



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
ARHITEKTONSKO-GRAĐEVINSKO-GEODETSKI
FAKULTET
GRAĐEVINSKI ODSJEK



Bojana Grujić

**MODELIRANJE FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA
BETONA OJAČANOG VLAKNIMA SA PRIMJENOM U
KONSTRUKCIJAMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Banjaluka, 2016.



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL
ENGINEERING AND GEODESY
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING



Bojana Grujić

**MODELING OF PHYSICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE
FOR APPLICATION IN CONSTRUCTIONS**

DOCTORAL DISSERTATION

Banja Luka, 2016

MENTOR

Prof. dr Mato Uljarević, dipl.inž.grad.

Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet u Banjoj Luci,

Univerzitet u Banjoj Luci, Republika Srpska, BiH

KOMISIJA

Predsjednik i član komisije:

Prof. dr Dragan Milašinović, dipl. inž. grad.

Građevinski fakultet u Subotici,

Univerzitet u Novom Sadu, Republika Srbija

Član komisije:

Prof. dr Jakob Šušteršič, dipl. inž. grad.

Institute for Research in materials and Applications, Ljubljana, Slovenija

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU KANDIDATA

Ime i prezime kandidata: Bojana Grujić

Mentor: Prof. dr Mato Uljarević, dipl. inž. građ.

Naziv doktorske disertacije: „MODELIRANJE FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA BETONA OJAČANOG VLAKNIMA SA PRIMJENOM U KONSTRUKCIJAMA“

Ključne riječi: mikroarmirani beton, čelična vlakna, fizičko-mehaničke karakteristike mikroarmiranog betona, naponsko stanje u tlu, tunnelska obloga

Naučna oblast: geotehnika i građevinske konstrukcije

Naučno polje: tehničke nauke – građevinarstvo

Klasifikaciona oznaka prema CERIF šifrarniku: T220

UDK 691.328:624(043.3)

Tip odabrane licence Kreativne zajednice (Creative Commons): CC BY-NC-ND
(Autorstvo- nekomercijalno - bez prerada)

Institucija u kojoj je rad izrađen: Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, odsjek građevinski

Број страница: 225

Број слика: 64

Број табела: 55

Број коришћених библиографских јединица: 133

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Datum odbrane rada:

BIBLIOGRAPHY CARD OF CANDIDATE

Name and Last name: Bojana Grujić

Mentor: Prof. dr Mato Uljarević, Civil Engineer

Title of Doctoral Dissertation: „MODELING OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE FOR APPLICATION IN CONSTRUCTIONS”

Key words: fiber reinforced concrete, steel fibers, physical and mechanical properties of fiber reinforced concrete, stress state in the soil, tunnel line

Scientific area: Civil Engineering - Geotechnical Engineering and Building Construction

Classification Code according CERIF code book: T220

UDK 691.328:624(043.3)

Type selected license Creative Commons: CC BY-NC-ND

Number of Pages: 225

Number of Images: 64

Number of Table: 55

Number of used bibliographic units: 133

Rezime

Kvalitet i trajnost betonskih, građevinskih objekata, izloženih različitim vrstama opterećenja (pritisak, savijanje, zatezanje, udarno-dinamičko opterećenje) u najvećoj mjeri zavise od fizičko-mehaničkih karakteristika betona koji je izložen takvim uticajima. Oštećenja koja nastaju kontinuiranim uklanjanjem materijala usljed dinamičkih udara ili kroz slabljenje athezije između betona i armature javljaju se progresivno kroz vrijeme, u različitoj mjeri, kod gotovo svih građevinskih objekata. Stoga, pojava prve pukotine u betonu ili habanje betona uzrokuje smanjenje upotrebnog vijeka građevinskog objekta ali istovremeno uzrokuje povećanje troškova zbog neophodne rekonstrukcije istog. Dodatak mikroarmature betonu u velikoj mjeri rješava pomenute nedostatke u betonskim konstrukcijama.

Do sada su nedovoljno istraženi faktori koji predstavljaju fizičke, mehaničke i strukturalne karakteristike **mikroarmiranog betona**, a koje utiču na njegovu otpornost na pritisak, savijanje, zatezanje ili dinamičko-udarno opterećenje. Svjetska istraživačka zajednica je djelimično obradila otpornost mikroarmiranog betona, ali još uvijek postoji veliki potencijal njegovog daljeg ispitivanja.

U predmetnoj disertaciji su istražene i analizirane mogućnosti dobijanja poboljšanih fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranog betona sa varijacijama tipova i količine upotrijebljenih čeličnih vlakana u masi betona.

Fizičko-mehaničke karakteristike dobijenih, mikroarmiranih betona u svježem i očvrslom stanju su upoređivane sa karakteristikama etalona, betona spravljenog bez dodatka mikrovlakana, pri čemu je osnovna receptura ostala ista kako za klasični, tako i za mikroarmirani beton. Ispitivanja otpornosti klasičnog betona i mikroarmiranog betona su izvršena na uzorcima oblika cilindra, grede i ploče, pri čemu su u toku eksperimenata primjenjeni važeći Standardi i Propisi. U nedostatku istih, prilikom ispitivanja udarne otpornosti ploča, ispitivanja su sprovedena na originalno izrađenoj aparaturi koja na najbolji način simulira stvarne uslove na jednom od osam kanala za dopremanje rude u Termoelektrani Gacko.

Za potrebe istraživanja spravljena je vrsta betona sa istom matricom za sve uzorke (agregat, cement, voda i aditivi), pri čemu su istoj dodate tri različite vrste čeličnih vlakana u količinama od 1%, 2%, 3% u ukupnoj masi betona. Izabrana čelična vlakna, kao i količina upotrijebljenih vlakana u velikoj mjeri su uticala na kvalitet fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranih betona. Istovremeno, u radu je predstavljena reološko-dinamička analiza predmetnog betona na

standardnom uzorku oblika cilindra. Ovaj rad predstavlja originalan naučni doprinos u pragmatičnoj primjeni mikroarmiranog betona jer je u istom predstavljena upotreba radnog, σ - ε dijagrama u digitalnom zapisu za proračun tunnelske konstrukcije od mikroarmiranog betona.

