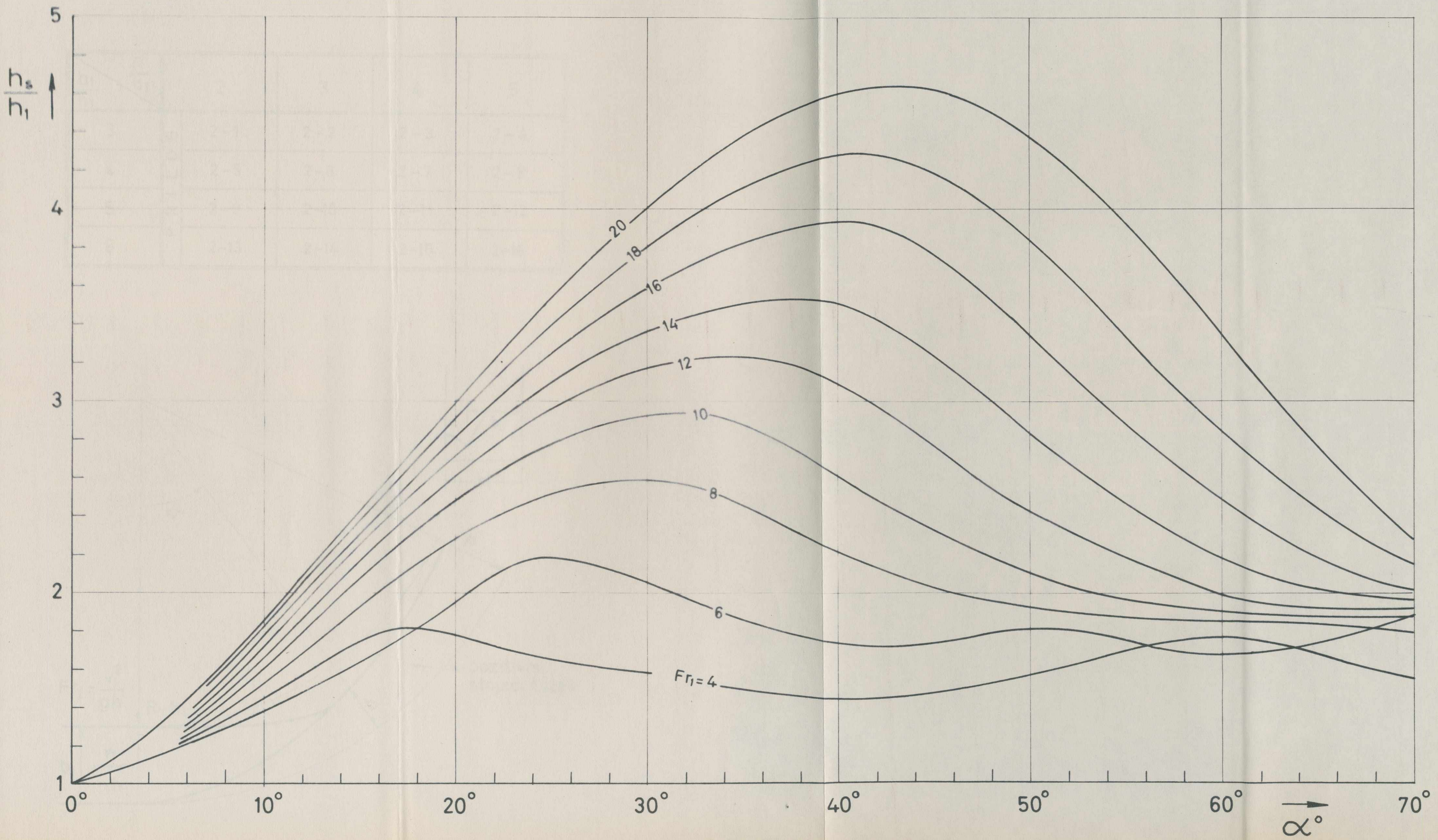
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$







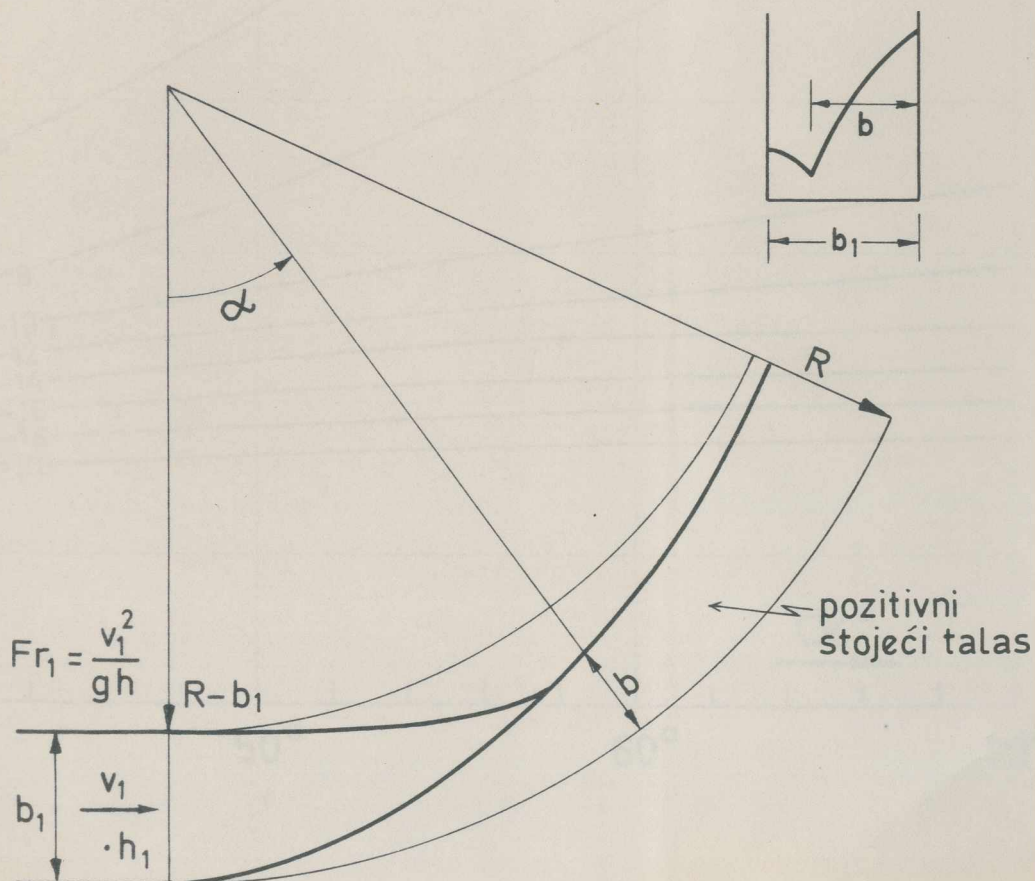
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$



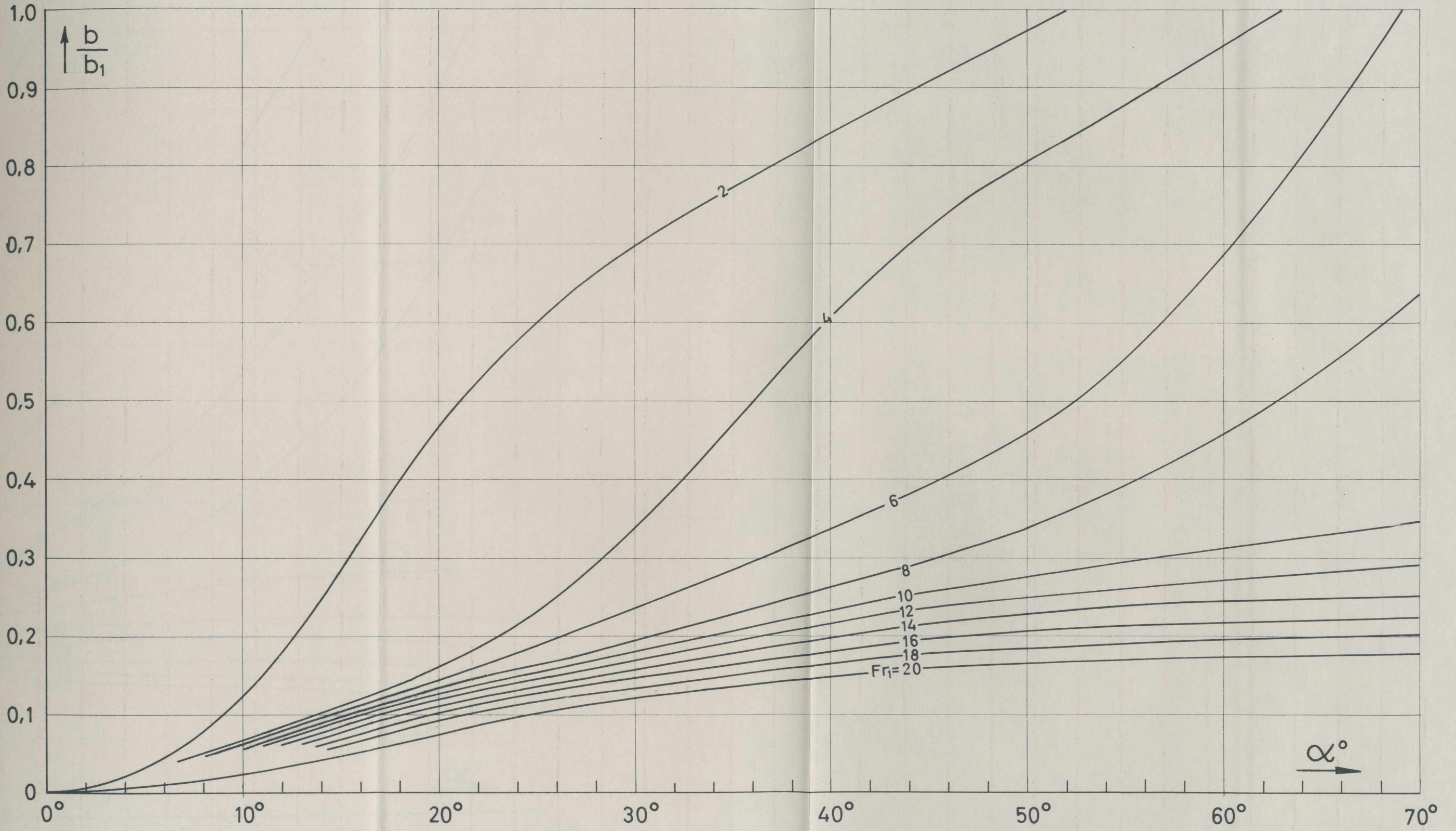
SPISAK PRILOGA KOJI GRAFIČKI
PRIKAZUJU FUNKCIJU

$$\frac{b}{b_1} = \frac{b}{b_1} (Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha) \dots \dots \dots (11)$$

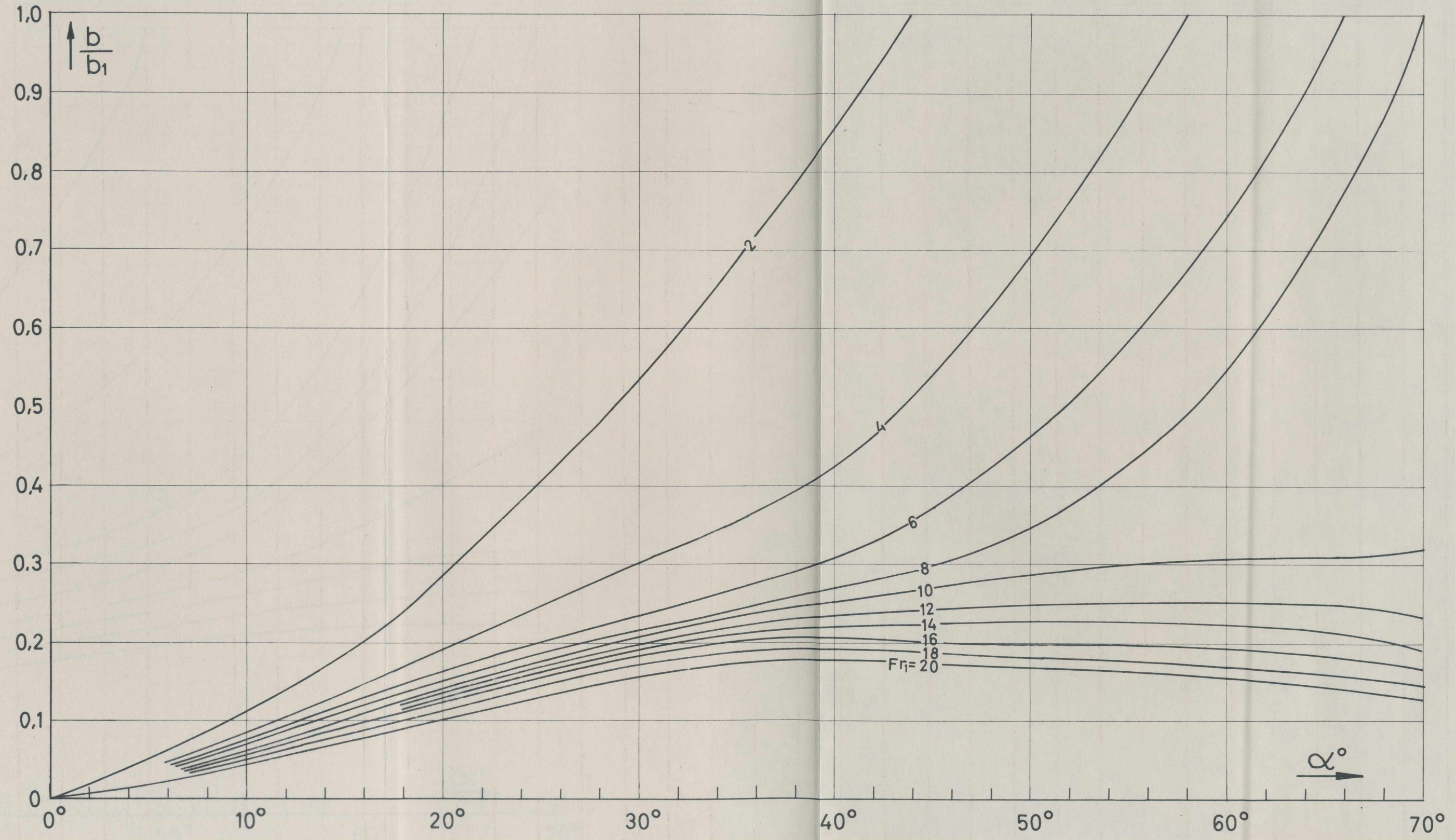
$\frac{b_1}{h_1} \backslash \frac{R}{b_1}$		2	3	4	5
3	P R I L O G	2-1	2-2	2-3	2-4
4		2-5	2-6	2-7	2-8
5		2-9	2-10	2-11	2-12
6		2-13	2-14	2-15	2-16



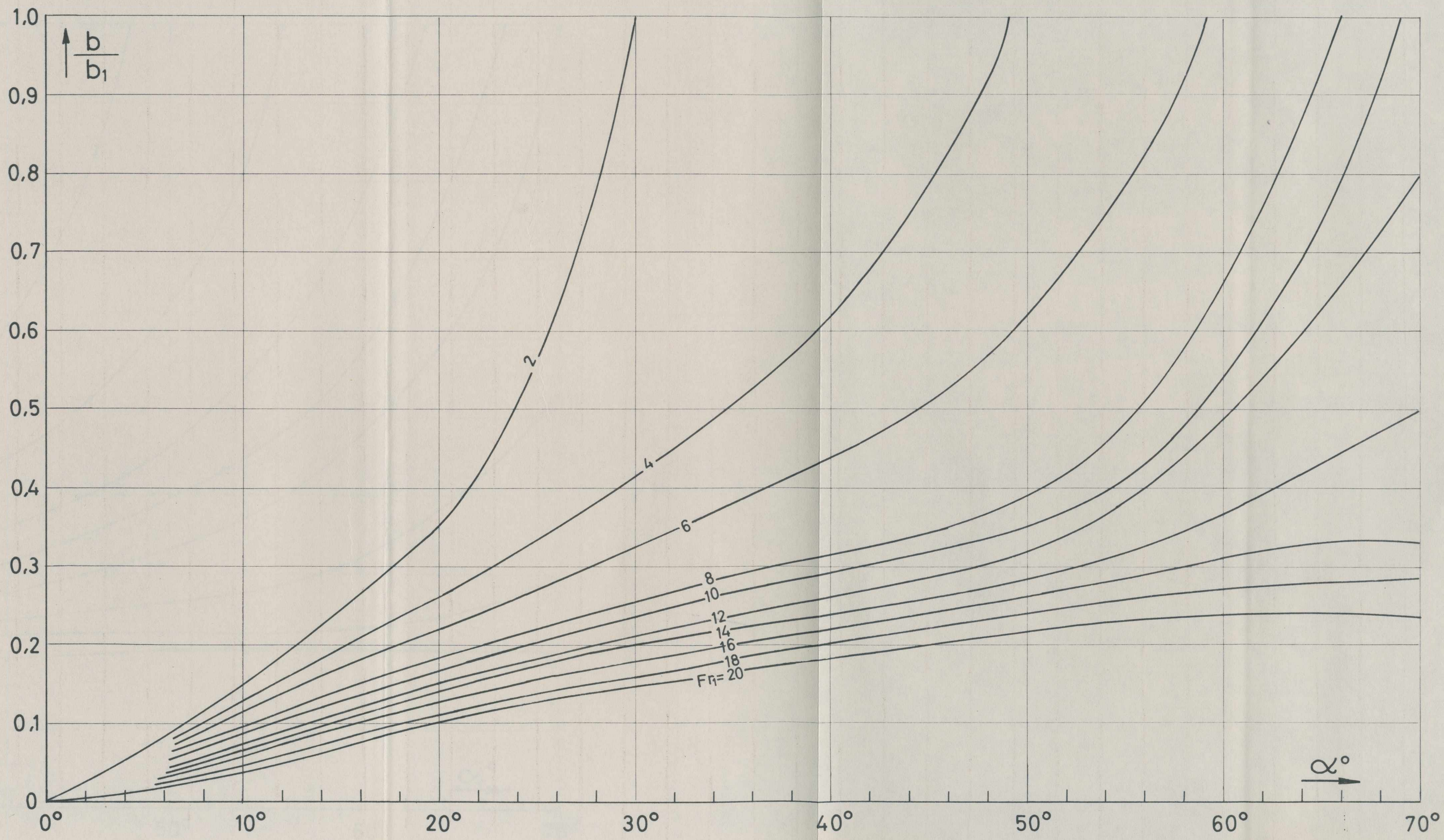
$$\frac{R}{b_1} = 2 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$



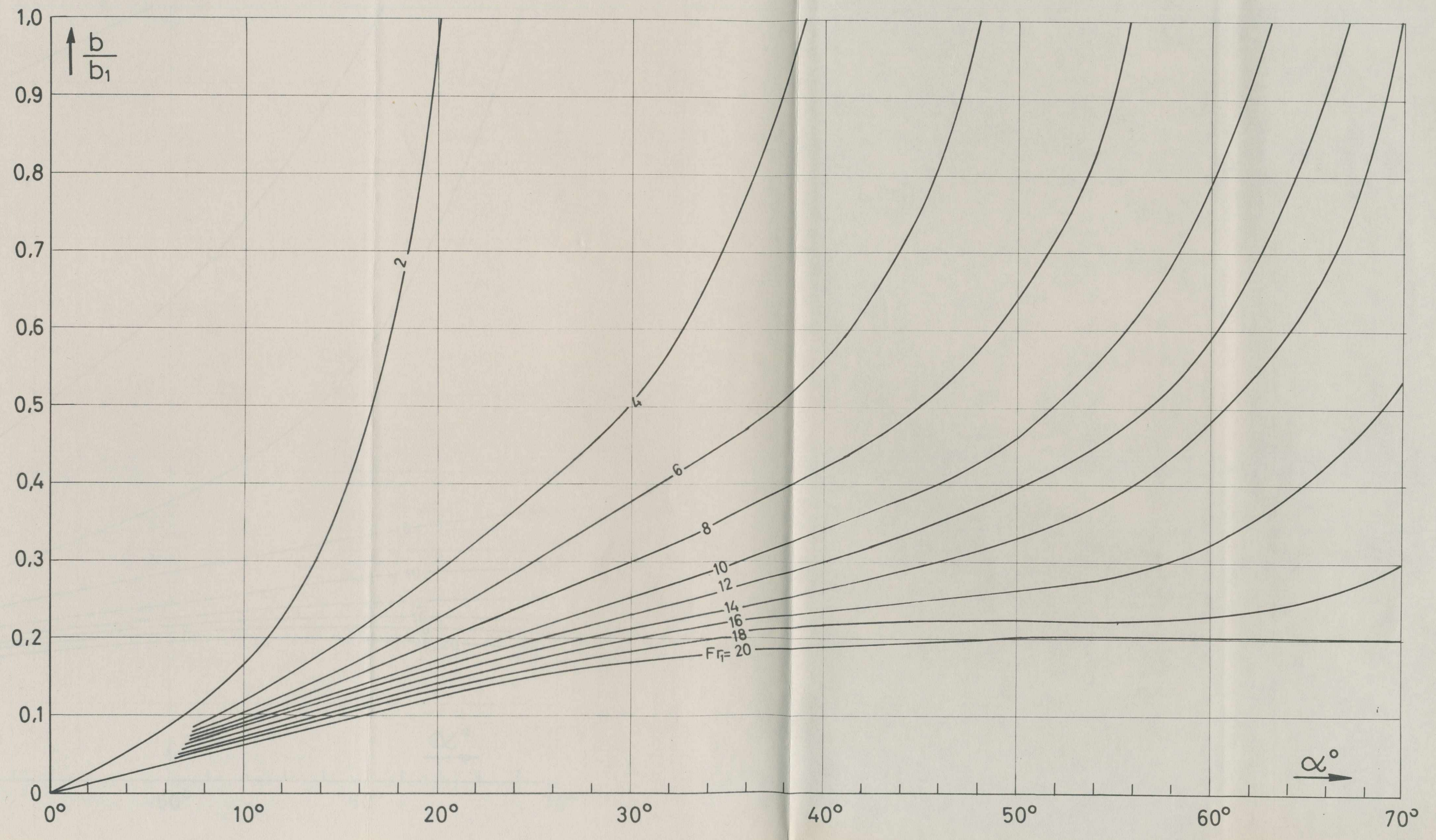
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$



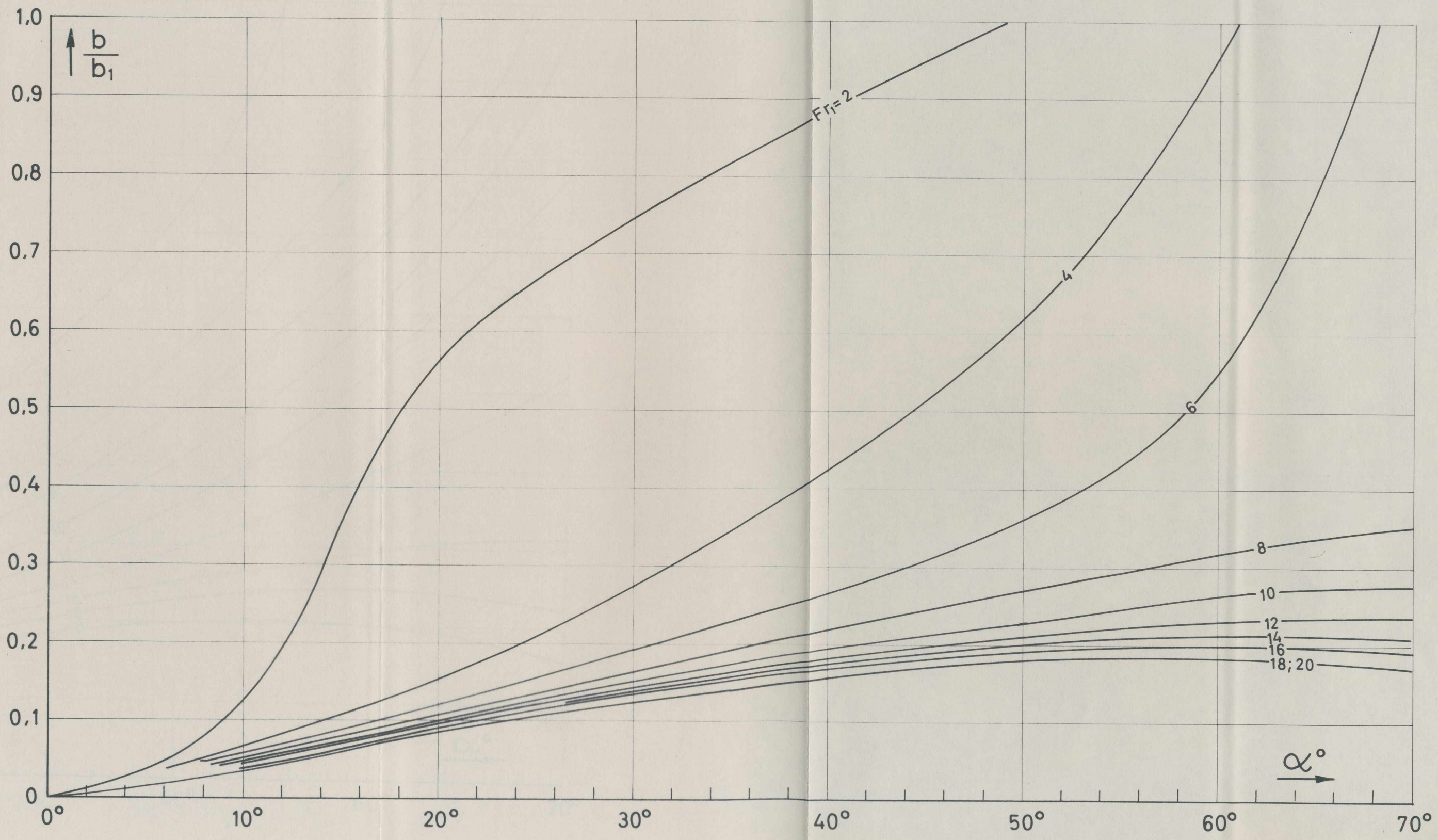
$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$



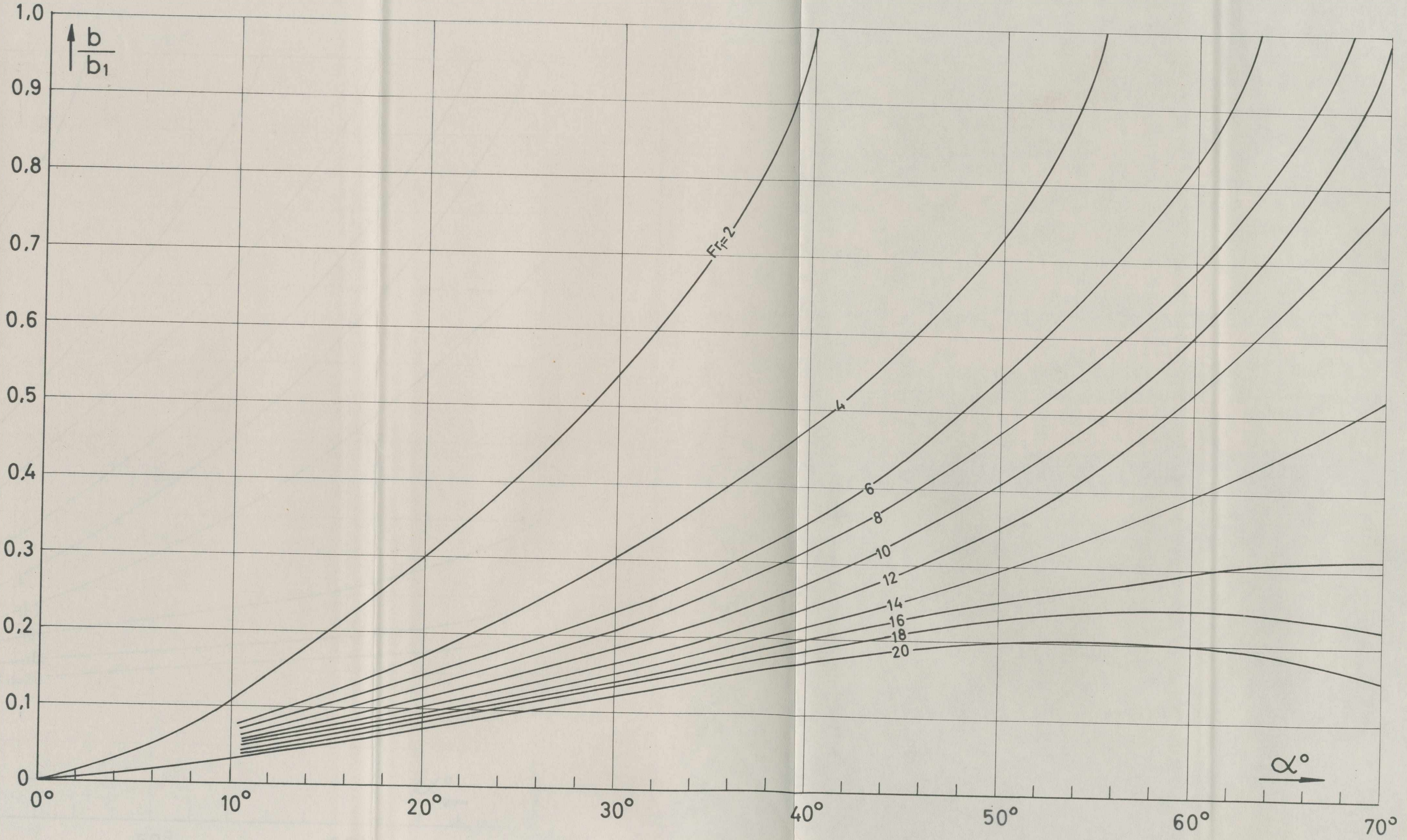
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$



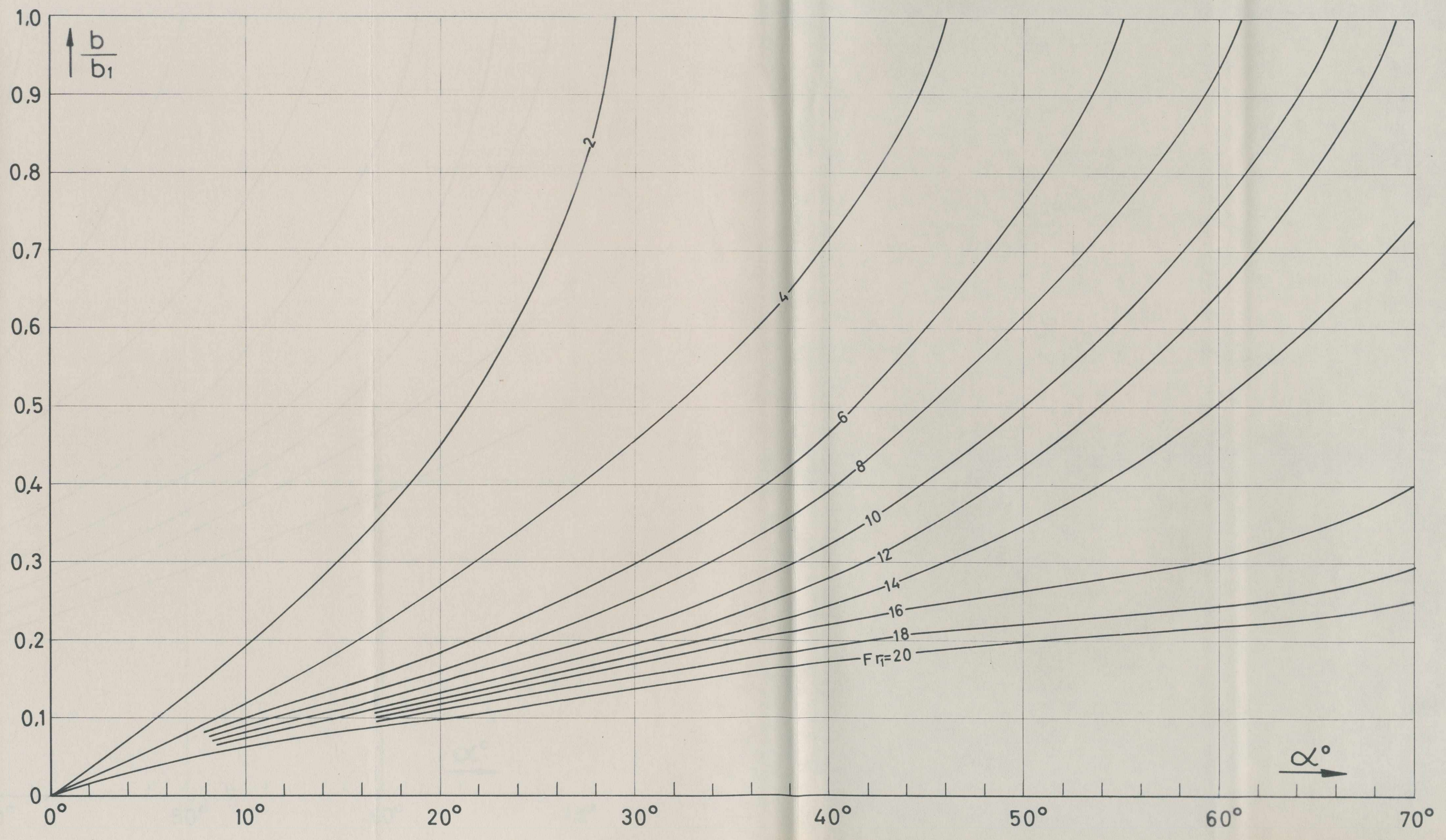
$$\frac{R}{b_1} = 2 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



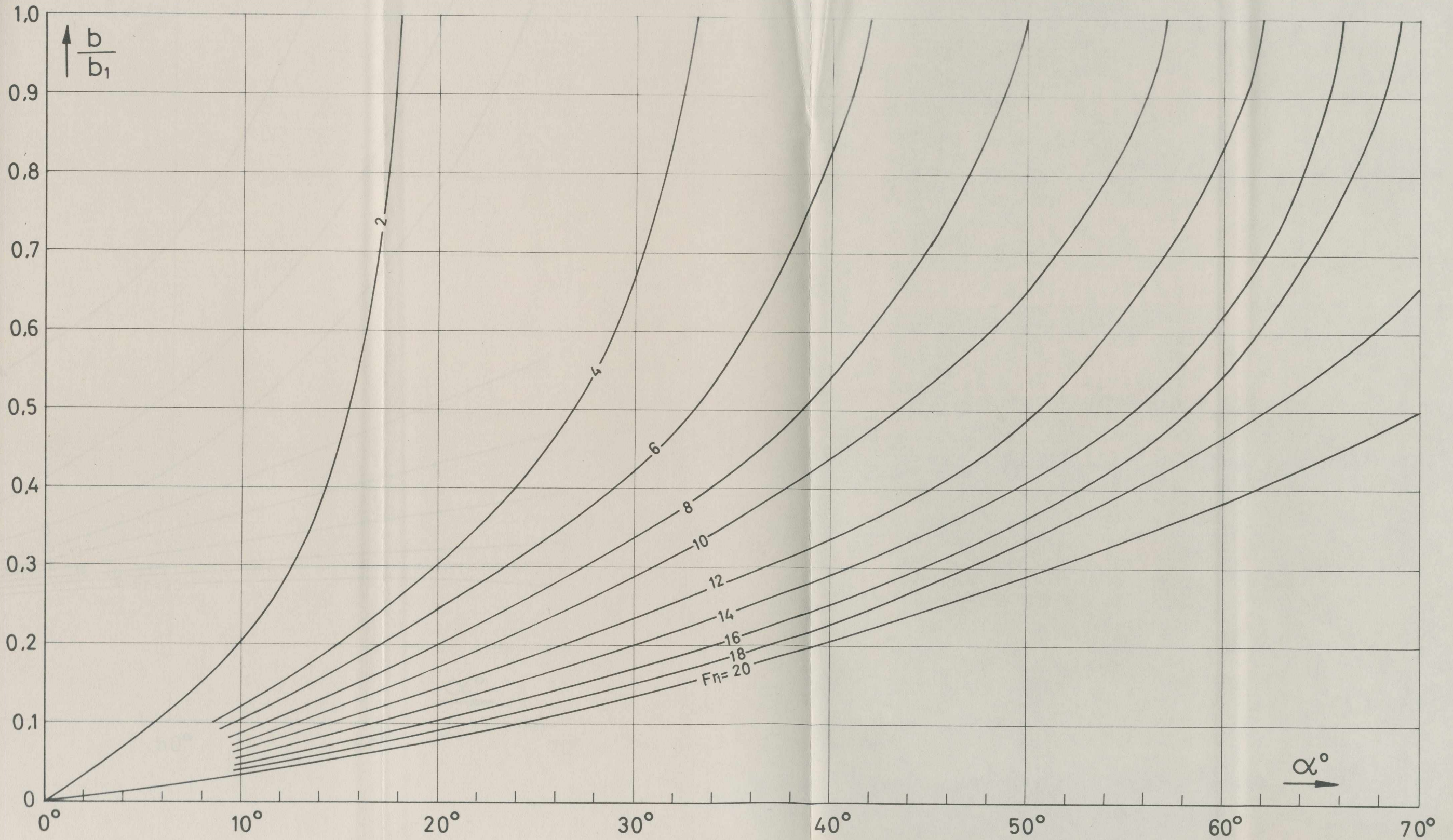
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



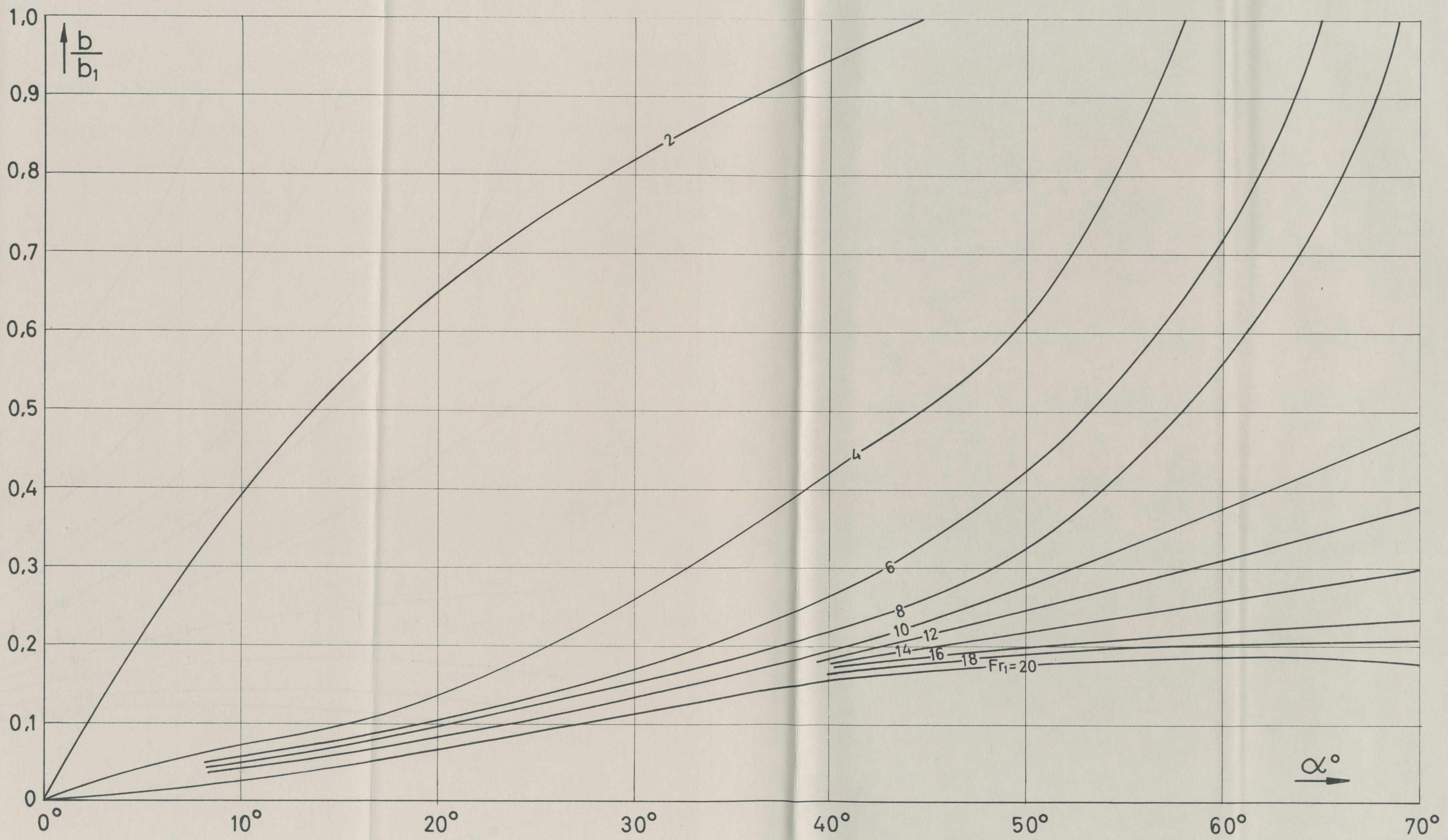
$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