Na osnovu obrađenih i sistematizovanih rezultata eksperimentalnih istraživanja u laboratoriji i izvršene parametarske analize uticaja pojedinih fizičko-mehaničkih karakteristika na otpornost mikroarmiranog betona formulisani su zaključci. Najveći efekat u smislu povećanja otpornosti mikroarmiranog betona na pritisak, savijanje, kao i dinamičko-udarno opterećenje se postiže primjenom čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima u količini od 3%, čiji je faktor oblika $L/D=50/0,75$. Takođe, ojačanje betona mikroarmaturom sa zakrivljenim krajevima u količini od 3%, sa faktorom oblika $L/D=31/0,75$, doprinosi značajnom povećanju otpornosti mikroarmiranog betona, pri čemu se veći efekat postiže primjenom fibriliranih vlakana.

Dodavanjem čeličnih vlakana betonu postiže se značajno povećanje energije koja sprečava i vremenski odlaže pojavu prve pukotine u masi betona, čime su dokazane osnovne pretpostavke od kojih se krenulo pri izradi doktorske disertacije.

Summary

The quality and durability of building concrete civil engineering structures exposed to different types of loads (pressure, bending, tension, impact-dynamic load) largely depend on the physical and mechanical properties of concrete which is exposed to such impacts. Damage caused by continuous removal of material due to the dynamic shock or through weakening the adhesion between concrete and reinforcement occurs progressively over time, having varying degrees in almost all civil engineering structures. Therefore, the appearance of the first crack in the concrete or concrete abrasion causes a reduction in useful life of the civil engineering structure, and at the same time causes increase in costs due to the necessary reconstruction. Addition of fiber reinforcement concrete largely solves the aforementioned defects in concrete structures.

Factors that represent physical, mechanical and structural characteristics of fiber reinforced concrete affecting the resistance to pressure, bending, tension or dynamic-impact load are not sufficiently explored by now. Global research community partially covered investigation on strength of fiber reinforced concrete, but there is still a great potential for its further examination.

The thesis investigated and analyzed the possibility of obtaining improved physical and mechanical characteristics of reinforced concrete with a variation of types and quantities of steel fibers used in the concrete mass.

The physical and mechanical properties which are obtained for fresh and hardened fiber reinforced concrete were compared with conventional concrete without addition of microfibers, wherein the basic recipe remained the same as for conventional and for fiber reinforced concrete. Strength tests for conventional and fiber reinforced concrete were performed on samples in the form of cylinder, beam and plate in accordance with applicable standards and specifications.

In the absence of relevant standards, when testing impact resistance of plates, tests were conducted on the originally designed apparatus, which in the best way simulates the actual conditions at one of the eight channels for ore delivery in the Thermal Power Plant Gacko.

The same type of concrete matrix for all samples (aggregate, cement, water and additives) was prepared for the testing purposes, having three different types of steel fibers in the amounts of 1%, 2%, 3% of the total weight of the concrete. Physical-mechanical properties of fiber reinforced concrete have shown significant variations depending on the selected steel fibers, as

well as on the amount of fibers used. At the same time, rheological-dynamic analysis of the concrete in for the standard cylinder form was presented within the thesis. The thesis is an original scientific contribution to the pragmatic application of fiber reinforced concrete containing presentation of utilization of σ - ϵ diagrams in digital format for dimensioning tunnel structure made of fiber reinforced concrete.

Conclusions were formulated on the basis of processed and systematized results of experimental study in the laboratory and performed parametric analysis of the influence of certain physical and mechanical characteristics of fibers on the strength of fiber reinforced concrete . The greatest effect in terms of increasing resistance of fiber reinforced concrete to compression, bending and dynamic-impact load is achieved by using 3% of steel fibers with curved edges having the shape ratio $L/D=50/0,75$. Also, fiber reinforcement with curved ends, having shape ratio $L/D=31/0,75$, in the amount of 3%, significantly increases resistance of fiber reinforced concrete, whereby greater effect is being achieved with fibrillated fibers.

Addition of steel fibers to concrete increases energy that prevents and delays the appearance of the first crack in the concrete mass.

Spisak osnovnih oznaka i korištenih simbola

d	<i>prečnik zrna agregata u mješavini betona</i>
d_{max}	<i>maksimalni prečnik zrna agregata u mješavini</i>
L	<i>dužina vlakna</i>
D	<i>prečnik čeličnog vlakna</i>
(L/D)	<i>faktor oblika</i>
γ_s	<i>specifična masa</i>
f_z	<i>čvrstoća pri zatezanju</i>
ϵ_{uk}	<i>izduženje pri kidanju</i>
V_f	<i>sadržaj vlakana u kompozitu</i>
$(V_f * L_f / d_f)$	<i>indeks armiranja</i>
σ, τ	<i>komponente vektora napona</i>
σ'	<i>napon pritiska u betonu</i>
ϵ	<i>pritisna deformacija u betonu</i>
ϵ_{pt}	<i>pritisna deformacija u betonu pri maksimalnom naponu</i>
σ'_{cf}	<i>čvrstoća na pritisak vlaknima ojačanog betona</i>
σ_c	<i>čvrstoća na zatezanje vlaknima armiranog betona</i>
σ_m	<i>čvrstoća na zatezanje matrice betona</i>
β	<i>koeficijent koji je zavisao od distribucije vlakana u matrici betona</i>
f_r	<i>čvrstoća zatezanja matrice betona (bez vlakana) pri naprezanju savijanjem</i>
V_m	<i>sadržaj matrice u kompozitu</i>
σ_{bf}	<i>čvrstoća kod pojave prve pukotine</i>
f'_c	<i>čvrstoća na pritisak vlaknastog betona</i>
F	<i>parametar vlakana koji je definisan površinom vlakna pomnoženom brojem vlakana po jedinici površine, tj. zapreminski procenat vlakana u betonu podijeljen sa dužinom upotrijebljenog vlakna</i>
p_i	<i>potporni pritisak</i>
ν	<i>Poasson-ov koeficijent</i>
U_t	<i>unutrašnja radijalna pomjeranja</i>
φ	<i>ugao unutrašnjeg trenja</i>

c	<i>kohezija</i>
$maxU_{tot}$	<i>maksimalna pomjeranja</i>
E_f	<i>modul elastičnosti čeličnih vlakana</i>
E	<i>modul elastičnosti betona</i>
d_0	<i>ugib</i>
T	<i>žilavost</i>
I	<i>indeks žilavosti</i>