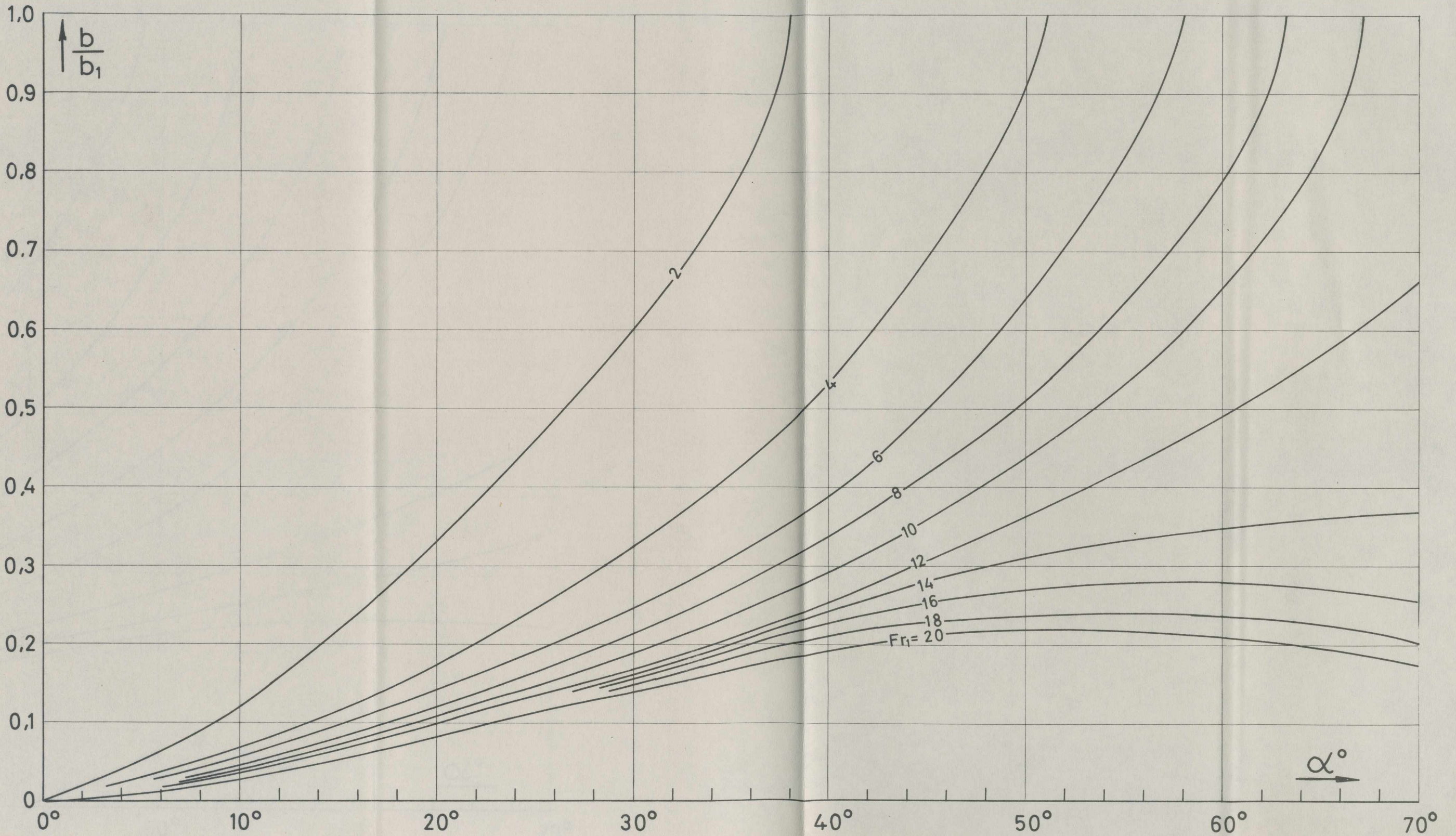
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



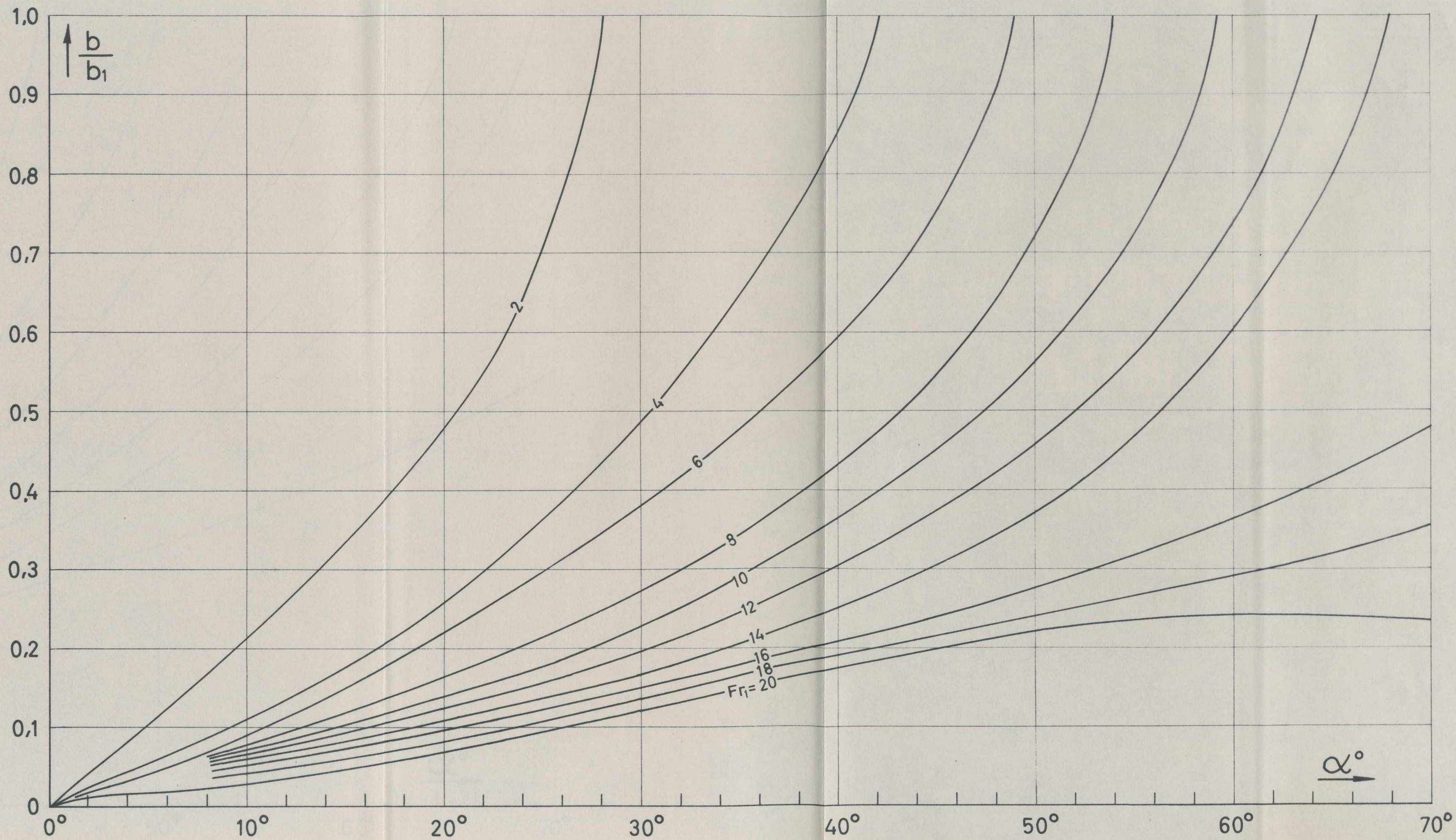
$$\frac{R}{b_1} = 2 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$



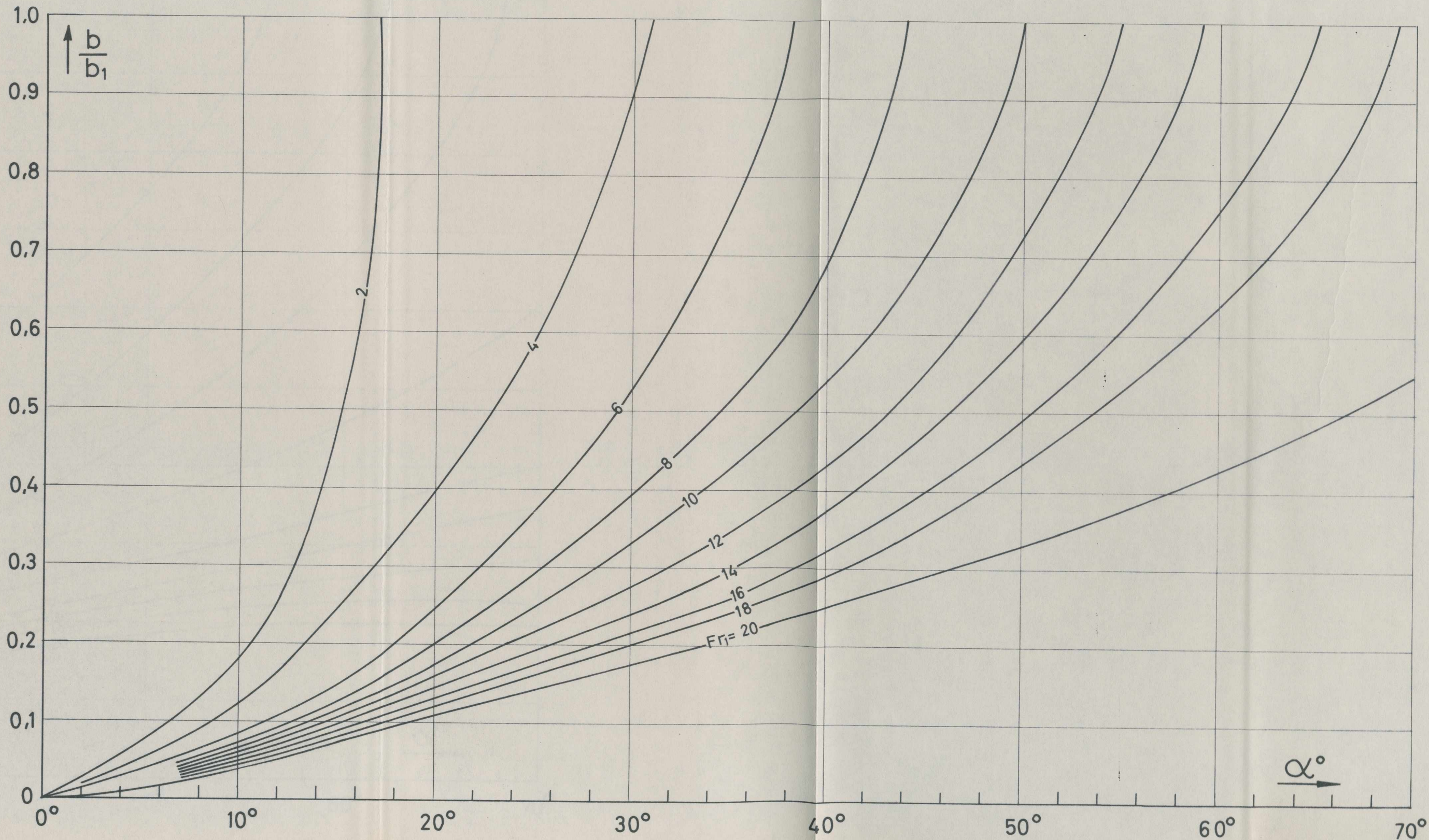
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$



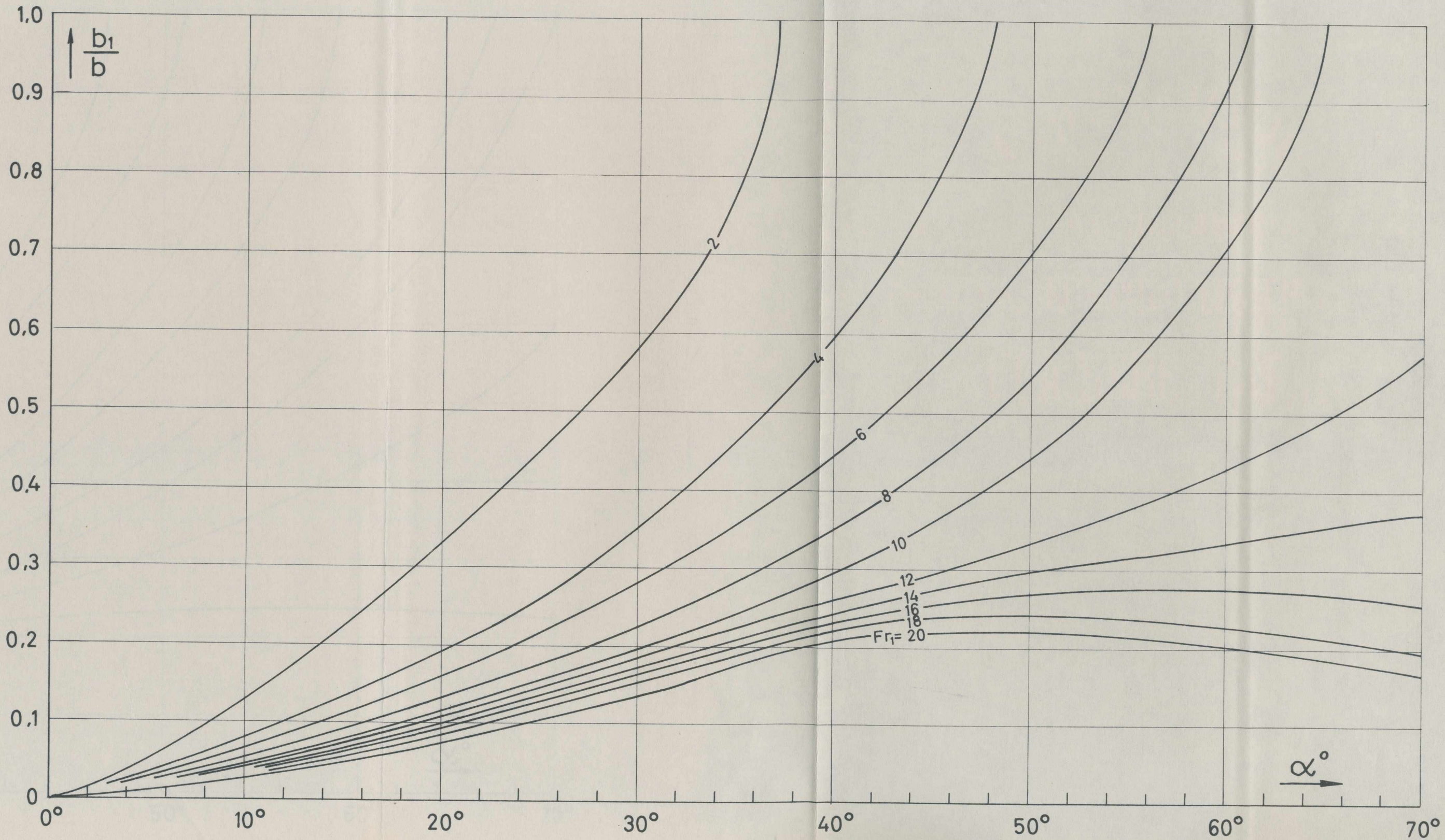
$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$



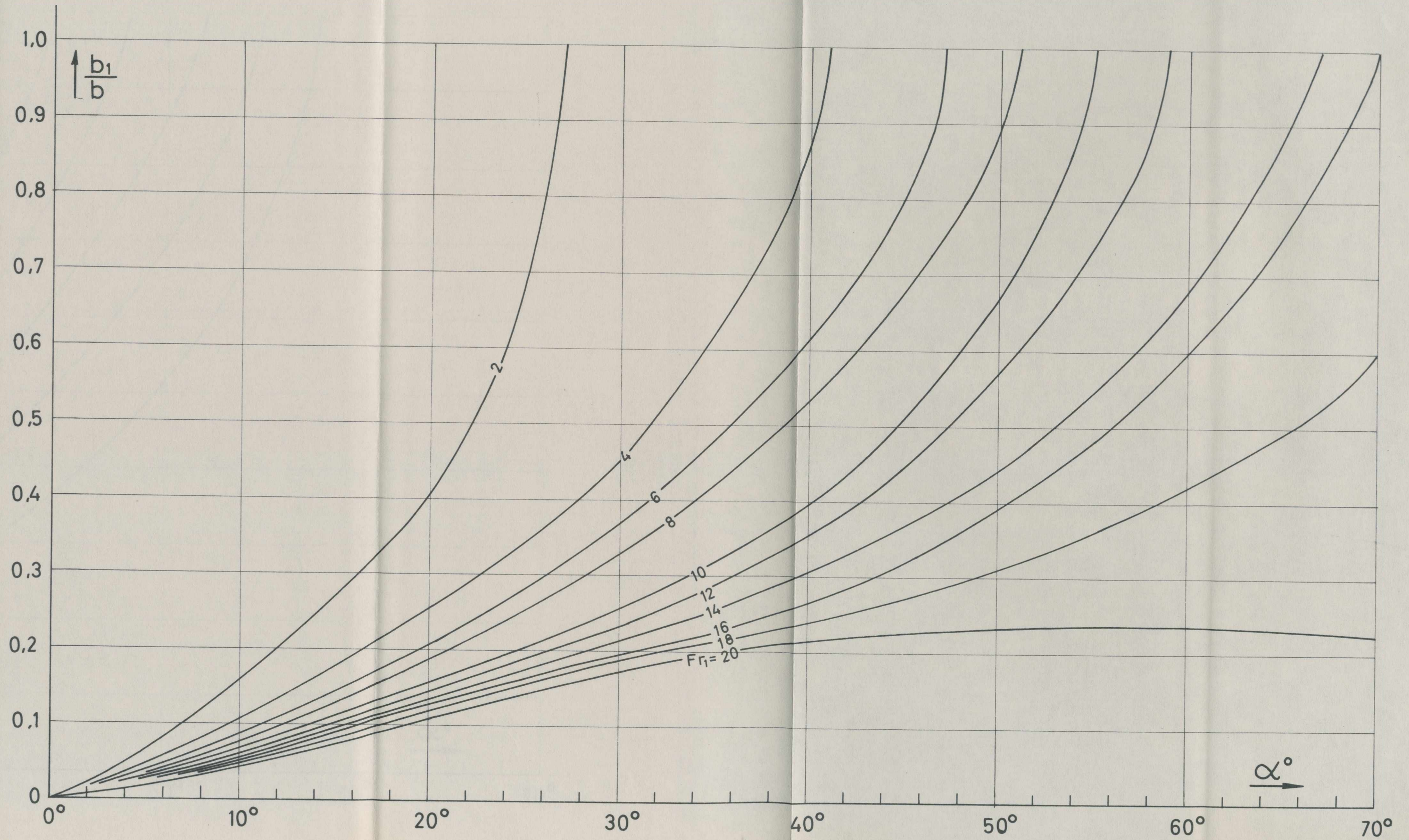
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$



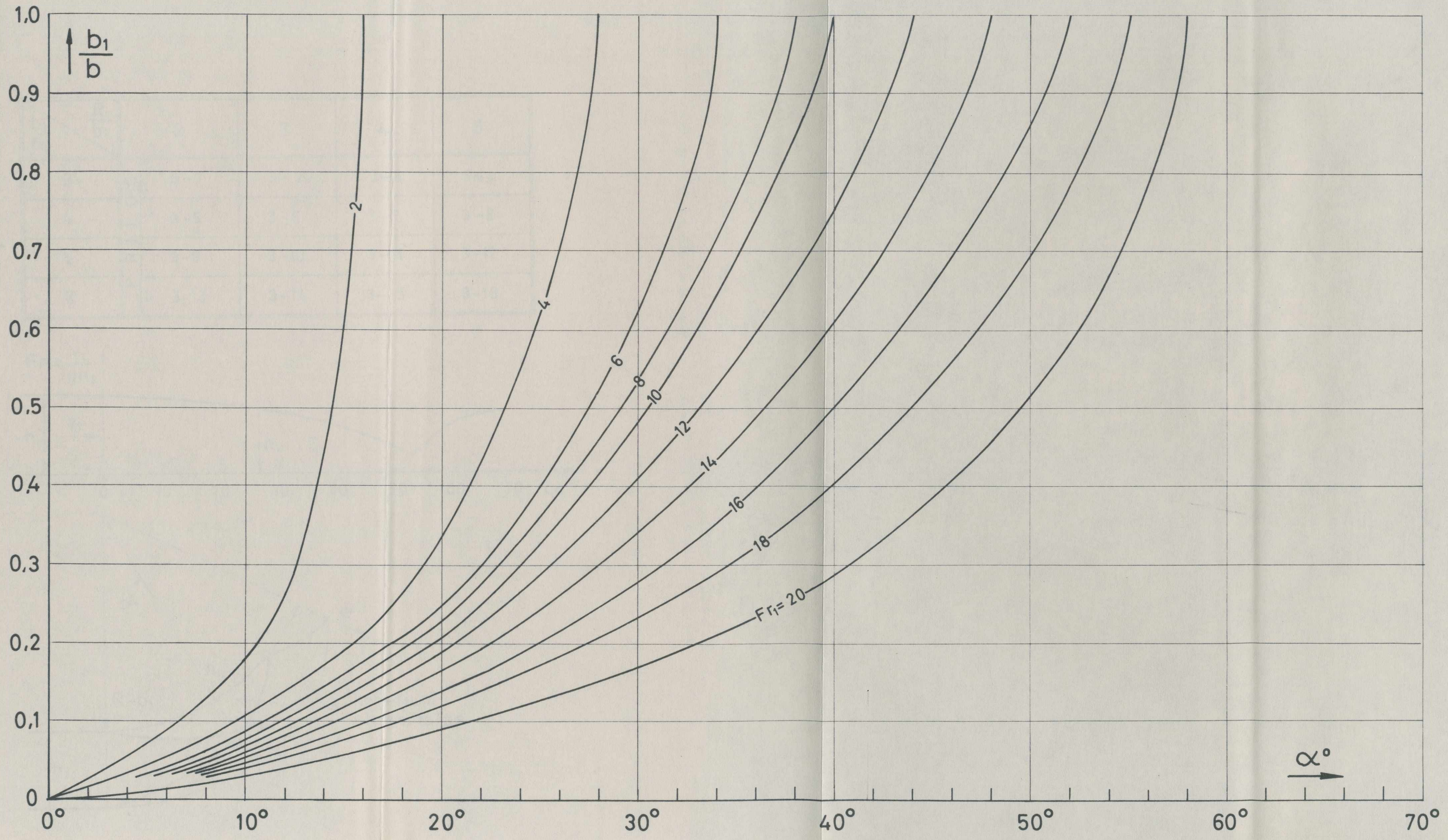
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$