Spisak slika

- Sl. 1.1. Osnovni naučni pristup prilikom izrade doktorske disertacije*
- Sl. 1.2. Opis primjenjenog eksperimentalnog rada*
- Sl. 2.1. Uticaj maksimalne veličine zrna na distribuciju i orijentaciju vlakana*
- Sl. 2.2. Granulometrijske krive za mikroarmirani beton prema ACI standardu*
- Sl. 2.3. Granulometrijske krive za mikroarmirani beton prema JUS standardu*
- Sl. 3.1. Uticaj faktora oblika (L/D) na obradljivost betonske mješavine*
- Sl. 3.2. Uticaj faktora oblika vlakana na konzistenciju betona*
- Sl. 3.3. Uticaj krupnoće agregata i sadržaja vlakana na konzistenciju betona*
- Sl. 3.4. Uticaj valovitih (talasastih) i nazubljenih čeličnih vlakana, sa zakrivljenim krajevima na udarnu otpornost betona*
- Sl. 3.5. Zavisnost između abrazivnog habanja i apsorbovane energije betona mikroarmiranih čeličnim vlaknima*
- Sl. 3.6. Uticaj faktora oblika vlakana na σ - ϵ dijagram*
- Sl. 4.1. Cilindri upotrijebljeni u eksperimentalnom radu dimenzija (300x150)mm*
- Sl. 4.2. Izrađeni cilindrični uzorci dimenzija 300x150mm*
- Sl. 4.3. Grede upotrijebljene u eksperimentalnom radu dimenzija (100x100x400)mm*
- Sl. 4.4. Izrađeni gredni uzorci dimenzija (100x100x400)mm*
- Sl. 4.5. Izrađeni uzorci ploča (etaloni i ploče od mikroarmiranog betona)*
- Sl. 4.6. Izrađeni uzorci ploča (etaloni i ploče od mikroarmiranog betona)*
- Sl. 4.7. Upotrijebljeni portland cement cement za izradu uzoraka*
- Sl. 4.8. Granulometrijska kriva upotrijebljenih frakcija agregata za izradu uzoraka*
- Sl.4.9. Agregat upotrijebljen za izradu uzoraka*
- Sl. 4.10. Čelična vlakna sa zakrivljenim krajevima i faktorom oblika $L/D = 50/0,75$ mm*
- Sl. 4.11. Čelična vlakna sa ojačanim krajevima i faktorom oblika $L/D = 31/0,75$ mm*
- Sl. 4.12. Talasasta čelična vlakna sa faktorom oblika $L/D=25/0,75$ mm*
- Sl. 4.13. Postupak spravljanja mikroarmiranog betona*
- Sl.4.14. Mjera slijeganja i mjera konzistencije utvrđena metodom za mikroarmirani beton*
- Sl. 4.15. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 1%*
- Sl. 4.16. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 2%*
- Sl. 4.17. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 3%*

Sl. 4.18. Grafički prikaz reološko-dinamičkog modela za vlakna faktora oblika $L/D=50/0,75$

Slika 4.19. Dijagram opterećenje - ugib mikroarmiranog betona, gredice 100X100X400mm

Sl.4.20. Uzorak bez čeličnih vlakana za ispitivanje čvrstoće na savijanje

Sl.4.21. Uzorak sa čeličnim vlaknima za ispitivanje čvrstoće na savijanje

Sl. 4.22. Šema opterećenja primjenjenog sistema prilikom ispitivanja čvrstoće na savijanje

*Sl.4.23. Aparat za sprovođenje testa savijanja za četiri karakteristične tačkene gredama
dimenzija: 100x100x400mm*

*Sl.4.24. Rezultati poređenja dobijenih dijagrama (opterećenje – ugib) za različite količine učešća
vlakana u masi betona, faktora oblika $L/D=50/0,75$*

*Sl.4.25. Rezultati poređenja dobijenih dijagrama (opterećenje – ugib) za različite količine učešća
vlakana u masi betona, faktora oblika $L/D=25/0,75$*

*Sl.4.26. Rezultati poređenja žilavosti mikroarmiranog betona za upotrijebljena vlakna:
 $L/D=50/0,75$ i $L/D=25/0,75$*

Slika 4.27. Uticaj količine i vrste vlakana na čvrstoću na savijanje

Slika 6.1. Potporni pritisak p_i za različite slučajeve u korak sanapredovanjem tunelskog profila

Slika 6.2 Uticaj potpornog sistema pomjeranja tunelskog zida kao posljedica uvođenja ravnoteže

Spisak tabela

Tabela 2.1. Pregled prednosti i nedostataka primjene klasične armature i mikroarmature

Tabela 2.2. Važnija svojstva različitih tipova vlakana

Tabela 2.3. Osobine primjenjenih čeličnih vlakana

Tabela 2.4. Granulometrijske krive prema ACI standardu

Tabela 4.1. Fizičko-mehaničke karakteristike upotrijebljenog cementa

Tabela 4.2. Hemijski sastav upotrijebljenog cementa

Tabela 4.3. Rezultati ispitivanja frakcija upotrijebljenog agregata

Tabela 4.4. Procentualni sadržaj upotrijebljenog agregata

Tabela 4.5. Karakteristike upotrijebljenih čeličnih vlakana

Tabela 4.6. Efekat dodavanja čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$ mm na karakteristike betonske mješavine oblika cilindra

Tabela 4.7. Efekat dodavanja čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$ mm na karakteristike betonske mješavine oblika greda

Tabela 4.8. Efekat dodavanja čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$ mm na karakteristike betonske mješavine oblika ploča

Tabela 4.9. Rezultati ispitivanja uticaja dodatka „Sika ViscoCrete 3070“ na svojstva betonske matrice

Tabela br.4.10. Granulometrijska kriva matrice betona korištena u eksperimentu

Tabela 4.11. Gustine betonske mješavine bez vlakana i sa prisustvom čeličnih vlakana

Tabela 4.12. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=50/0,75$) metodom Abramsovog konusa

Tabela 4.13. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=31/0,75$) metodom Abramsovog konusa

Tabela 4.14. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=25/0,75$) metodom Abramsovog konusa

Tabela 4.15. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=50/0,75$)

Tabela 4.16. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=31/0,75$)

Tabela 4.17. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=25/0,75$)

Tabela 4.18. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=50/0,75$)

Tabela 4.19. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=31/0,75$)

Tabela 4.20. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=25/0,75$)

Tabela 4.21. Zavisnost čvrstoće na pritisak od vrste vlakana i količine vlakana poslije 28 dana

Tabela 4.22. Prikaz određivanja modula elastičnosti jednog uzorka cilindričnog etalona dimenzija 30x15cm