$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$



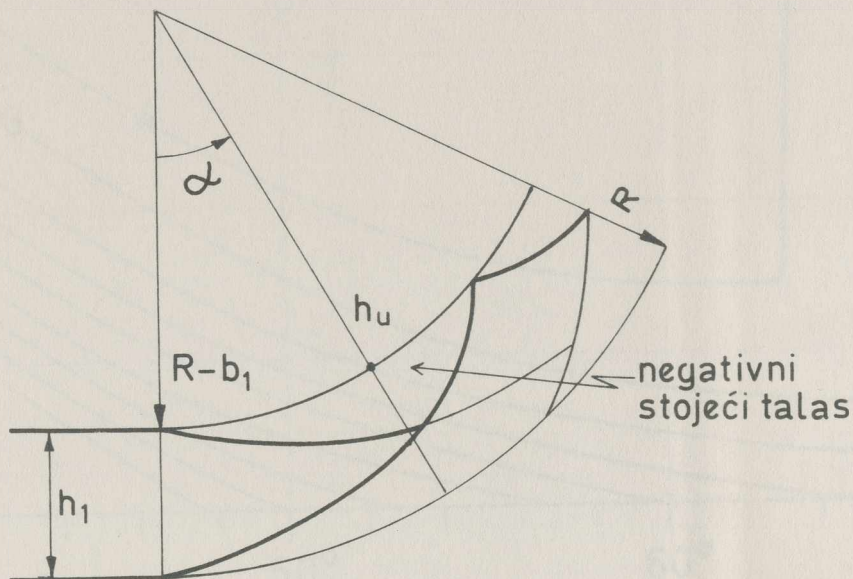
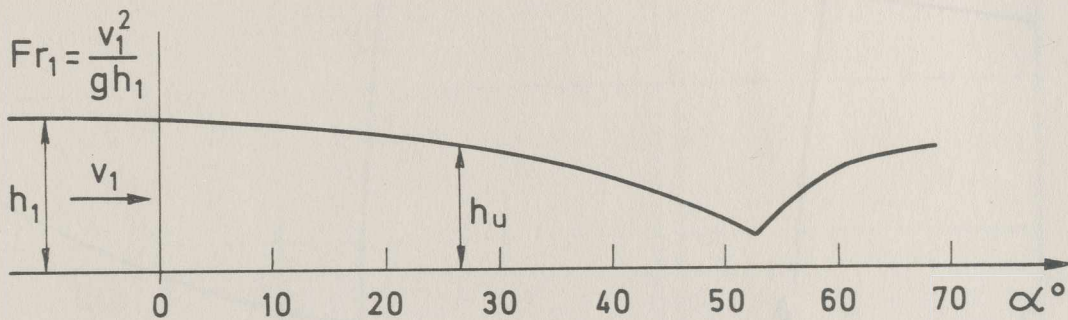
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$

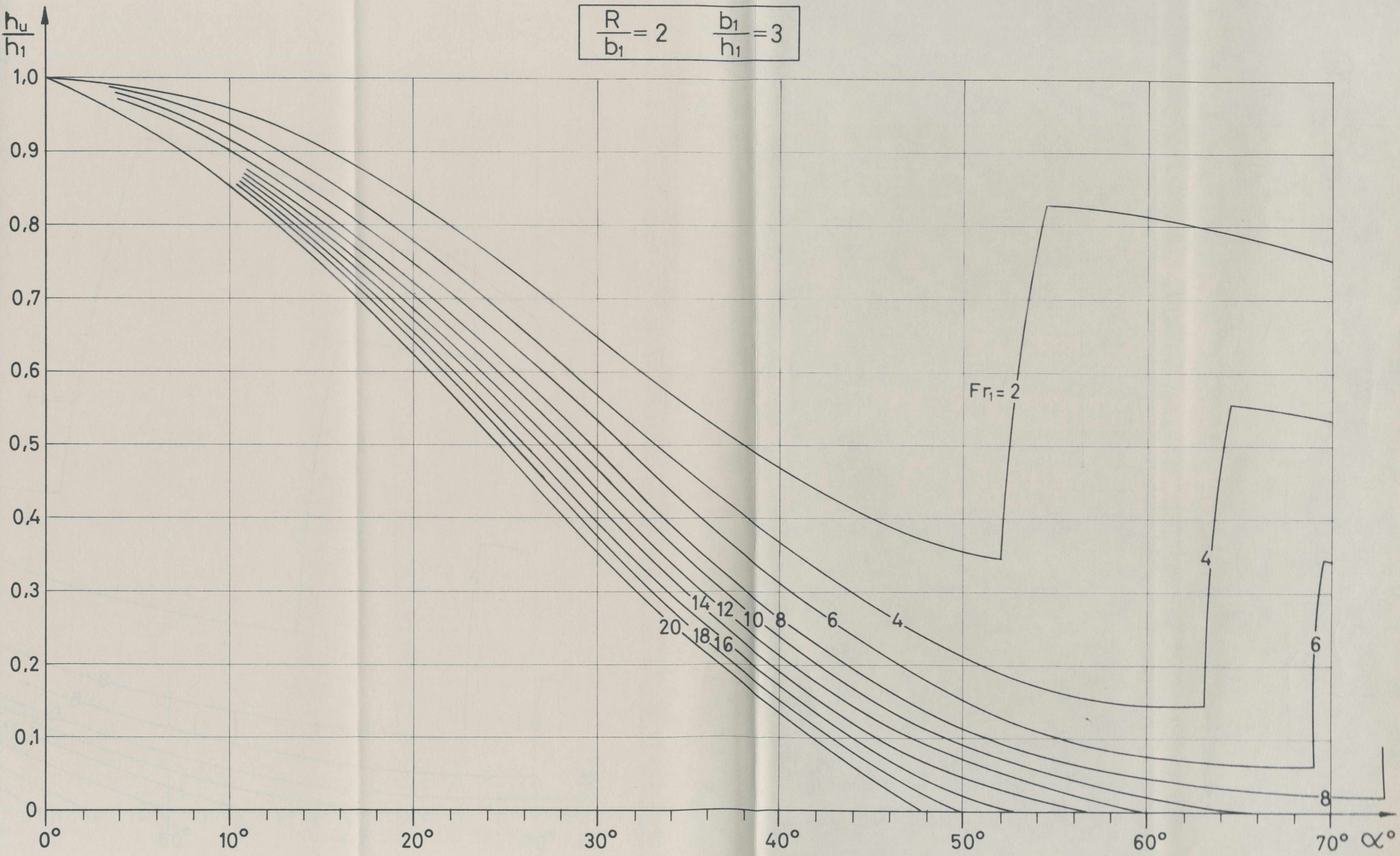


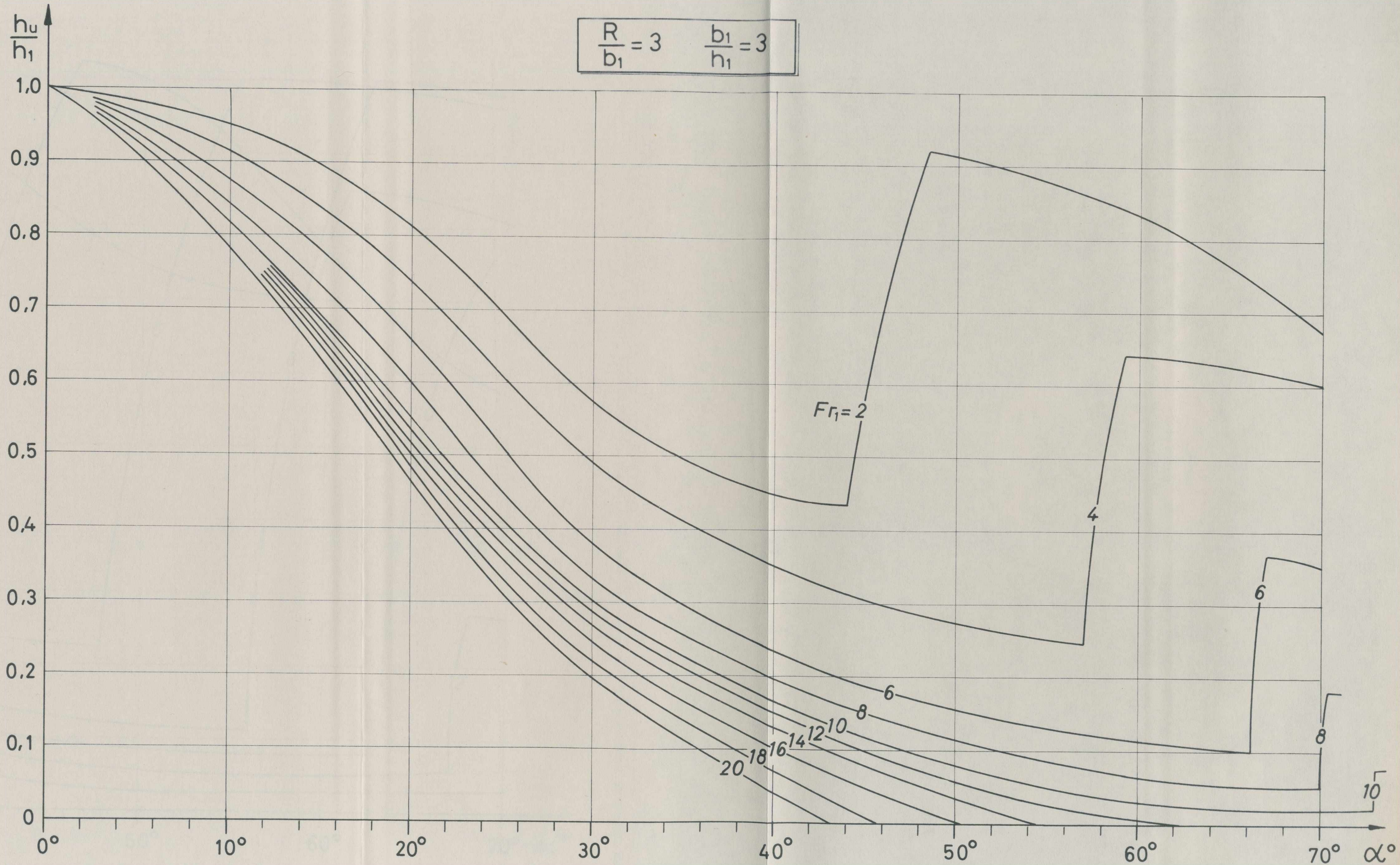
SPISAK PRILOGA KOJI GRAFIČKI
PRIKAZUJU FUNKCIJU

$$\frac{h_u}{h_1} = \frac{h_u}{h_1} (Fr_1, \frac{b_1}{h_1}, \frac{R}{b_1}, \alpha) \dots \dots \dots (12)$$

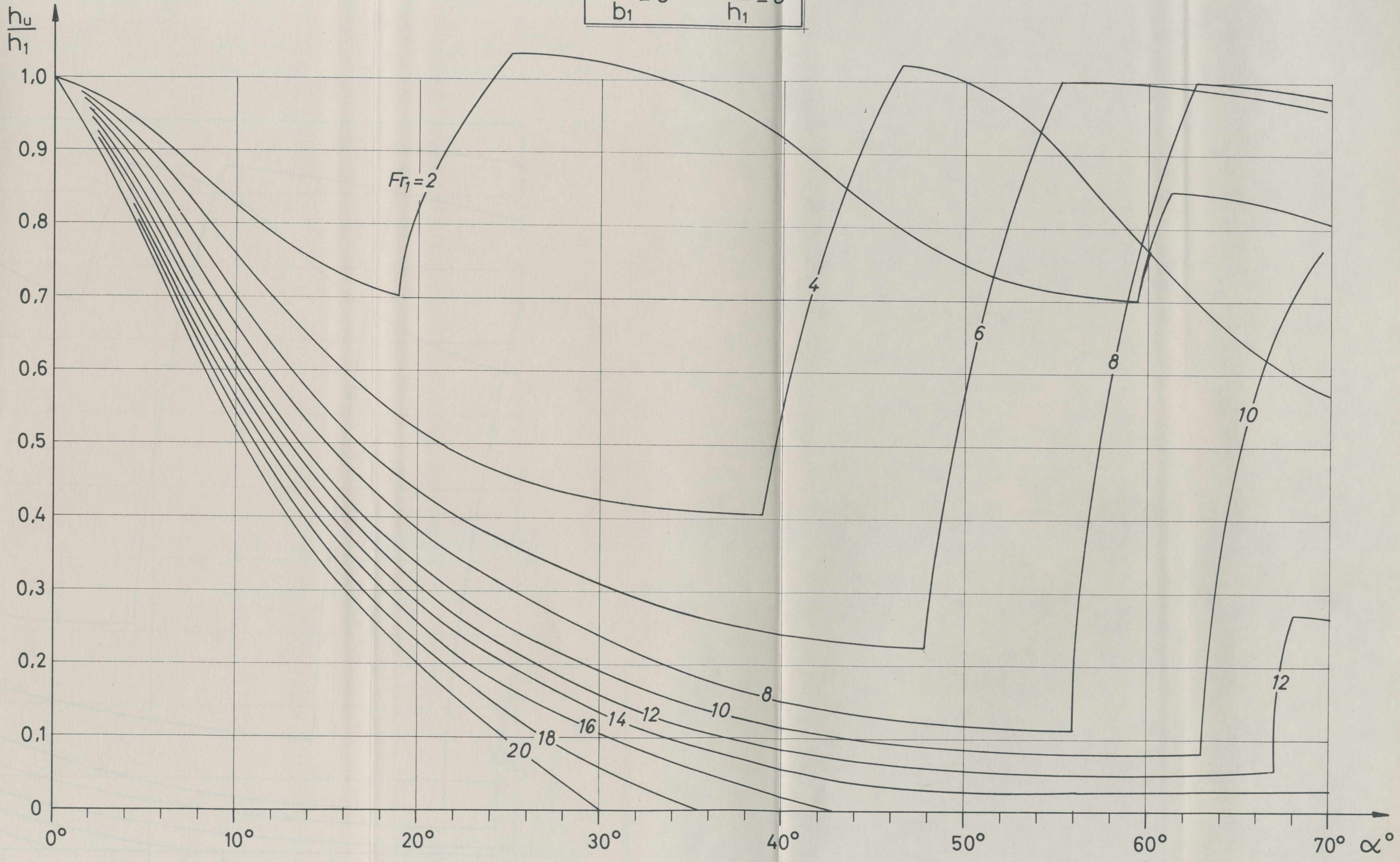
$\frac{b_1}{h_1} \backslash \frac{R}{b_1}$		2	3	4	5
		3	3-1	3-2	3-3
4	3-5	3-6	3-7	3-8	
5	3-9	3-10	3-11	3-12	
6	3-13	3-14	3-15	3-16	