Tabela 4.23. Prikaz određivanja modula elastičnosti cilindričnog mikroarmiranog uzorka, dimenzija 150x300mm, 2% čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$

Tabela 4.24. Rezultati modula elastičnosti etalona i mikroarmiranog betona ($L/D=50/0,75$)

Tabela 4.25. Rezultati reološko-dinamičke analize mikroarmiranog betona ($L/D=50/0,75$)

Tabela 4.26. Rezultati čvrstoća na zatezanje pri upotrebi različitih vrsta vlakana i količine vlakana

Tabela 4.27. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka oblika grede 100x100x400mm

Tabela 4.28. Dimenzije betonskih i mikroarmiranih ploča na kojima je sprovedeno udarno opterećenje

Tabela 4.29. Vrsta upotrijebljenih čeličnih vlakana za ispitivanje mikroarmiranih ploča

Tabela 4.30. Karakteristike eksperimentalnog ispitivanja mikroarmiranih ploča

Tabela 4.31. Rezultati ispitivanja betonskih ploča (etalona) na dinamičko-udarno opterećenje

Tabela 4.32. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=50/0,75$, na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%

Tabela 4.33. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=50/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%

Tabela 4.34. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=50/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%

Tabela 4.35. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=31/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%

Tabela 4.36. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=31/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%

*Tabela 4.37. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=31/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%*

*Tabela 4.38. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=25/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%*

*Tabela 4.39. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=25/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%*

*Tabela 4.40. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=25/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%*

Tabela 5.1. Poređenje mikroarmiranog i klasičnog betona na osnovu sprovedenih istraživanja

Tabela 6.1. Karakteristike geotehničke sredine

Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. CILJ I ZADACI	3
1.2. NAUČNI PRISTUP I METODOLOGIJA IZRADE.....	4
1.3. OBLAST DJELOVANJA I OGRANIČENJA	8
1.4. ZNAČAJ I NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA	8
1.5.OSNOVNE CJELINE DOKTORSKE DISERTACIJE	10
2. MIKROARMIRANI BETON U SAVREMENOM GRAĐEVINARSTVU	11
2.1. Istorijski pregled razvoja mikroarmiranog betona	11
2.2. Mikroarmirani beton, osnovne karakteristike matrice i vlakana.....	17
2.3 Glavni parametri vlakana mikroarmiranog betona	19
2.3.1 Vrste vlakana	20
2.3.2 Vlakna vještačkog porijekla	20
2.4. Agregat	23
2.5. Cement	28
2.6. Voda	28
2.7. Zapremina vazduha	29
3. PRIPREMA I OBRADLJIVOST MIKROARMIRANIH BETONA	30
3.1. Mješavina mikroarmiranog betona	30
3.2. Atezijska mikroarmatura i betona	32
4. EKSPERIMENTALNI PROGRAM ISTRAŽIVANJA	40
4.1. Program istraživanja	42
4.2 Svojstva upotrijebljenih komponentnih materijala	53
4.2.1. Cement	54
4.2.2. Agregat	56
4.2.3. Voda	58
4.2.4. Čelična vlakna	58
4.2.5. Aditivi	69
4.2.6. Projektovanje betonske mješavine upotrijebljene u eksperimentalnom istraživanju	71
4.3. Ispitivanje svojstava svježeg betona	76
4.3.1. Ispitivanje konzistencije svježeg betona	76
4.3.2. Ispitivanje zapreminske mase svježeg zbijenog betona	80
4.3.3. Sadržaj vazduha u svježem betonu	81
4.4. Ispitivanje karakteristika očvrslog betona	83
4.4.1. Fizičko-mehaničke karakteristike očvrslog betona	83
4.4.1.2. Čvrstoća na pritisak	84
4.4.1.3. Reološko-dinamička analiza uzoraka sa čeličnim vlaknima $L/D=50/0,75$	88
4.4.1.4. Ispitivanje čvrstoće na zatezanje	97
4.4.1.5. Čvrstoća na savijanje	99
4.4.1.6. Ispitivanje dinamičke-udarne otpornosti mikroarmiranih ploča	107
4.4.1.6.1. Predložena metoda ispitivanja	110

5. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA	152
6. PRIMJENA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIH LABORATORIJSKIH REZULTATA U PRORAČUNU TUNELSKJE KONSTRUKCIJE	155
6.1. STATIČKI PRORAČUN - Osnovne postavke i ideje proračuna primarne obloge tunelske konstrukcije	155
6.2. NUMERIČKI MODELI OSIGURANJA ISKOPA	164
6.2.1. DOPUNSKA ANALIZA	206
7. ZAKLJUČNA SAZNANJA I MOGUĆNOST DALJIH ISTRAŽIVANJA	217
7.1 Mogućnost daljih istraživanja.....	220
Literatura	
O autoru	

1. UVOD

Beton armiran čeličnim vlaknima postao je izuzetno popularan i atraktivan materijal u oblasti građevinske struke zbog svojih izuzetnih fizičko-mehaničkih karakteristika. Zahvaljujući takvim karakteristikama i sve izraženijom potrebom za složenom vrstom objekata, kako u pogledu opterećenosti konstrukcije, tako i u pogledu oblika konstrukcije, granice kvaliteta betona armiranog čeličnim vlaknima su u stalnom porastu. Uvođenje vlakana u ispitivanje betonske mješavine, posebno u post-elastičnoj zoni, izaziva pozitivne promjene koje se kreću od najblažih do značajnih u zavisnosti od niza faktora uključujući snagu matrice betona, tip vlakana, modul elastičnosti vlakana, čvrstoću vlakana, karakteristiku površinskog vezivanja vlakna za matricu betona, sadržaj vlakana, orijentaciju vlakana u matrici kao i efekte veličine agregata. Primjena betona u kombinaciji sa čeličnim vlaknima doprinosi plastičnom ponašanju ove vrste materijala, što je posebno pogodno za primjenu gdje je ojačanje klasičnom armaturom teško proizvesti.

Savremeni zahtjevi u oblasti građevinske nauke neprekidno zahtijevaju uvođenje novih tehnologija u cilju osvajanja kvalitetnijih, trajnijih i ekonomičnijih materijala. U ovu grupu se ubrajaju novi kompoziti sa poboljšanim fizičko-mehaničkim, dinamičko-reološkim, tehnološkim, eksploatacionim i drugim karakteristikama u odnosu na već postojeće, uobičajene materijale.

Jedan od značajnijih produkata ovakvog razvojnog poduhvata u oblasti građevinarstva je mikroarmirani beton, tj. beton sa dodatkom vlakana koja predstavljaju vrstu mikroarmature.

Mikroarmirani betoni su kompozitni materijali dobijeni ojačanjem cementne matrice pomoću ravnomerno raspršenih vlakana u matrici betona. Dakle, mikroarmirani beton je građevinski materijal, koji osim klasičnih komponenti (agregat, vezivo, voda, aditivi) betona, u sebi sadrži određenu količinu vlakana različitih oblika i materijala. Dodatkom vlakana ili tzv. mikroarmature dobijamo veoma povoljne fizičko-mehaničke osobine betona: otpornost prema pojavi prslina, zatezna čvrstoća, čvrstoća na čisto smicanje kao i veoma povoljne parametre na reološko-dinamičke i termičke uticaje. U tendenciji i razvoju savremenog građevinarstva beton ojačan vlaknima može da donese sasvim novi kvalitet te je tako omogućen veoma širok spektar

primjene ove vrste betona u konstrukcijama ili dijelovima konstrukcije zahtjevnih oblika i opterećenja.

Predmet doktorske disertacije je eksperimentalno–teorijska i modelska analiza mikroarmiranog betona, koja je sprovedena na uzorcima klasičnog i mikroarmiranog betona različitih oblika (cilindri, grede i ploče), različite geometrije i oblika upotrijebljenih čeličnih vlakana kao i različitih količina primjenjene čelične mikroarmature. Dakle, sve oblike primjenjenih mikroarmiranih uzoraka pratila je i izrada uzoraka bez mikroarmature koji su služili kao etaloni. Izradu eksperimentalnog dijela disertacije i obradu rezultata, pratili su važeći Standardi i propisi za sve sprovedene eksperimente a u nedostatku istih predstavljena je sopstvena metoda ispitivanja na udarno-dinamičko opterećenje.

Sadržaj disertacije čine poglavlja:

- Uvod
- Mikroarmirani betoni u svremenom građevinarstvu
- Priprema i obradljivost mikroarmiranih betona
- Eksperimentalno istraživanje
- Analiza dobijenih rezultata
- Primjena dobijenih eksperimentalnih, laboratorijskih rezultata u proračunu tunelske konstrukcije
- Zaključna razmatranja i mogućnost daljih istraživanja

1.1 CILJ I ZADACI

Osnovni cilj doktorske disertacije je bio da se na osnovu modeliranja fizičko-mehaničkih karakteristika betona ojačanog čeličnim vlaknima (mikroarmiranog betona), prikaže odgovor za mogućnost poboljšane i unaprijeđene primjene ove vrste betona u konstrukcijama složenih oblika i opterećenja. Tokom izrade doktorske disertacije prolazilo se kroz nekoliko nivoa i vrsta modeliranja betona ojačanog čeličnim vlaknima (u laboratorijama) da bi se na najbolji mogući način predstavila funkcionalna zavisnost njegovih osobina od primjenjenih parametara vlakana i ostalih upotrijebljenih komponenti: agregata, cementa, vode i aditiva. Postavljeni cilj doktorske disertacije sproveden je kroz ostvarena eksperimentalna istraživanja u laboratorijama na uzorcima oblika cilindra, grede i ploče, gdje je bilo potrebno sprovesti odgovarajuća ispitivanja na pritisak, savijanje, zatezanje, kao i udarno-dinamičko opterećenje. Poslije dobijenih laboratorijskih rezultata (kao što je npr. σ - ϵ radni dijagram mikroarmiranog betona), isti je upotrijebljen za proračun tunnelske konstrukcije. Ovdje je potrebno napomenuti da do sada niti jedan softver nije primao definisane radne σ - ϵ dijagrame betona u digitalizovanom obliku kao ulazni podatak za dalju obradu ponašanja konstrukcije, što je izuzetno važno u slučaju vlaknima armiranog betona zbog drastično izražene žilavosti poslije dostizanja vršne vrijednosti čvrstoće. U predmetnoj disertaciji autor je digitalizovani oblik radnog σ - ϵ dijagrama mikroarmiranog betona predstavila u proračunu konstrukcije i tako pomjerila dosadašnje stanje u okviru istraživačke zajednice i pragmatične primjene ove vrste betona u podzemnim konstrukcijama. Eksperimentalni izbor mješavine mikroarmiranog betona i njihovo ispitivanje sproveden je kroz sledeće oblike i dimenzije uzoraka:

Cilindrični uzorci od klasičnog betona - dimenzija 150X300mm;

Cilindrični uzorci od mikroarmiranog betona - dimenzija 150X300mm;

Grede od klasičnog betona - dimenzija 100X100X400 mm

Grede od mikroarmiranog betona - dimenzija 100X100X400 mm

Ploče od klasičnog betona - dimenzija 400X400Xn(50,100,150,200,250,300,400)mm

Ploče od mikroarmiranog betona - dimenzija 400X400Xn(50,100,150,200,250,300,400)mm

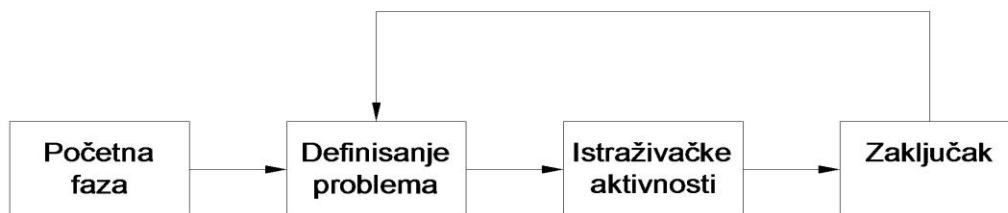
1.2. NAUČNI PRISTUP I METODOLOGIJA IZRADE

Primjena mikroarmiranog betona doprinosi povećanju kvaliteta i trajnosti građevinskih konstrukcija. Da bi se jasnije predstavila uloga vlakana u matrici betona trebalo bi napomenuti da u betonu postoje mikropukotine. Energija koja dovodi do širenja pukotina je mnogo manja od energije koja dovodi do početnog stvaranja mikropukotina. Pod dejstvom opterećenja (statičkog ili dinamičkog), pukotine dostižu kritične vrijednosti što dovodi do loma konstrukcije. Ako u betonskoj mješavini postoje vlakna onda se energija koja bi povećala pukotinu troši (raspoređuje) oko vlakana. Zbog toga je potrebno više energije za širenje pukotina, tj mora se utrošiti znatno više energije za istezanje odnosno deformaciju prisutnih vlakana.