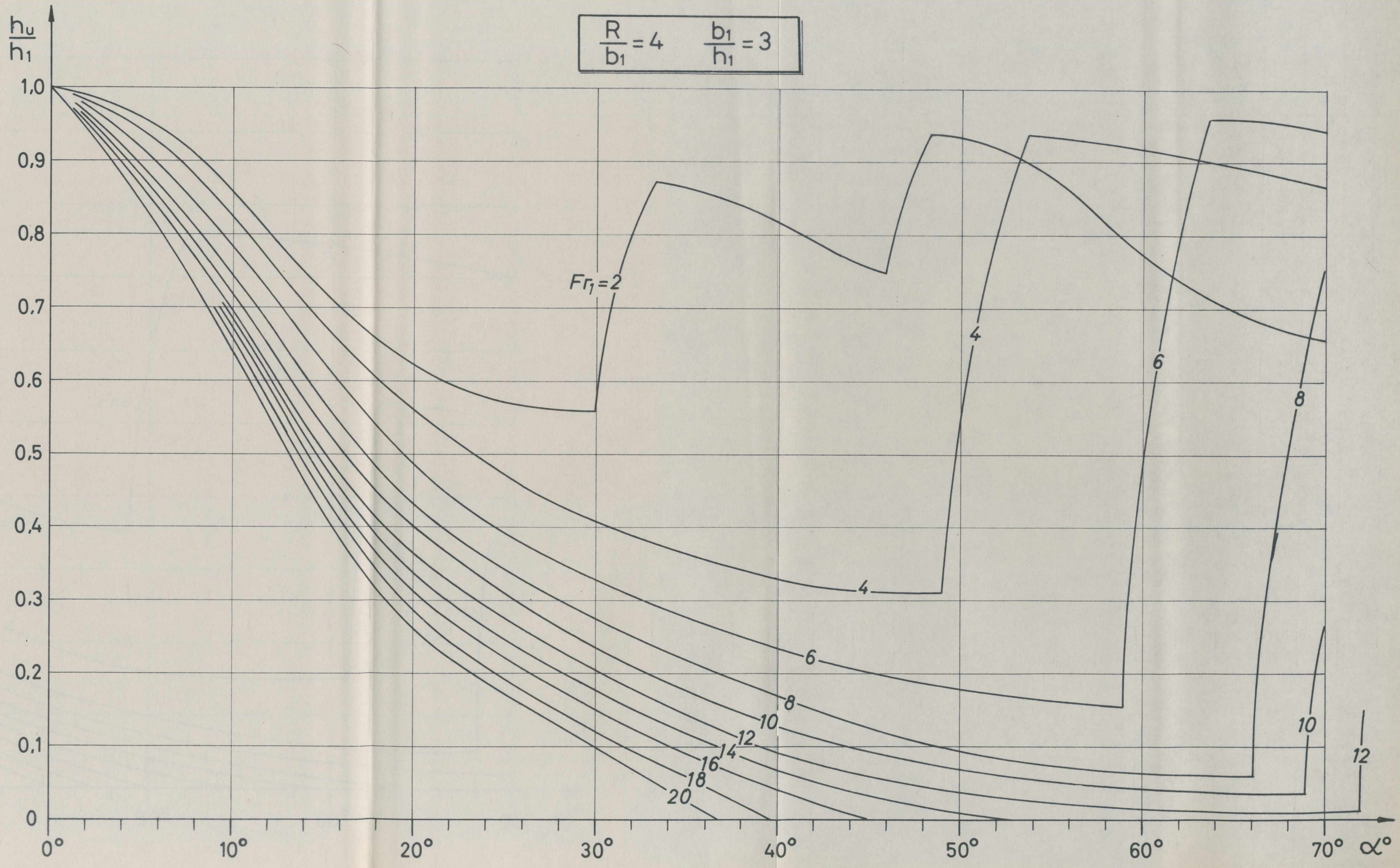




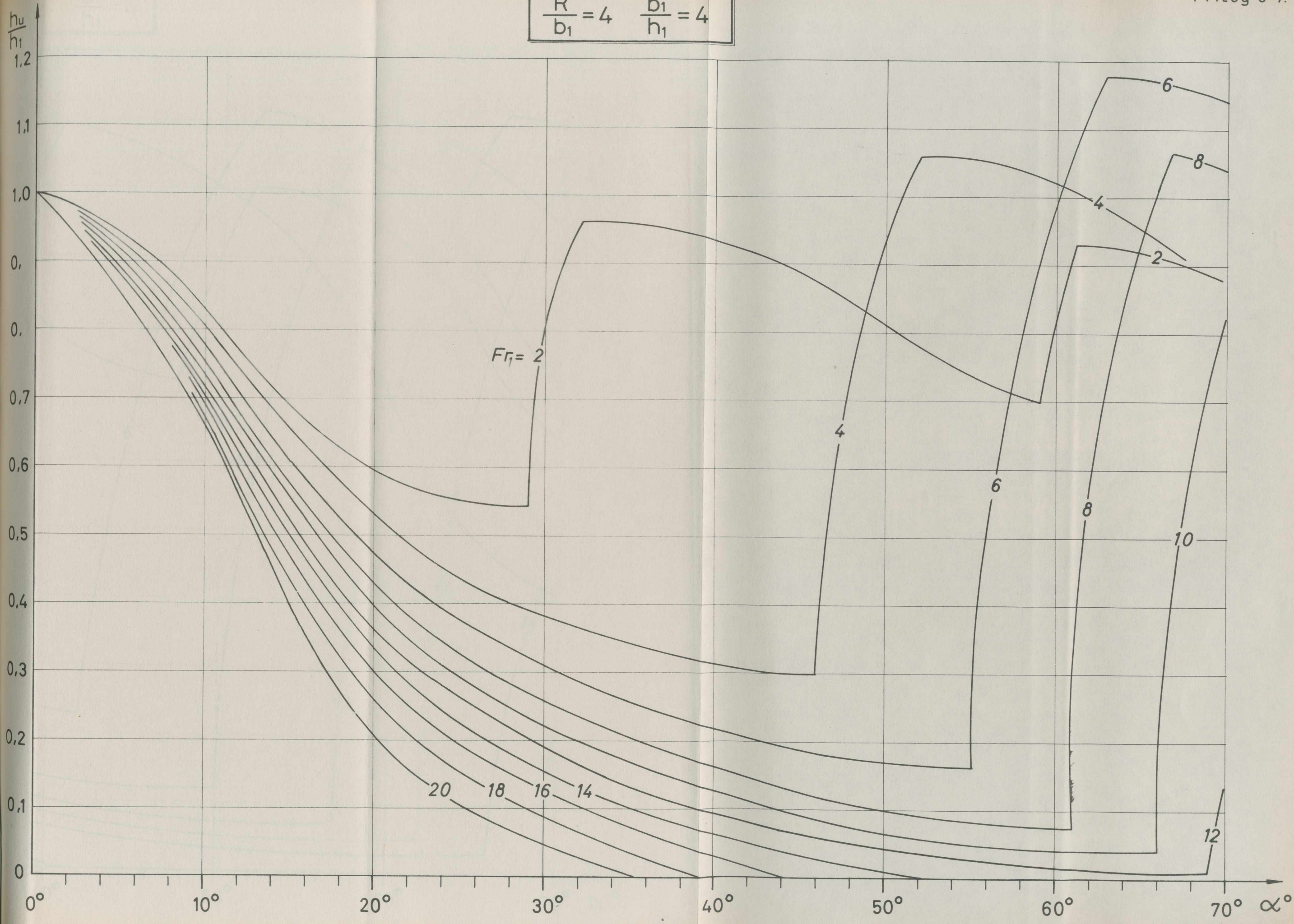


$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$

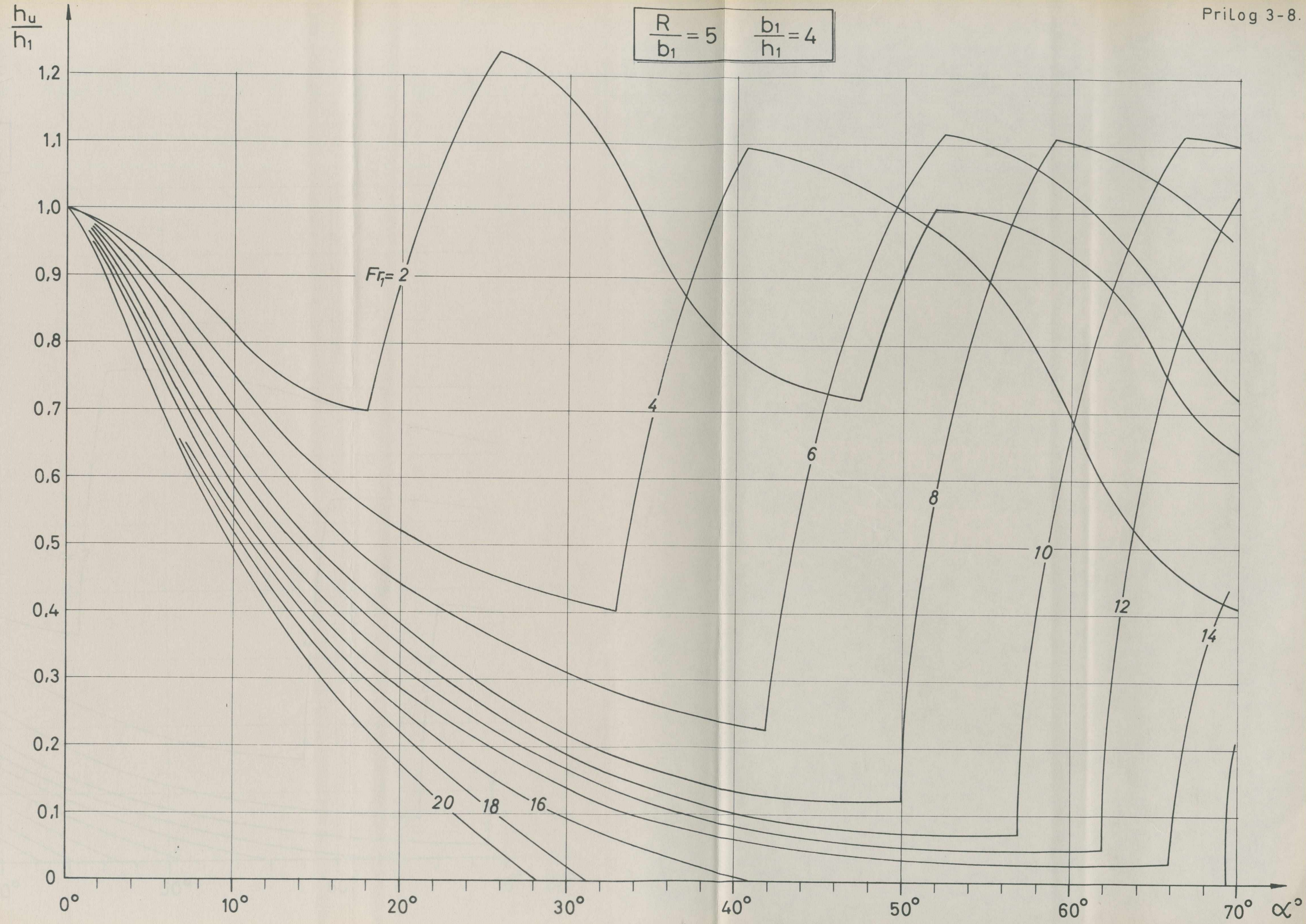


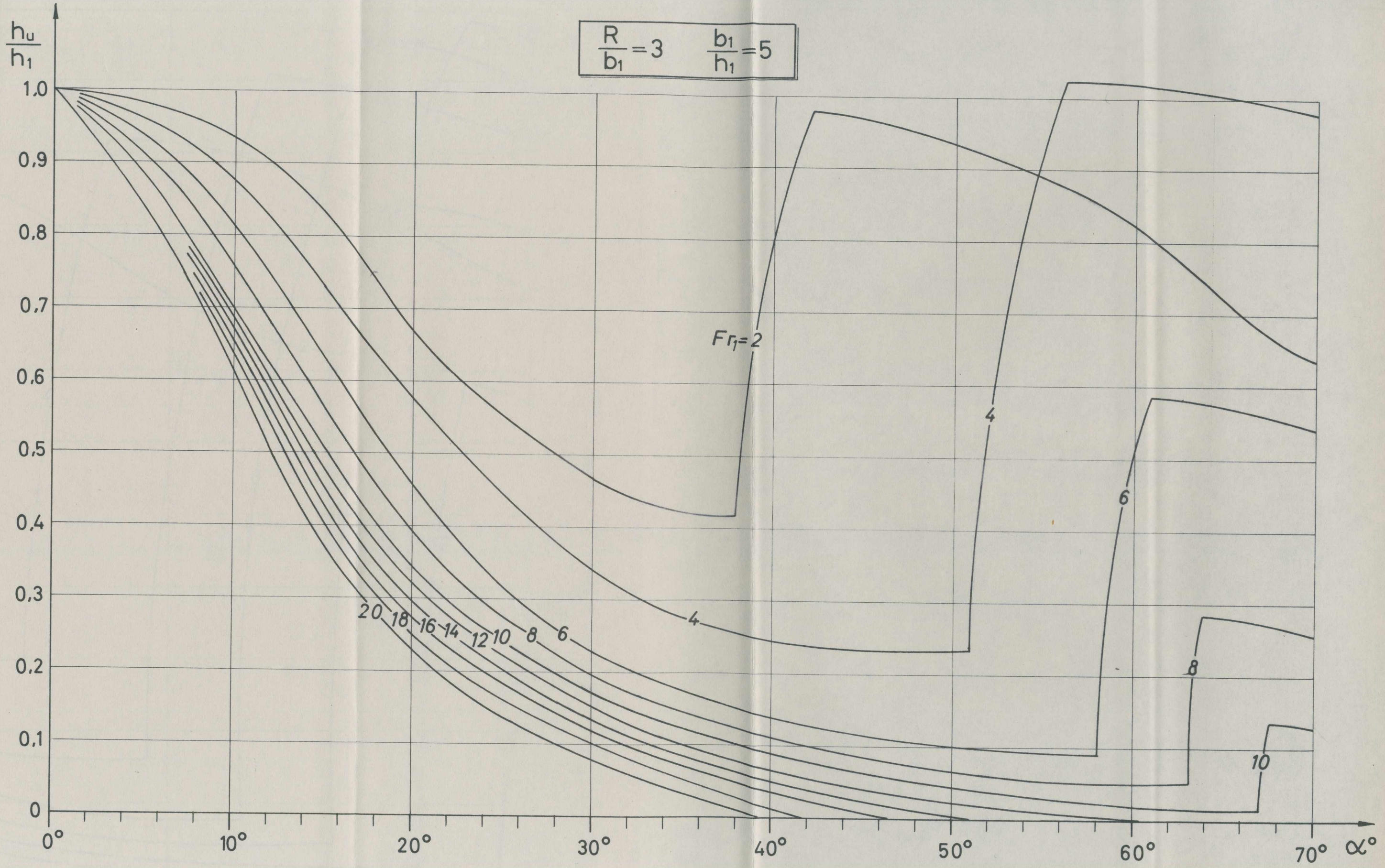


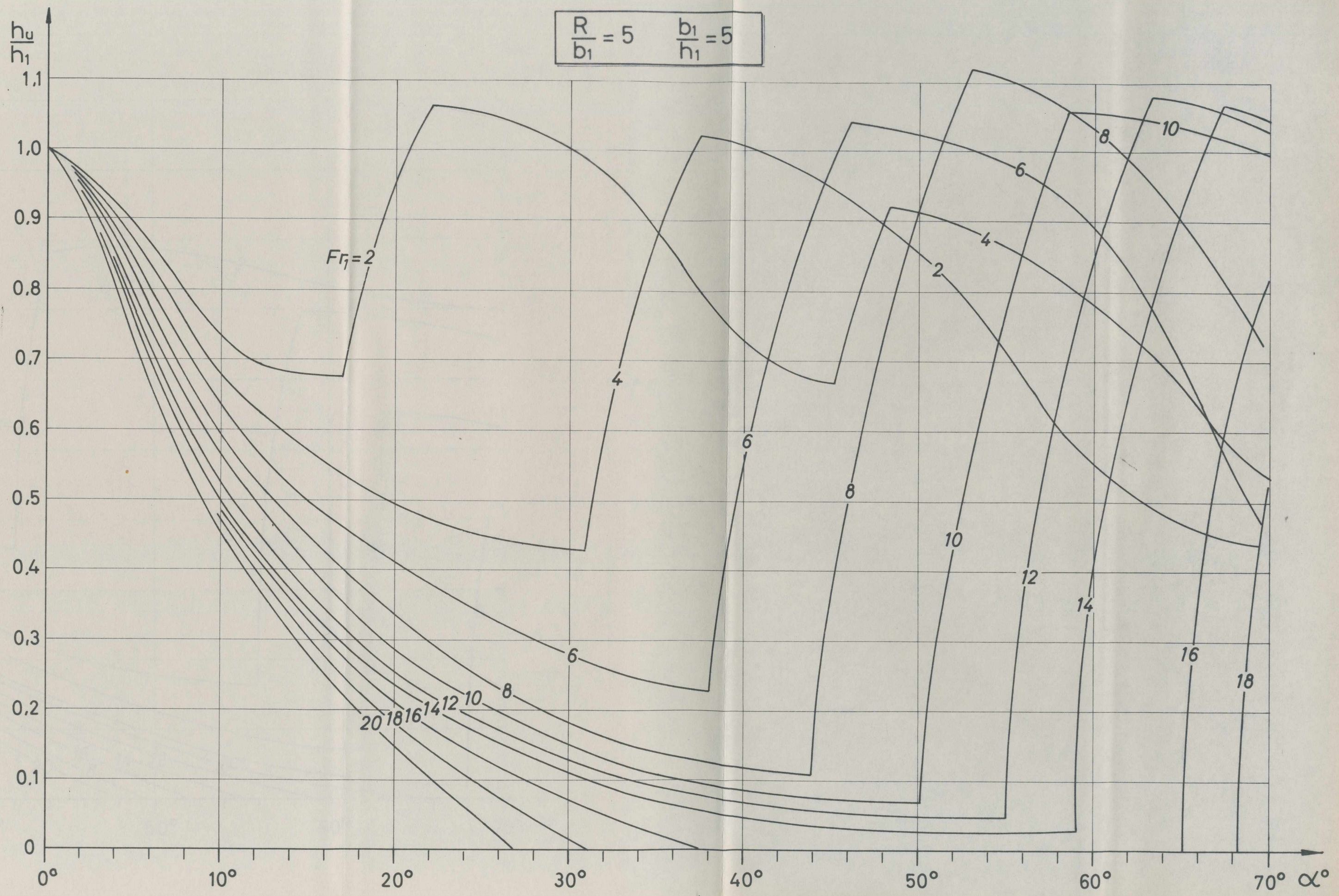
$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



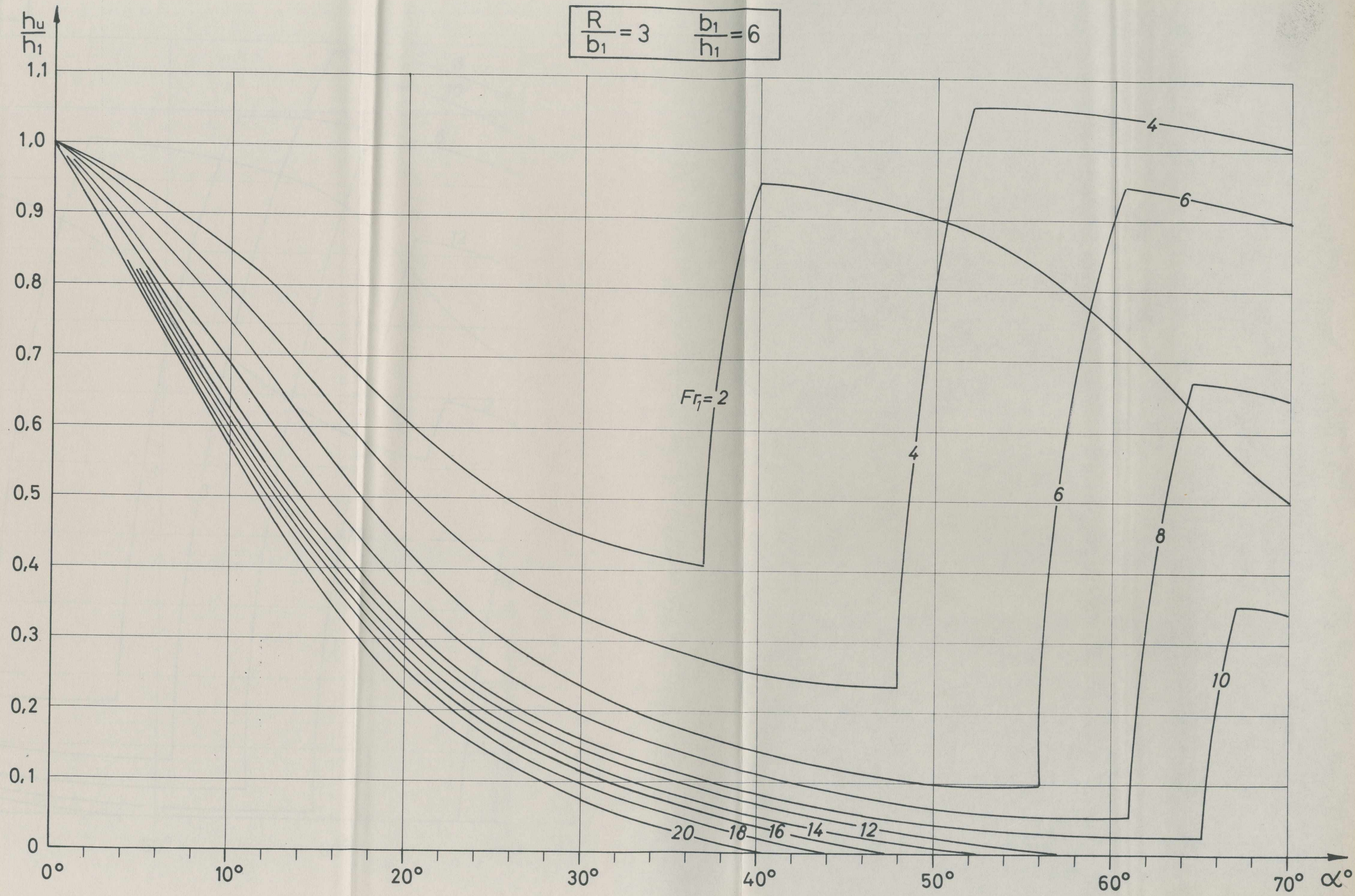
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