Prema tome, glavni naučni koncept u izradi predmetne doktorske disertacije jeste da vlakna (čelična) u masi betona predstavljaju izazov istraživača za postizanje naprednijih fizičko-mehaničkih, dinamičko-reoloških karakteristika mikroarmiranog betona.

Eksperimenti u okviru doktorske disertacije i primjenjena metodologija izrade predstavili su rezultate o produženoj trajnosti betonske konstrukcije ojačane vlaknima u odnosu na konstrukciju bez vlakana. Sprovedena istraživanja su pokazala da karakteristike mikroarmiranog betona u konstrukcijama (sa aspekta modeliranja, kvaliteta i trajnosti), zavise od vrste upotrijebljenog agregata, oblika i veličine zrna agregata, vrste i karakteristika primjenjene čelične mikroarmature.

Dakle, glavni naučni pristup izrade doktorske disertacije, vizuelno predstavljen, dat je kroz sledeću sliku.



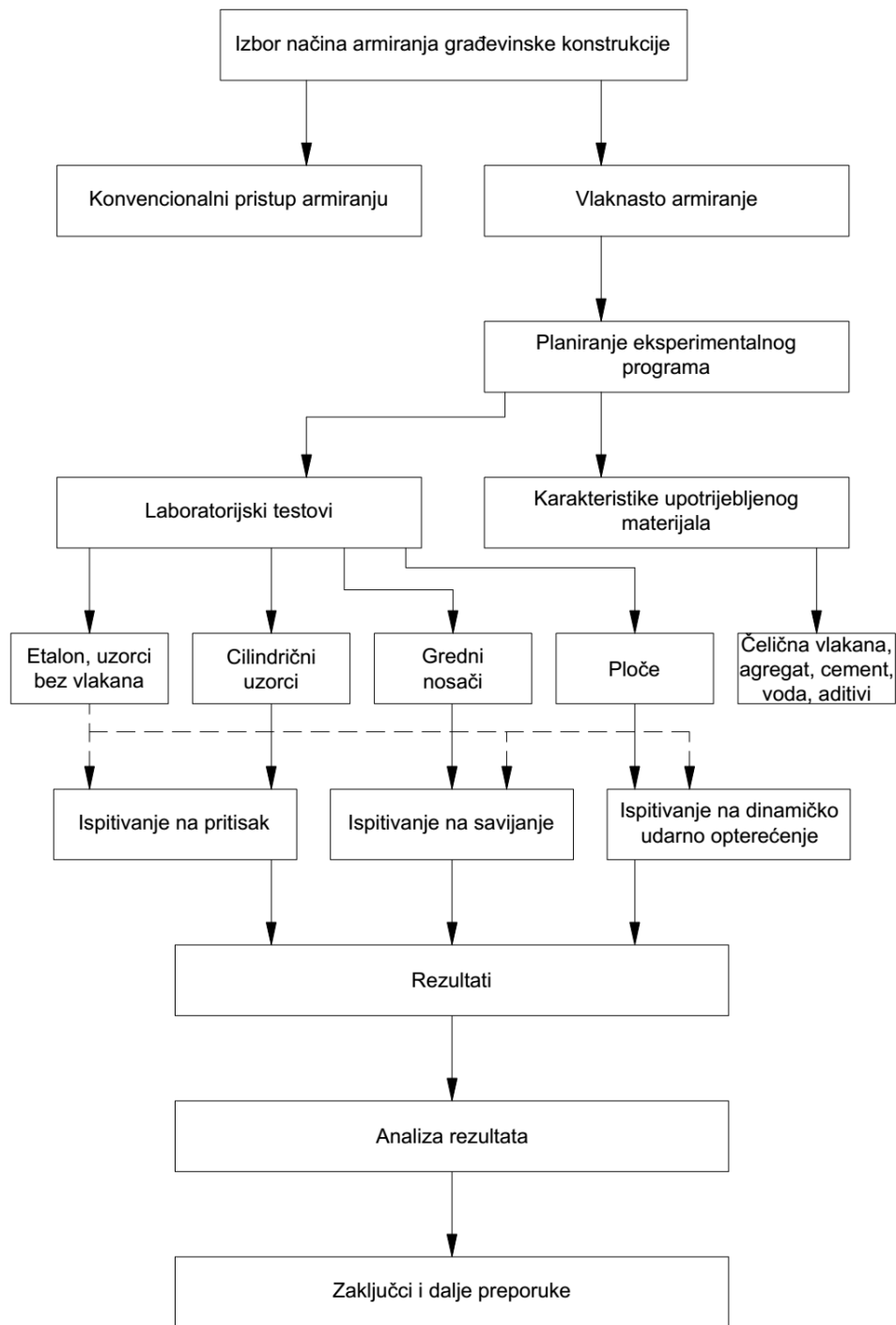
Sl. 1.1. Osnovni naučni pristup prilikom izrade doktorske disertacije

Temeljna strategija istraživanja bila je vizuelizirati postavljeni problem istraživanja o mikroarmiranom betonu i donekle pojednostaviti to istraživanje. Ovaj pravac istraživanja je izabran u početnoj fazi. U sledećem okviru je formulisan problem, zatim istraživačke aktivnosti i na kraju zaključak. Zaključci imaju tendenciju ne samo da produže granice istraživanja naprijed, već da postavе i otvore nova pitanja za sledeća istraživanja. To znači da iteracija petlje iz zaključka dolazi opet u formulaciju problema.

U radu su primjenjene sledeće metode istraživanja: eksperimentalna, metoda modelovanja, statistička kao i posebne metode saznanja: analiza i sinteza, definisanje i klasifikacije, tipološke skale, indukcija i dedukcija, dokazivanje i opovrgavanje. U okviru eksperimentalnog dijela rada navedene metode su korištene za predstavljanje karakteristika betonske mješavine u svježem stanju, kao i određivanje fizičko-mehaničkih, dinamičko-reoloških karakteristika mikroarmiranog betona pri starosti od 28 dana. Eksperimentalna istraživanja pomenutim metodama su sprovedena na betonskoj mješavini jednake recapture u pogledu primjenjenog agregata, cementa, vode i aditiva, dok su varijacije vršene u pogledu učešća čeličnih vlakana u masi betona. Kao što je već napomenuto, eksperimentalna istraživanja su vršena u cilju modeliranja i postizanja poboljšanih fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranog betona sa izabranim komponentama na različitim vrstama uzoraka.

Rezultati eksperimentalnog dijela rada, prikazuju rezultate o betonu armiranom čeličnim vlaknima i njegovoj produženoj trajnosti i poboljšanom kvalitetu u izradi građevinskih

konstrukcija ili dijelova konstrukcija. Eksperimentalni dio, za koji su korištene različite metode istraživanja prošao je kroz početnu iteraciju, eksperimenti bez vlakana a zatim slijede ostale iteracije, eksperimenti sa vlaknima. Ilustracija cjelokupnog modela eksperimentalnog rada predstavljena je na sledećoj slici.



Sl. 1.2. Opis primjenjenog eksperimentalnog rada

1.3 OBLAST DJELOVANJA I OGRANIČENJA

Pregled raspoloživih i dokumentovanih metoda istraživanja o mikroarmiranom betonu od strane istraživačke zajednice postavio je osnovu od koje je nastavljena oblast istraživanja mikroarmiranog betona sa čeličnim vlaknima u okviru predmetne disertacije. Koncept sprovedenih istraživanja, dobijeni rezultati i evaluacija cjelokupnog rada predstavljaju aplikacije za različite dijelove građevinskih konstrukcija visokogradnje, niskogradnje i hidrogradnje karakterističnih opterećenja i oblika. Eksperimentalni program istraživanja baziran je na sopstvenom izboru recepture za izradu mikroarmiranog betona, kao i etalona tj. uzoraka bez vlakana. Eksperimentalni program ispitivanja je sproveden upotrebom važećih Standarda i propisa zemalja iz Evrope i svijeta, gdje su eksperimenti sprovedeni. Usljed nedostatka Standarda za ispitivanja ploča od mikroarmiranog betona na dinamičko-udarno opterećenje u specijanom slučaju kao što je lijevak u Termoelektrani Gacko, a u svrhu unapređenja fizičko-mehaničkih karakteristika tog betona, razvijena je sopstvena metoda ispitivanja na udarno-dinamičko opterećenje.

1.4 ZNAČAJ I NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA

Rezultati istraživanja u predmetnoj doktorskoj disertaciji daju originalni naučni i praktični doprinos u oblasti betona ojačanih čeličnim vlaknima sa njegovim primjenama u građevinskim konstrukcijama ili dijelovima konstrukcija. Eksperimentalni dio istraživanja ima nekoliko jedinstvenih naučnih doprinosa u okviru istraživačke zajednice o mikroarmiranom betonu i njegovoj primjeni. Eksperimenti su pokazali da primjena čeličnih vlakana u masi betona povećava otpornost na savijanje i dozvoljeno granično opterećenje u ploči a stepen porasta dozvoljenog opterećenja i odlaganje pojave prve pukotine je takođe u funkciji učešća količine vlakana, vrste vlakana i odnosa L/D .

Testovi koji su sprovedeni na uzorcima različitih oblika, sa primjenom različitih tipova čelične mikroarmature i sa različitim zapreminskim učinkom u okviru tog betona, pružaju informacije o distribuciji opterećenja u pogledu pravca nosivosti kao i distribuciji napona u ispitivanim

uzorcima, te nam na taj način daju važne informacije o strukturalnom ponašanju betona sa ili bez čeličnih vlakana.

Kao rezultate istraživanja koji su proizašli iz doktorske disertacije ističu se neke od postignutih i poboljšanih fizičko-mehaničkih, dinamičko-reoloških karakteristika modeliranog mikroarmiranog betona u poređenju sa etalonima a pri upotrebi *izabраниh* vrsta čeličnih vlakana. Kao poseban doprinos istraživanja ističe se modeliranje i ispitivanje mikroarmiranih betonskih ploča koje su opterećene na udarno-dinamičko opterećenje i čiji je vijek trajanja znatno produžen u poređenju sa etalonima. U radu je takođe prikazan rezultat reološko-dinamičkog ponašanja materijala na standardnom betonskom cilindru. Izuzetno važan, pragmatičan dio ovog rada jeste korištenje dobijenih, laboratorijskih karakteristika uzoraka cilindra (radnog σ - ϵ dijagrama mikroarmiranog betona) za proračun tunelske obloge. U pregledu istraživačke zajednice do sada nije bila moguća primjena radnog σ - ϵ dijagrama mikroarmiranog betona u digitalnom obliku, te i sa ovog stanovišta predmetna disertacija predstavlja inovaciju.

1.5 OSNOVNE CJELINE DOKTORSKE DISERTACIJE

Doktorska disertacija sadrži sedam poglavlja. Osnovni koncept nastanka ovog rada proistekao je iz formiranja *predmeta istraživanja mikroarmiranog betona* pri čemu je bilo potrebno riješiti postavljeni problem kroz odgovarajuća eksperimentalna ispitivanja a zatim upotrijebiti dobijene rezultate iz laboratorije za proračun tunelske konstrukcije.

Dakle, predmetna disertacija je obuhvatila tri važne cjeline i to:

- *modeliranje betona,*
- *eksperimentalno, laboratorijsko istraživanje tog betona i predstavljnje dobijenih rezultata i*
- *proračun (uz upotrebu dobijenih, laboratorijskih podataka o predmetnom mikroarmiranom betonu) tunelske obloge.*

U uvodnom dijelu predstavljen je predmet istraživanja doktorske disertacije, glavni zadaci, metodologija izrade kao i ciljevi koji su proistekli izradom disertacije.

U drugom poglavlju predstavljene su opšte karakteristike mikroarmiranog betona sa mogućnostima njegove primjene u savremenom građevinarstvu, sa posebnim osvrtom na istorijski pregled mikroarmiranog betona i dosadašnjim ispitivanjima.

U trećem poglavlju je obrađena priprema i obradljivost mikroarmiranih betona i mogućnost njihove primjene u građevinskim konstrukcijama.

U četvrtom poglavlju detaljno je predstavljen program eksperimentalnih istraživanja koja su sprovedena u predmetnoj disertaciji. Opisane su metode, navedeni Standardi koji su korišteni prilikom ispitivanja svježih betonske mješavine, kao i za ispitivanje betona pri starosti od 28 dana na uzorcima bez vlakana (etalonima), kao i na uzorcima od mikroarmiranog betona.