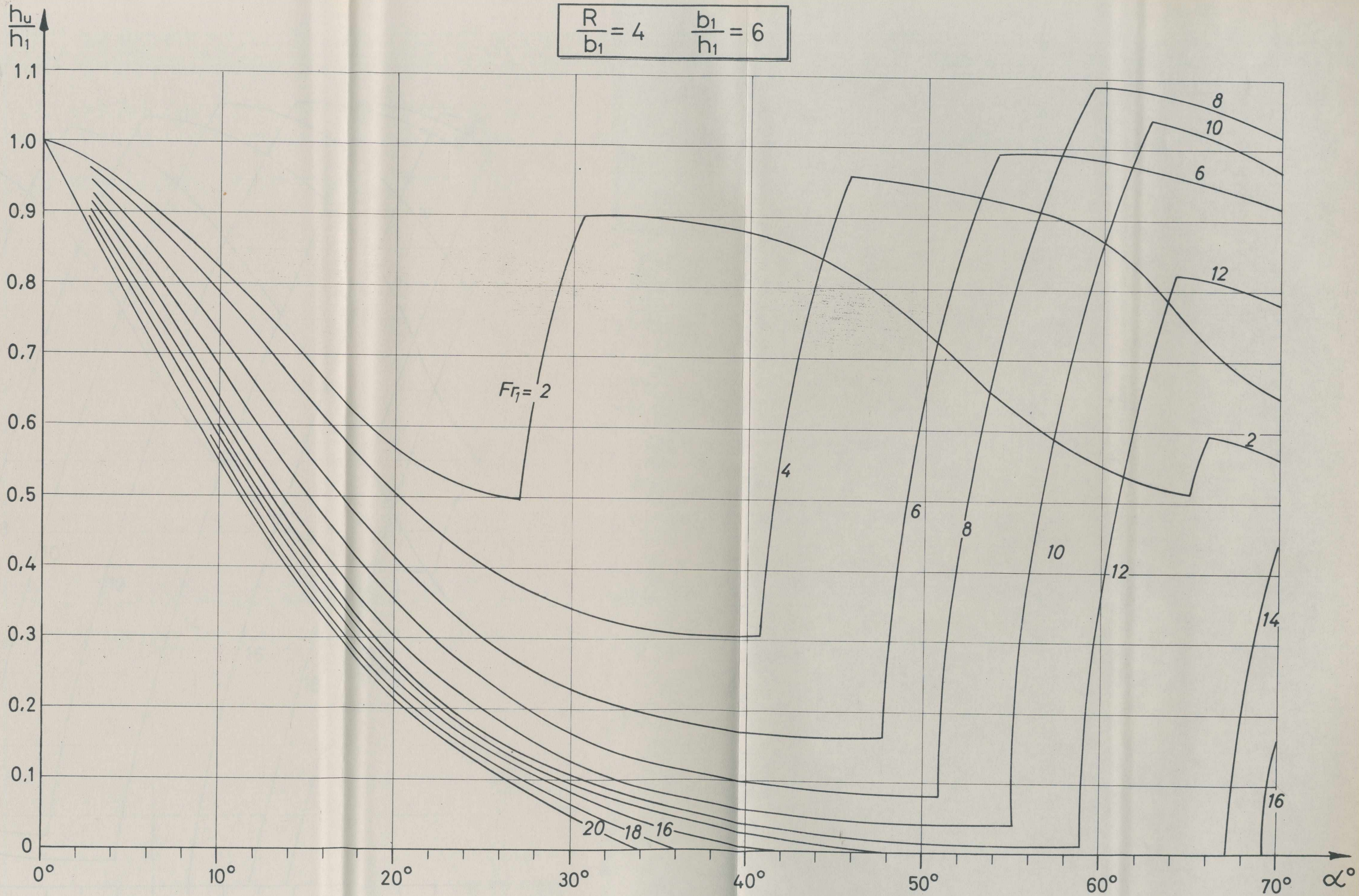




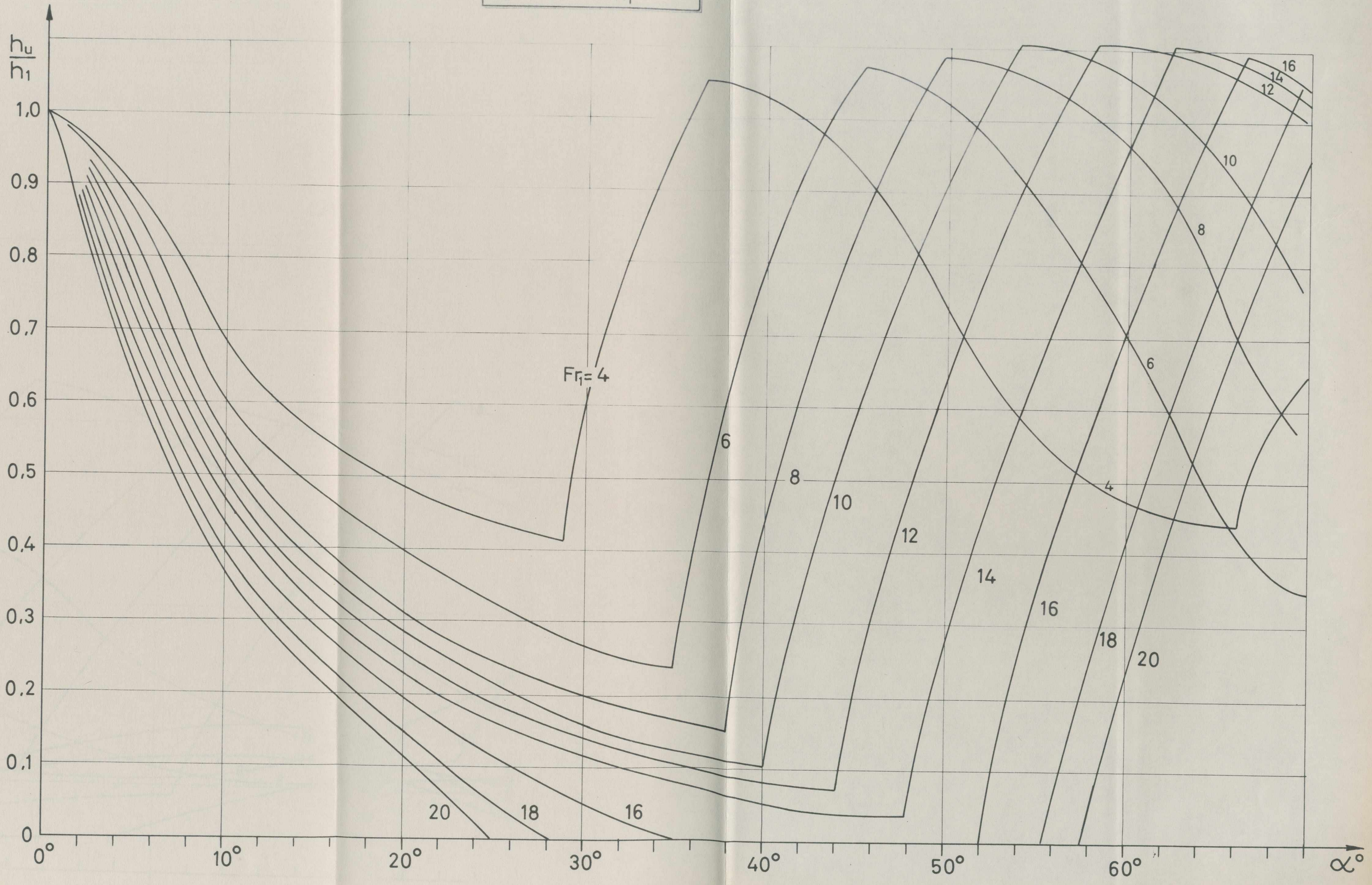
$$\frac{R}{b_1} = 3 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$

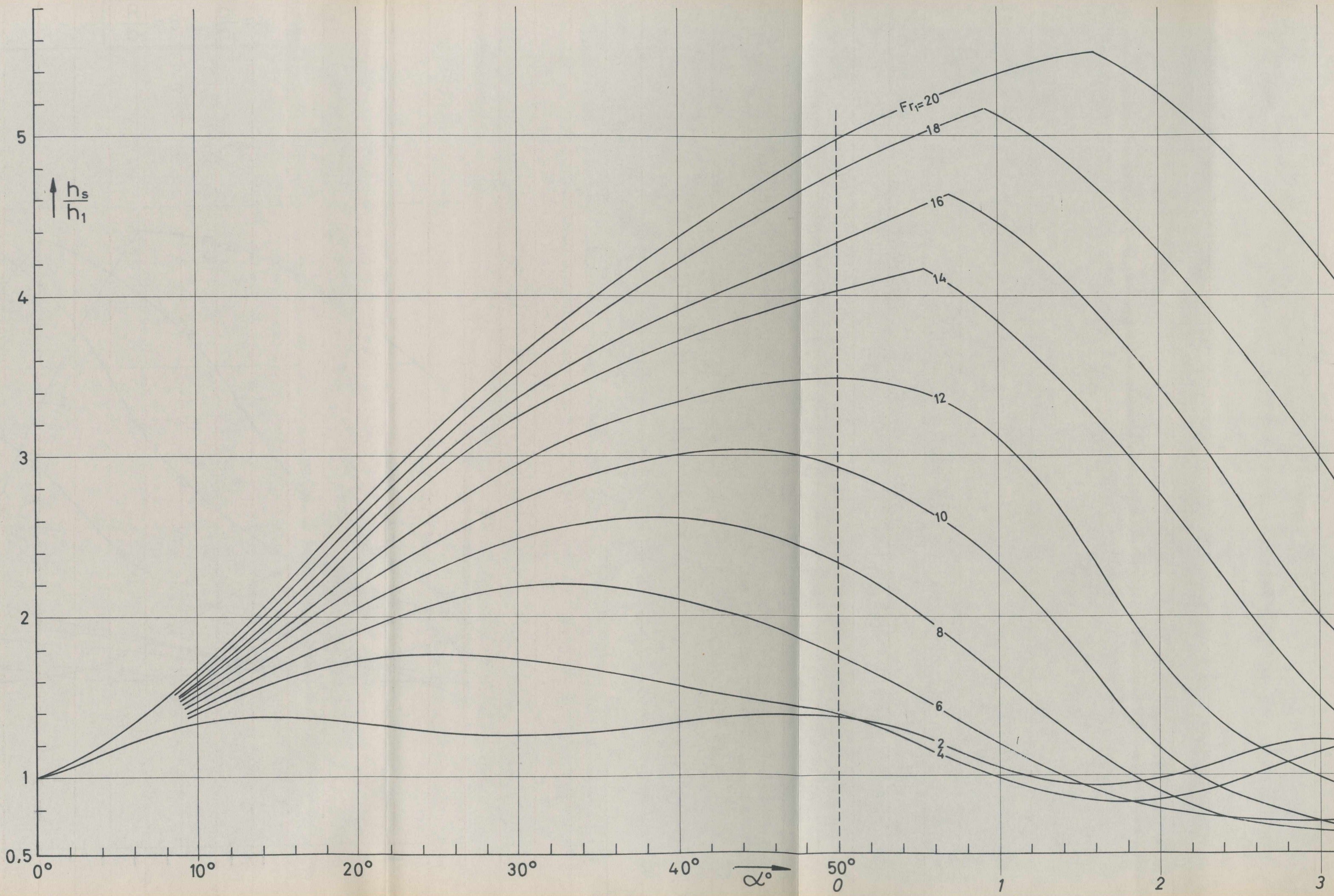


$$\frac{R}{b_1} = 4 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$

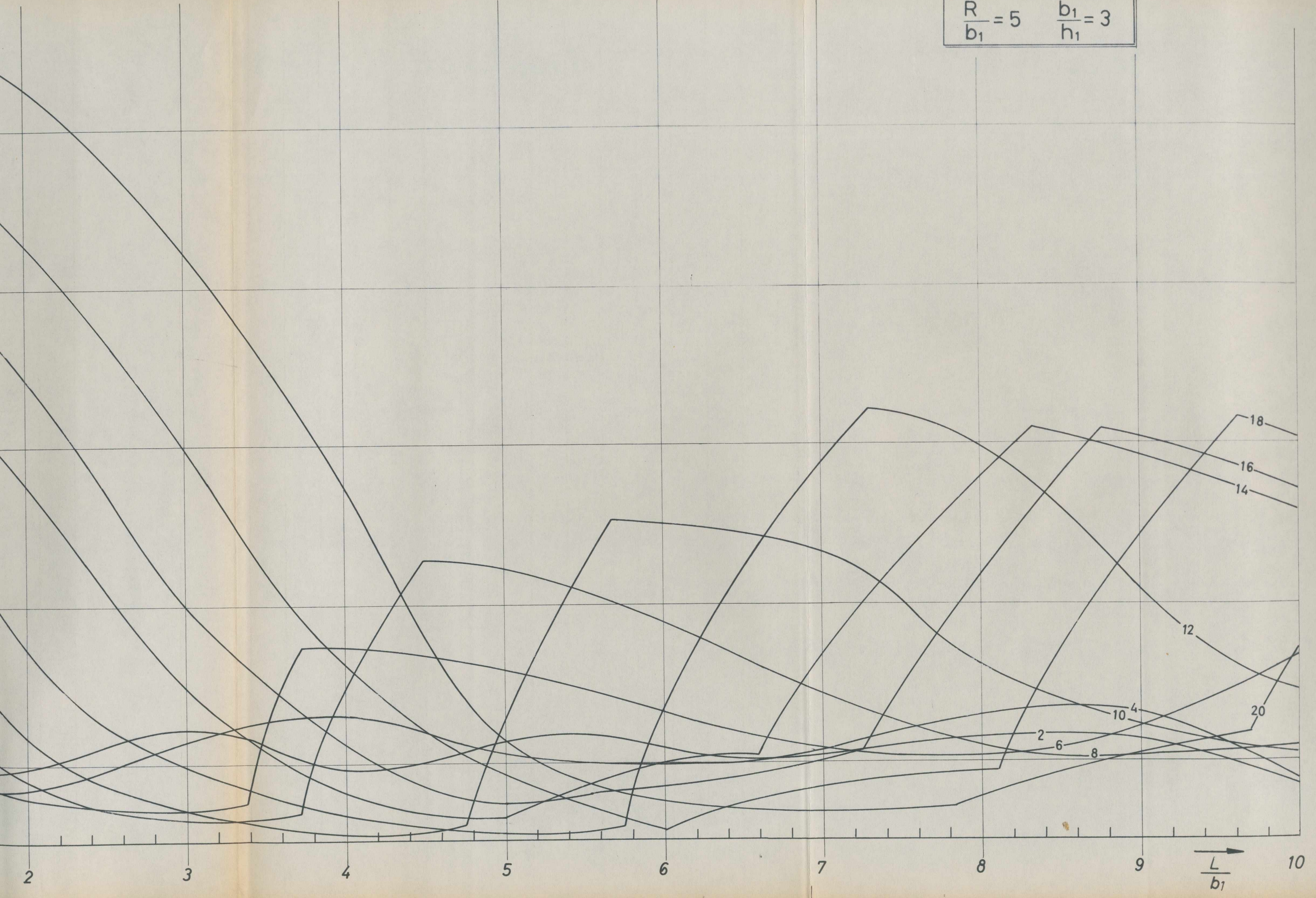


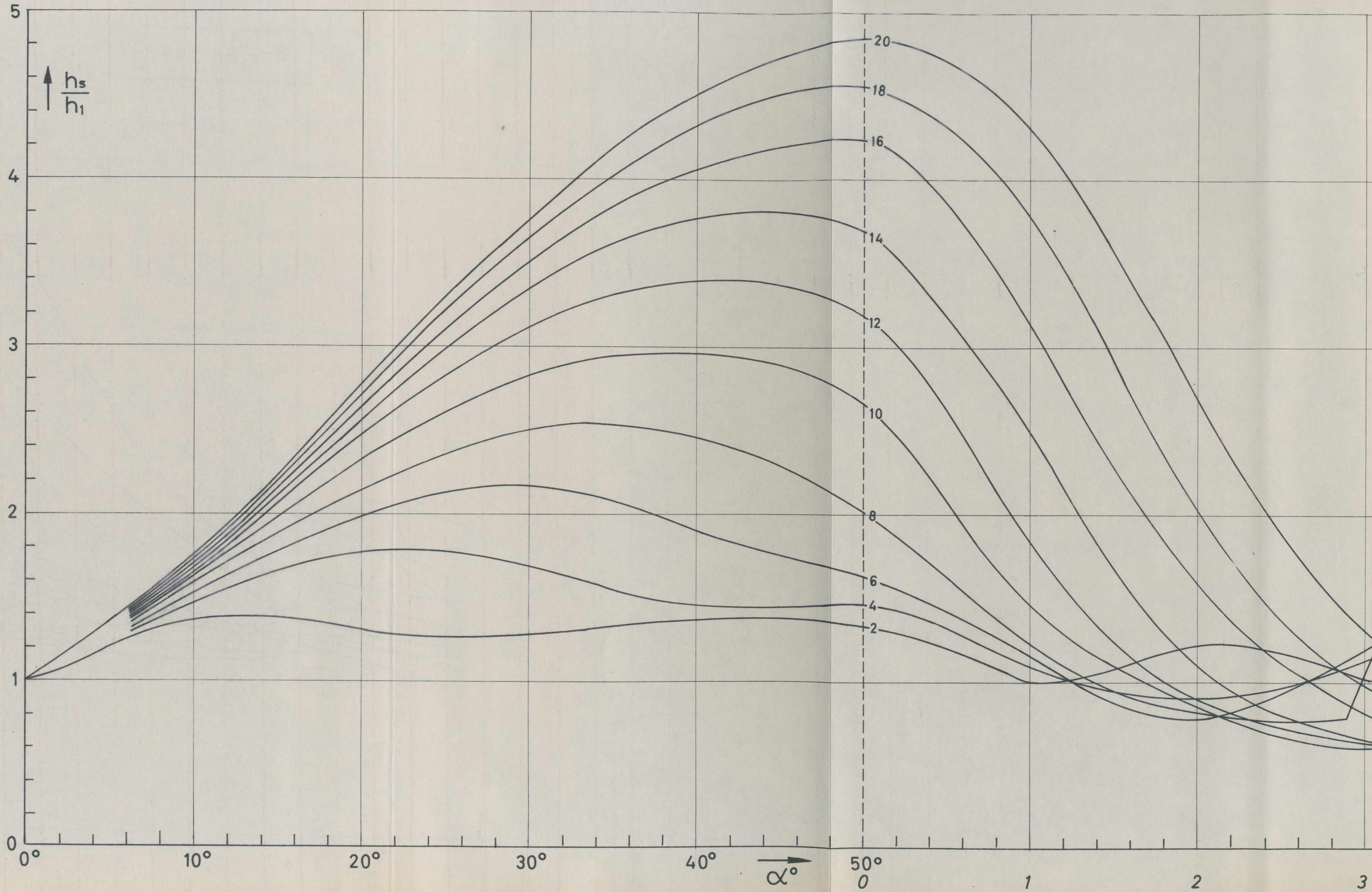
$$\frac{R}{b} = 5 \quad \frac{b}{h_1} = 6$$



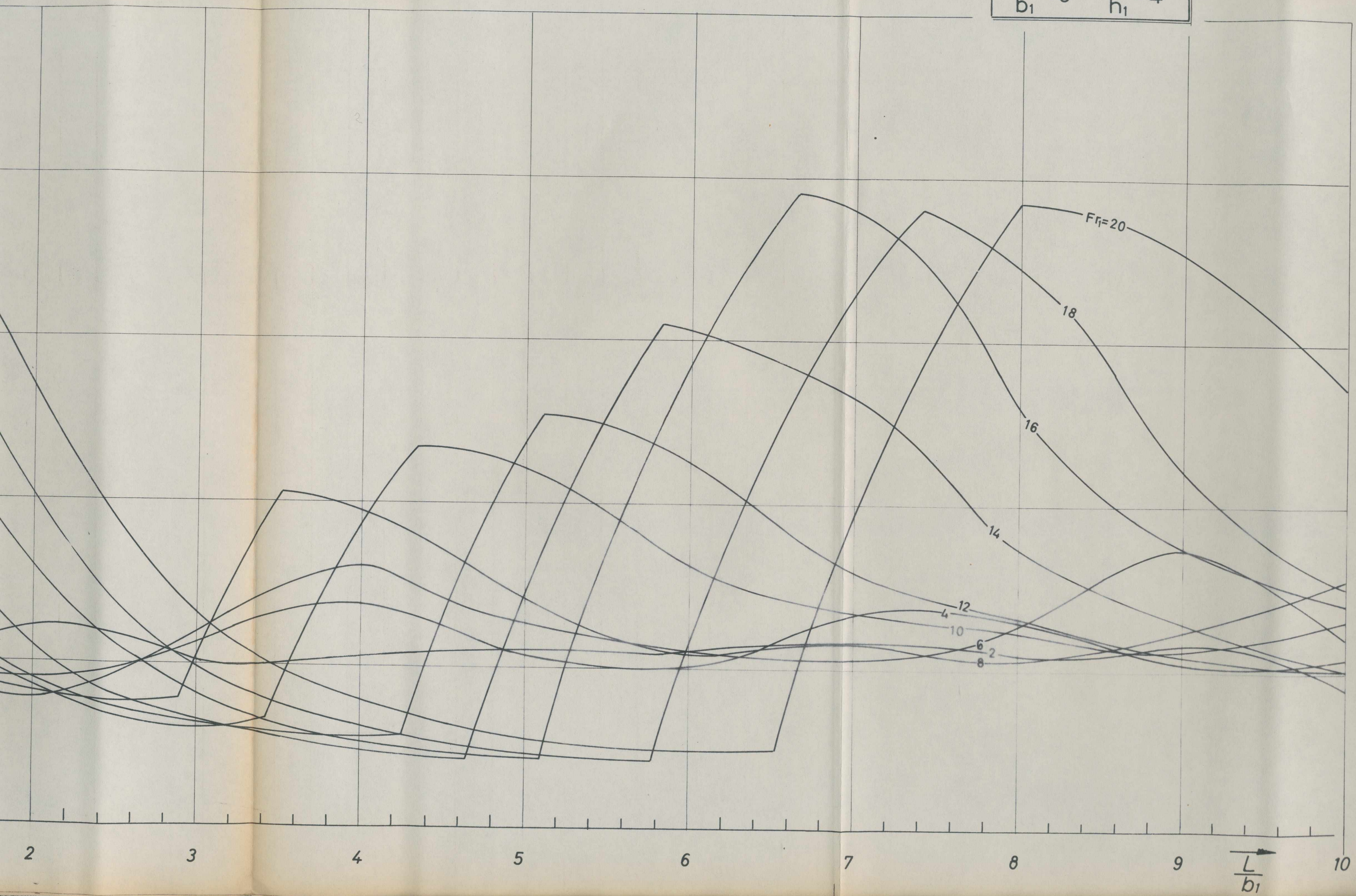


$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 3$$

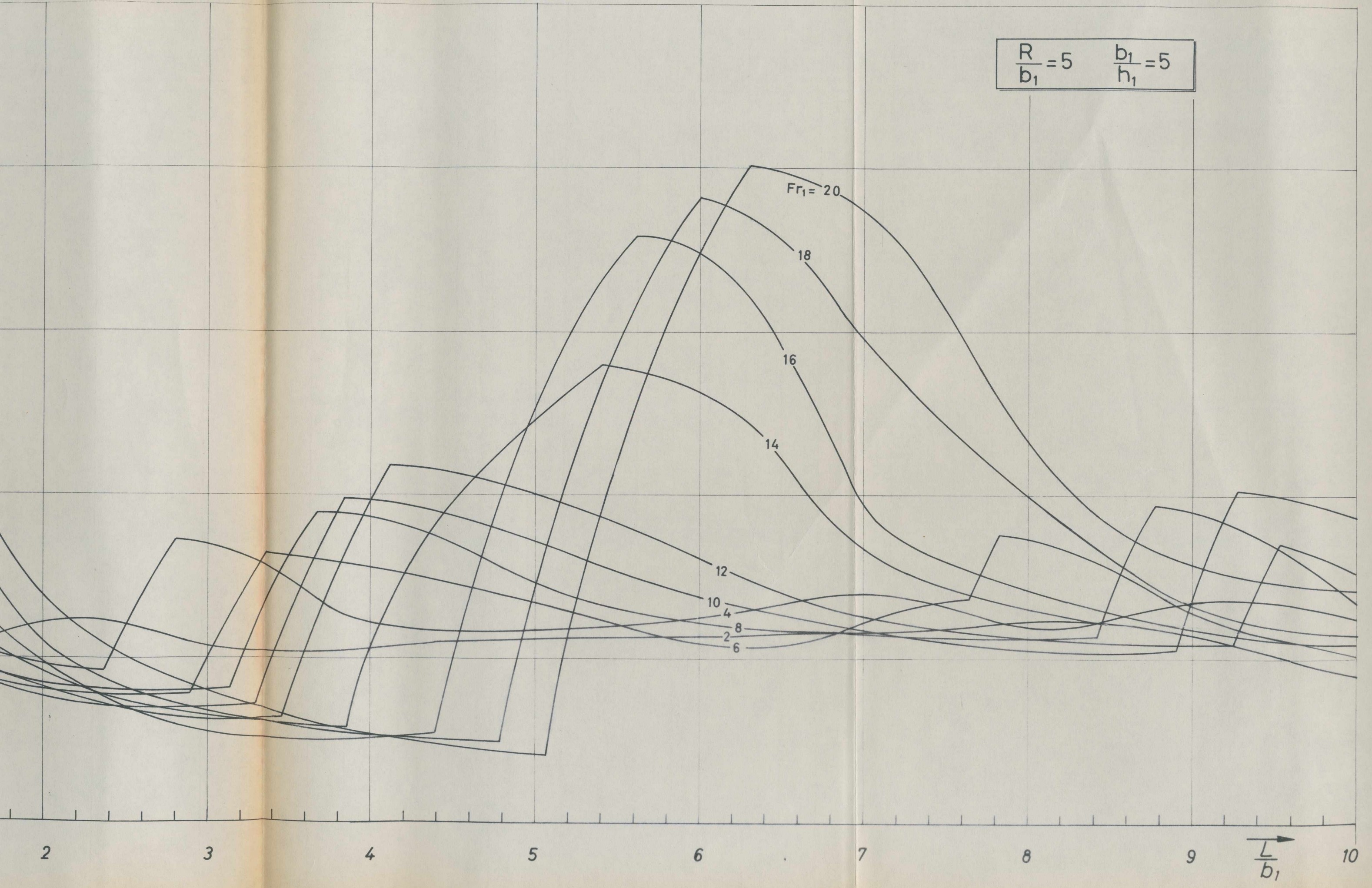


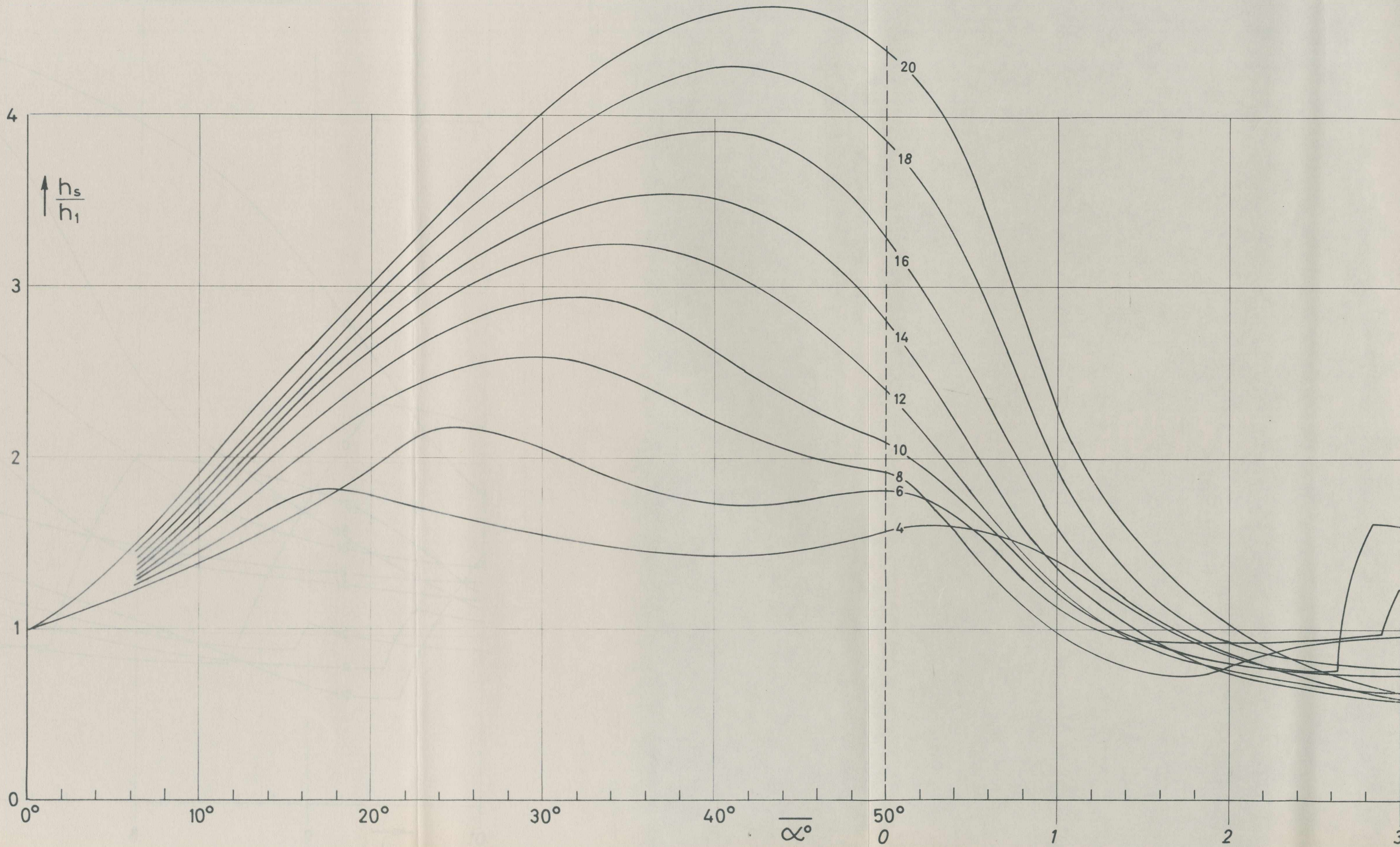


$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$

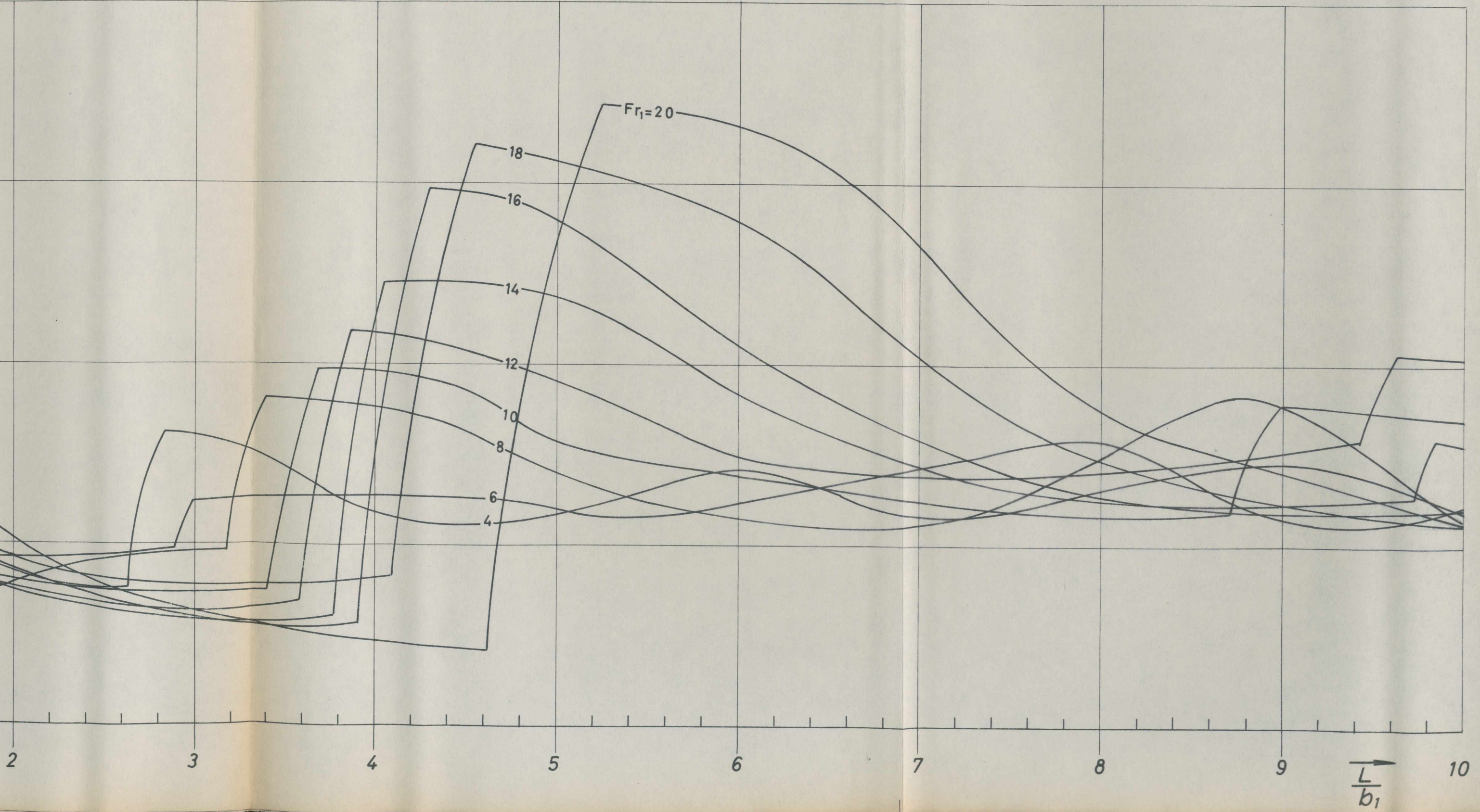


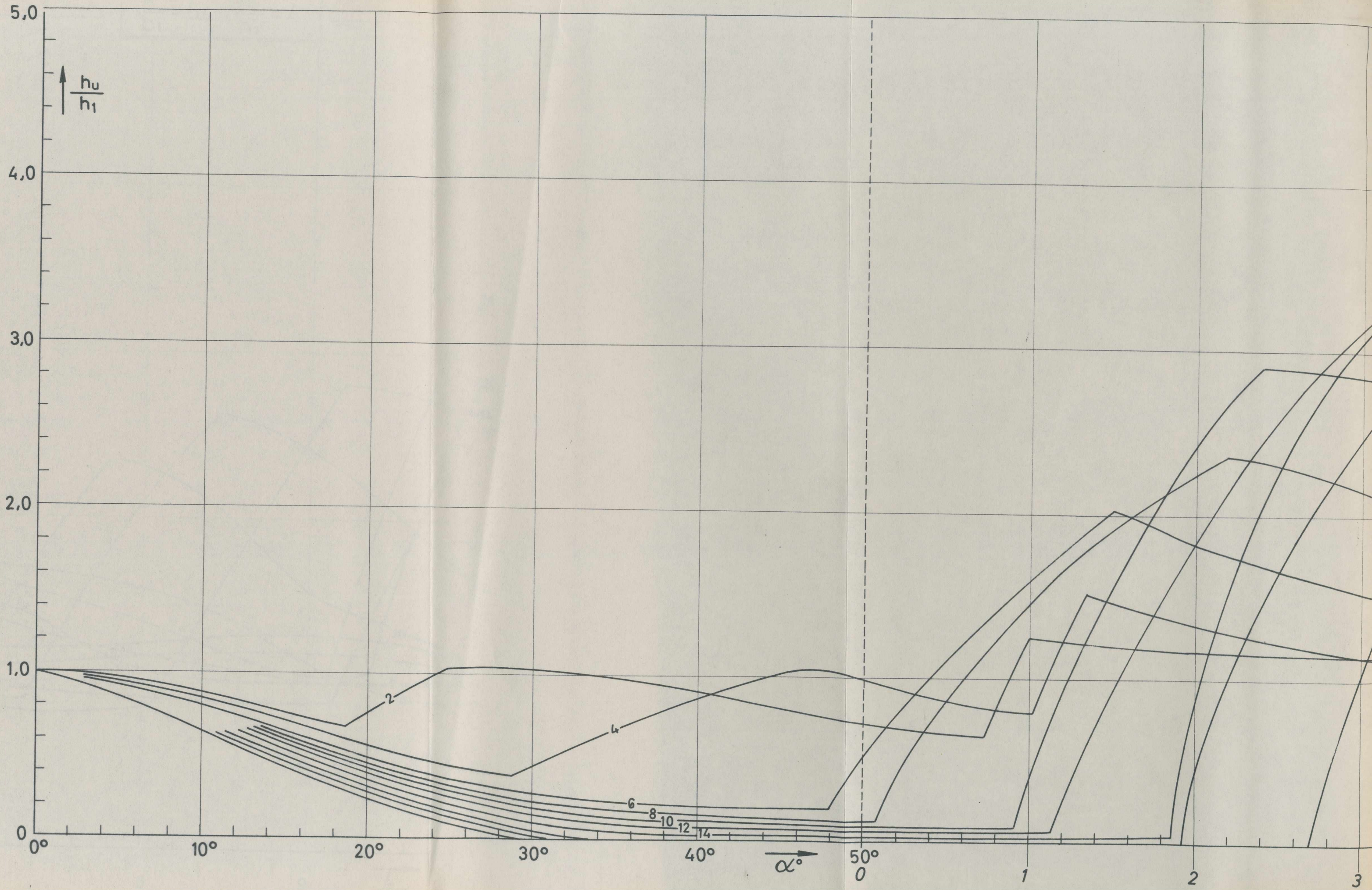
$\frac{R}{b_1} = 5$	$\frac{b_1}{h_1} = 5$
---------------------	-----------------------

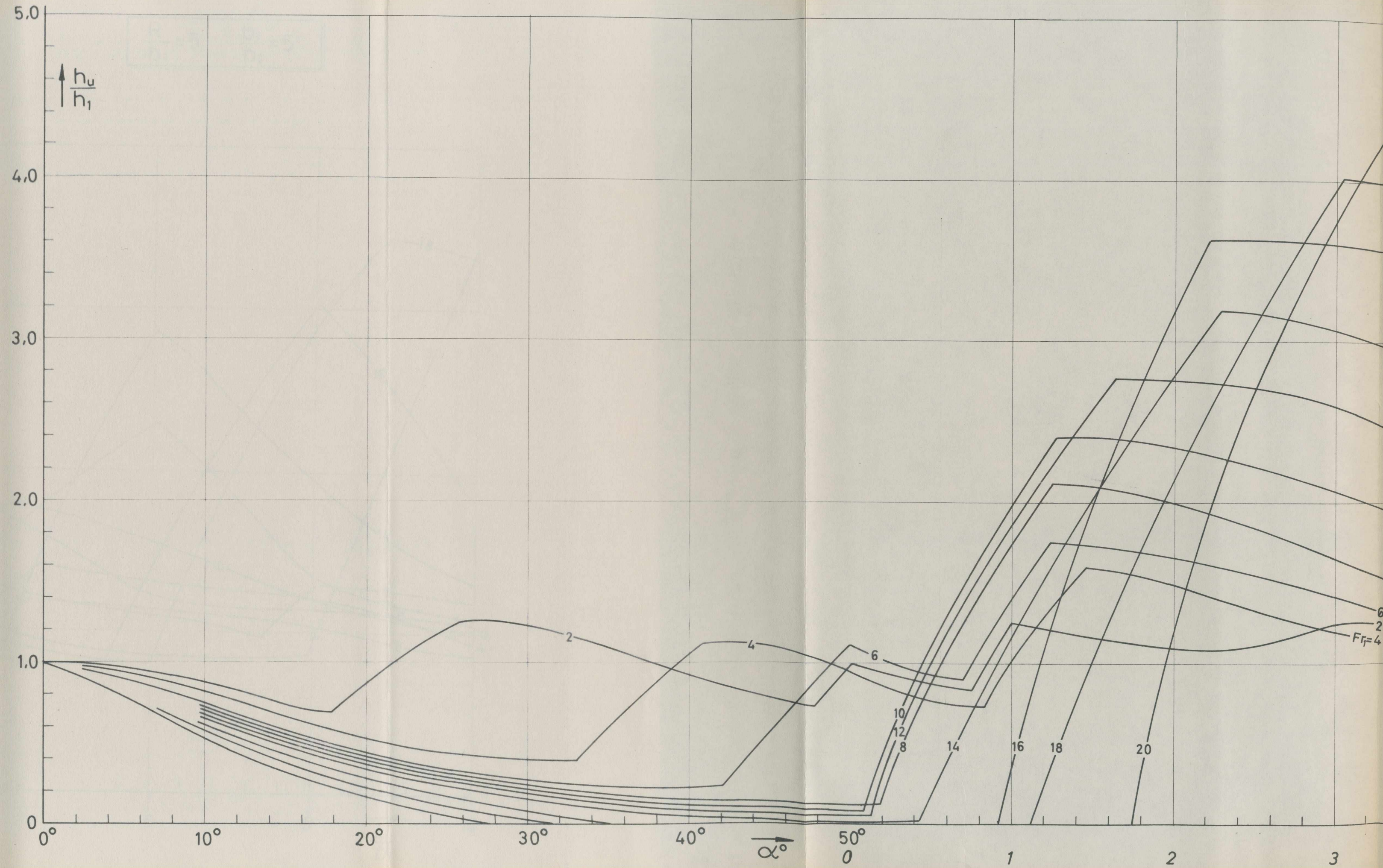




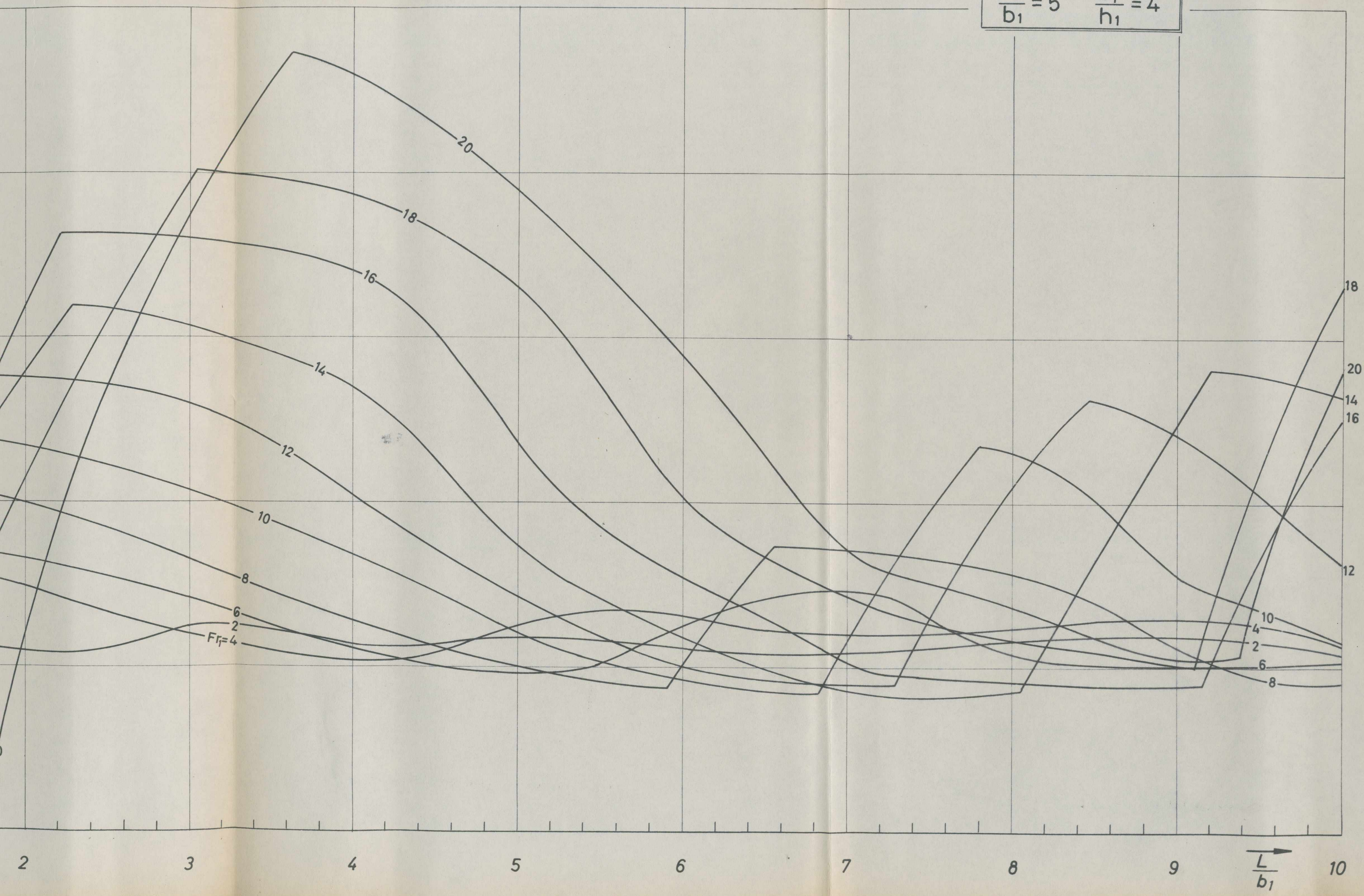
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$

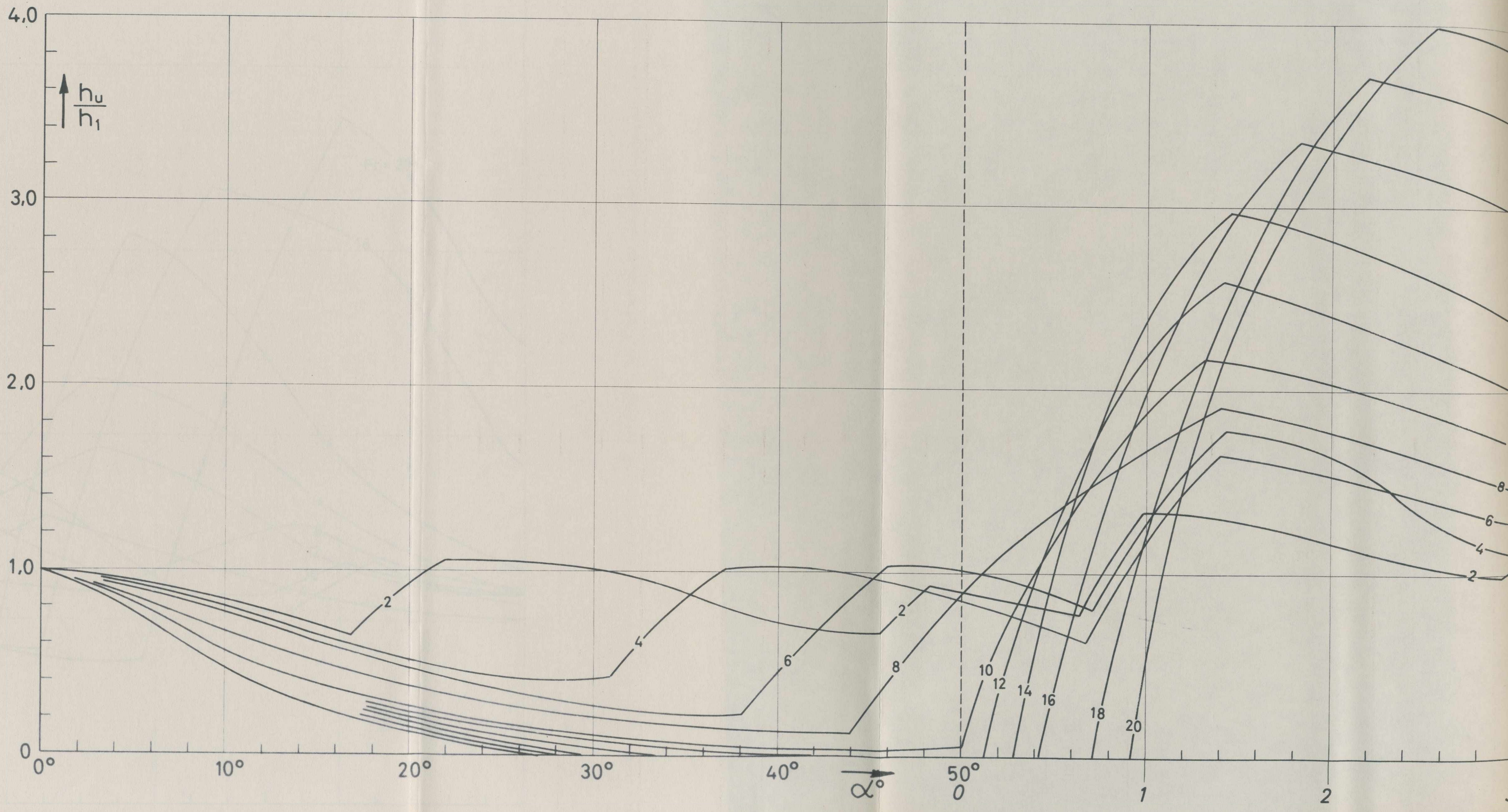




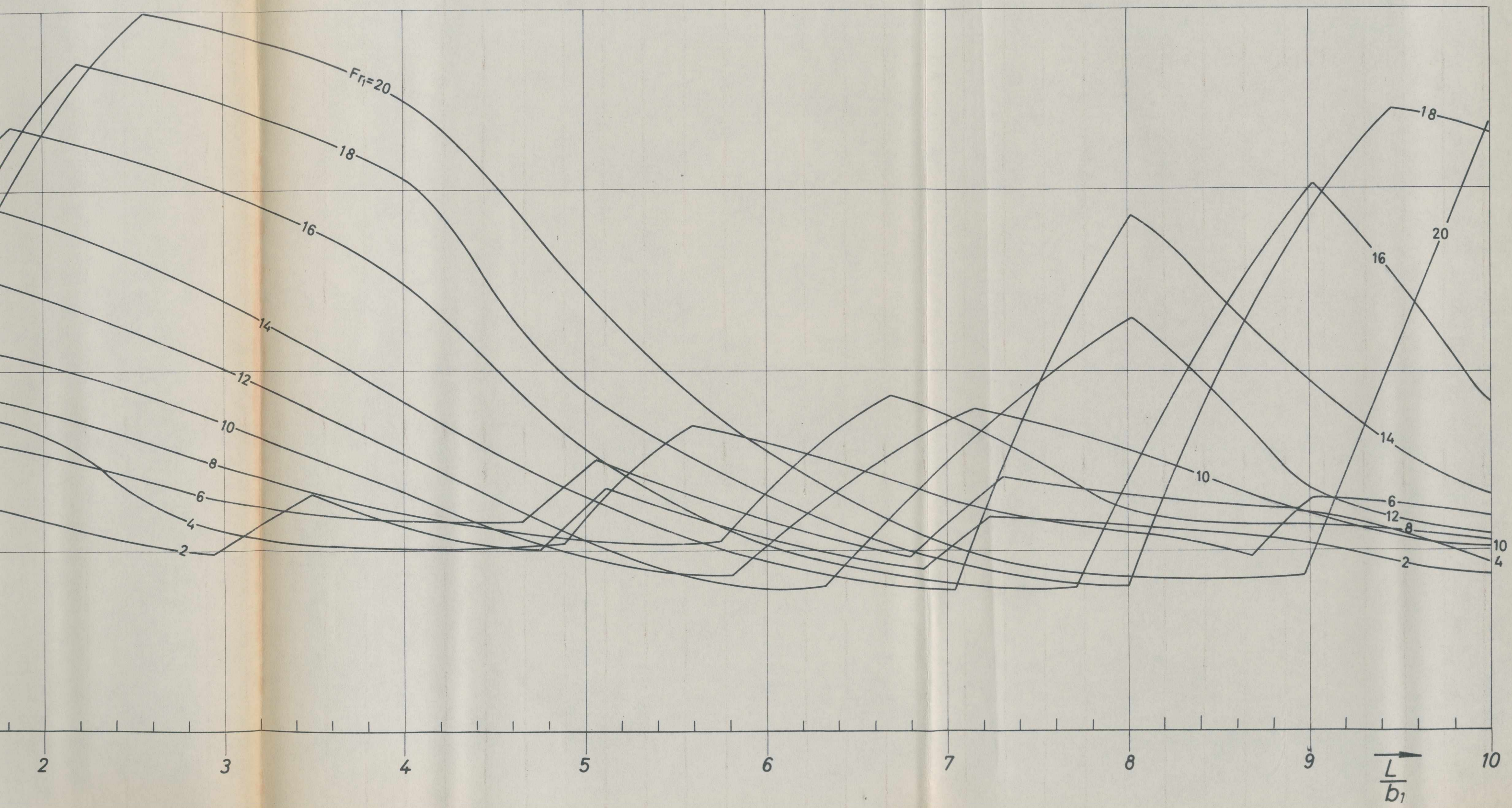


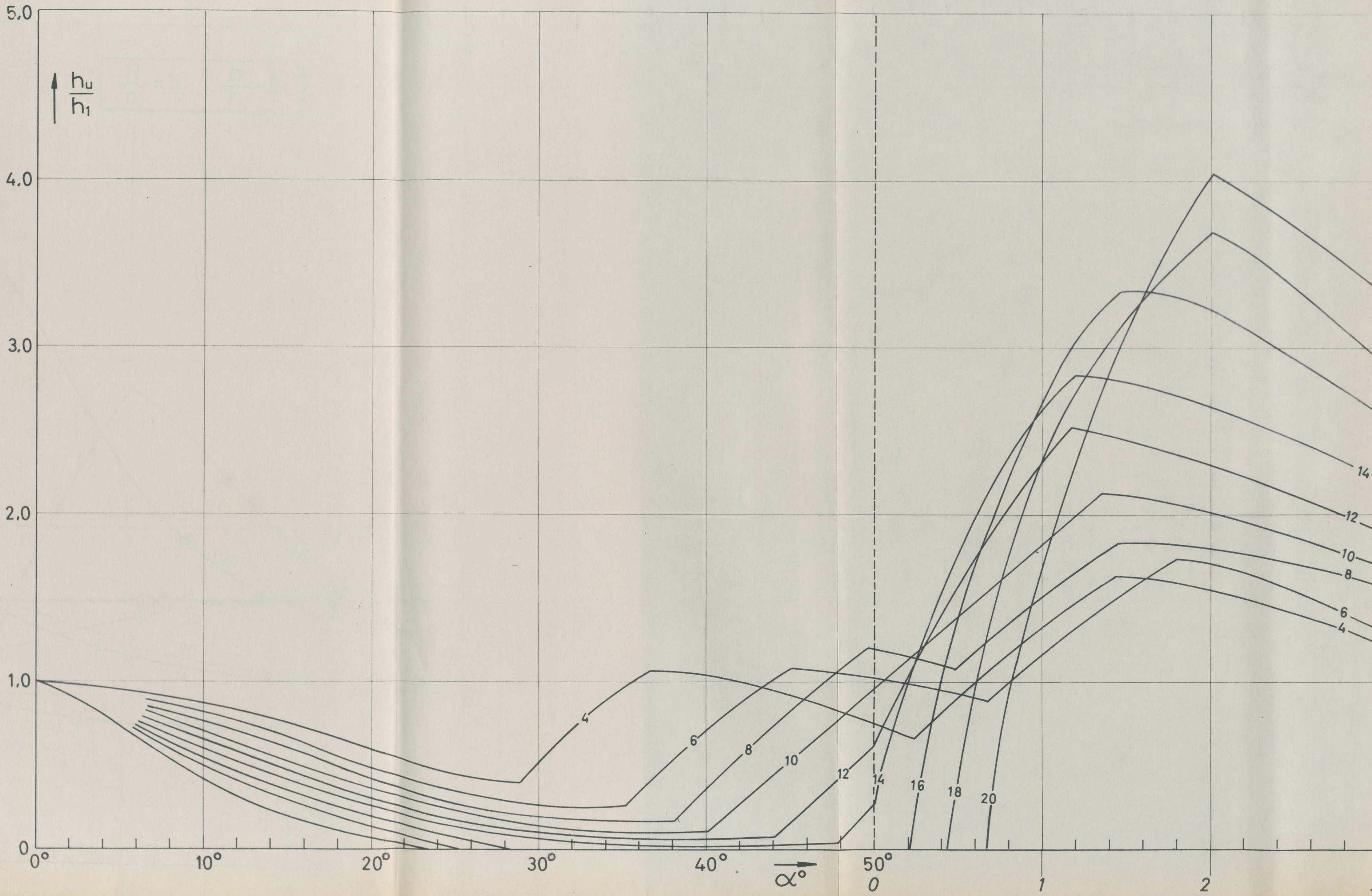
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 4$$



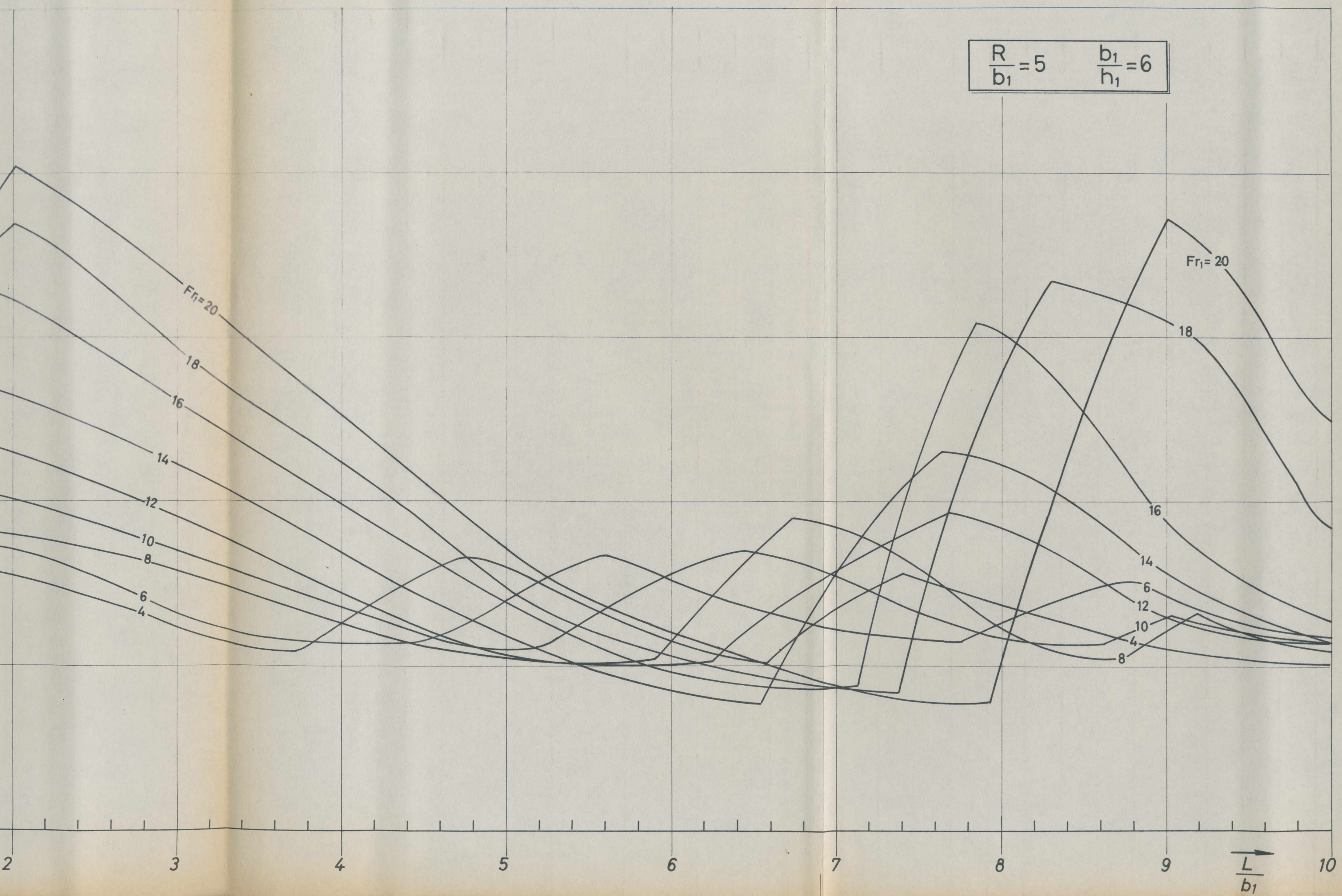


$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$

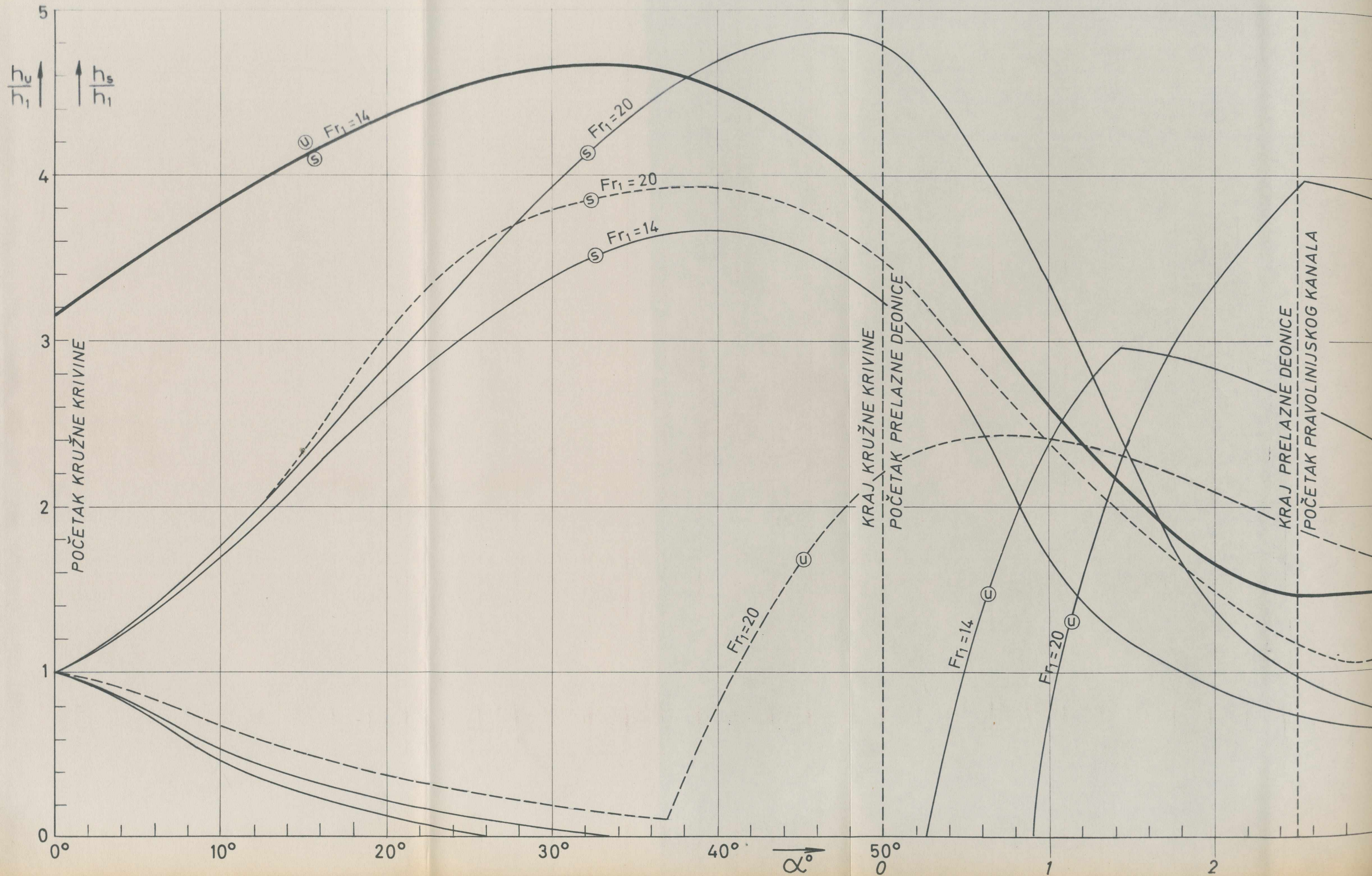




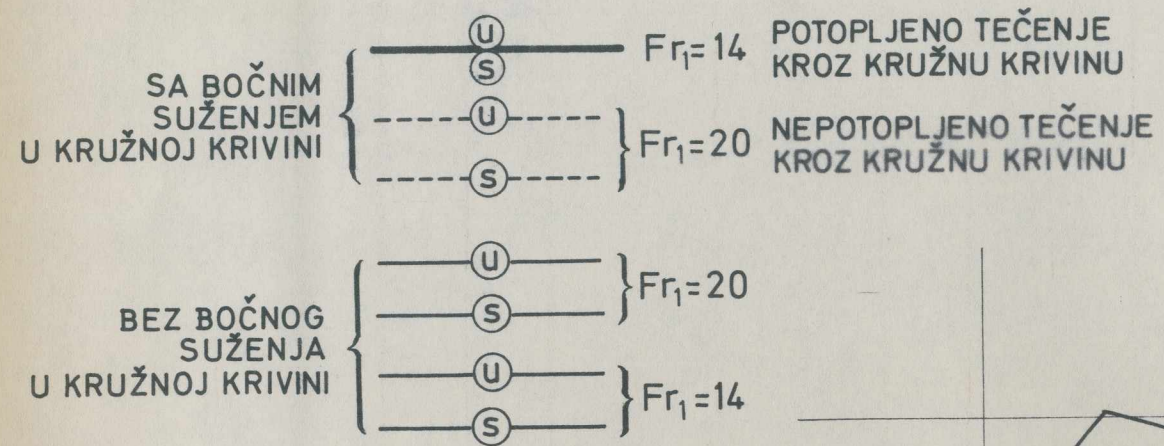
$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 6$$



UTICAJ BOČNOG SUŽENJA U



ŠEŠIŠTA U KRUŽNOJ KRIVINI



$$\frac{R}{b_1} = 5 \quad \frac{b_1}{h_1} = 5$$

KRAJ PRELAZNE DEONICE / POČETAK PRAVOLINIJSKOG KANALA