U poglavlju broj 5 predstavljena je analiza dobijenih rezultata tokom eksperimentalnog ispitivanja. Poglavlje broj 6 predstavlja primjenu dobijenih, eksperimentalnih, laboratorijskih rezultata u proračunu tunelske konstrukcije, gdje je (za proračun podzemnih konstrukcija) upotrijebljen digitalni oblik radnog σ - ϵ dijagrama mikroarmiranog betona a sve presječne sile i deformacije prikazane dijagramima.

U poglavlju broj 7 data su zaključna saznanja sa mogućnostima daljih ispitivanja mikroarmiranih betona u okviru istraživačke zajednice.

2. MIKROARMIRANI BETON U SAVREMENOM GRAĐEVINARSTVU

2.1. Istorijski pregled razvoja mikroarmiranog betona

Saznanje da se primjenom različitih vrsta vlakana u masi betona pozitivno utiče na karakteristike istog može se smatrati jednom od važnih inovativnih činjenica u istoriji građevinske struke. Upravo, ova činjenica dovela je do razvoja mikroarmiranog betona. Rimljani su preteče u primjeni različitih vrsta prirodnih vlakana u ojačanju konstrukcija. U prvo vrijeme primjena prirodnih vlakana je tekla bez stručnog znanja. Poslije pada Rimskog carstva primjena ove vrste ojačanog betona pala je u zaborav. Nakon ponovne renesanse betona sredinom XIX vijeka kada je J.L. Lambot u Parizu izgradio čamac od armiranog betona i Monier, francuski baštovan, koji je u cvijetne žardinjere postavio armaturu, u obliku vlakana korišteni su azbest, plastika, staklo i čelik. Prema tome, početak primjene mikroarmiranih betona je kraj XIX vijeka, kada je A. Berand 1874. godine s namjerom da poboljša žilavost betona svojoj recepturi dodao čelične opiljke.

Sa naučno-istraživačkim razvojem mikroarmiranih betona, paralelno se odvija i njihova industrijska primjena. Porter je 1910. godine eksperimentisao sa betonom koji je ojačan čeličnim vlaknima, zatim je Fricklin 1914. godine dobio patent za ojačani beton sa čeličnim ekserima. Zitkewic je 1938. godine takođe patentirao beton sa primjenjenim komadima žice od mekog čelika za ojačavanje betona.

Postavljanje naučne teorije o mikroarmiranom betonu vezane su za tri istraživača a to su Romualdi, Batson i Mandel koji su vršili istraživanja krajem 50-ih i početkom 60-ih godina prošlog vijeka, u cilju određivanja mehaničkih osobina mikroarmiranih betona. Njima bi takođe trebalo dodati i sledeće istraživače koji su dali veliki i značajni doprinos u razvoju mikroarmiranog betona: Parker 1974; Rollings 1981; Vondran 1991; Portland Cement Association (PCA) 1991; American Concrete Institute (ACI) 1997; American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2001; The Concrete Society 1994. Bentur i Midness su 1990 god. objavili da je više od 60% primjene vlaknastog betona upotrijebljeno za armiranje betonskih ploča kao drugi vid armiranja.

Milašinović D. 2015. god. u svom istraživanju reološko-dinamičkog kontinuuma kombinuje reološko-dinamičku analogiju i mehanička oštećenja uzoraka mikroarmiranog betona sa posebnim osvrtom na koeficijent puzanja, Poisson-ov koeficijent i skalarnu varijabilu oštećenja koji su u funkcionalnoj zavisnosti. Monografija Uljarević M. 2013.god. o mikroarmiranom betonu i istraživački rad objašnjava da primjena čeličnih vlakana u masi betona povećava čvrstoće mikroarmiranog betona što je u funkciji učešća količine vlakana. U period od 1987-2004 Uljarević M. istraživao je primjenu mikroarmiranog betona u racionalizaciji tunelskih obloga i na dijelovima hidrotehničkih konstrukcija. Istraživanja koja je vršio Šušteršič J. na hirotehničkim betonima visokih performansi armiranim čeličnim vlaknima pokazala su da podvodna abrazija proporcionalno raste sa povećanjem sposobnosti kompozita da apsorbuje energiju.

Beton armiran čeličnim vlaknima u prošlosti je bio predstavljen za izradu krutih kolovoznih konstrukcija ali su i odgovarajući nedostaci tog betona takođe predstavljeni u dostupnoj literaturi. Propusti primjenjenog mikroarmiranog betona za izgradnju krutih kolovoznih konstrukcija desili su se zbog nedovoljne količine upotrijebljenih vlakana za dizajniranu oblogu. Na osnovu pregleda dosadašnjeg istraživanja može se zaključiti da će buduća ispitivanja u pogledu optimalne primjene i vrste (čeličnih) vlakana u masi betona biti od velikog značaja, pa je u tom svjetlu u okviru predmetne doktorske disertacije vršena ispitivanja na uzorcima oblika cilindara, greda i ploča različite debljine i sa različitim tipovima i procentualnim učešćem mikroarmature. Prikazujući hronološki dosadašnja istraživanja mikroarmiranog betona i dizajniranja njegovih karakteristika pokazalo se da ultra tanke i velike dimenzije ploča sa nedovoljnom količinom i vrstom mikroarmature su podložne pojavi ranih pukotina u uglovima takvih ploča, širokim otvorenim pukotinama i prekomjernim ljuštenjem površine ploča.

U protekle dvije decenije sprovode se eksperimenti u vezi formiranja što boljih mehaničkih i fizičkih karakteristika mikroarmiranog betona. Tako su Sham i Burgoyne 1986. godine dokazali da je primjena odgovarajućeg tipa mikroarmature sa posebnim relacijama L/D odgovorna za glavne karakteristike krutih kolovoznih konstrukcija od mikroarmiranog betona.

Istraživački program sledećih autora: Falkner 1995; Beckett 1990 i 1999. bio je fokusiran na efekte vlakana koje ta vlakna imaju na žilavost i dozvoljeno granično opterećenje pri savijanju

ploče izrađene od mikroarmiranog betona. Tatnall i Kuitenbrouwer 1992. zaključuju da teorijska analiza Westergaarda uspostavljena 1926. koja je bazirana na savijanju betonske grede, neprecizno predviđa pojave pukotina izazvane savijanjem ploča armiranim čeličnim vlaknima. Slično prethodnom, Roesler 1998. u svom istraživanju prikazuje betonsku ploču ojačanu vlaknima i opterećenu statičkim opterećenjem koja je imala povećanu otpornost na savijanje (za 30%) u poređenju sa etalom (bez vlakna). U Sjedinjenim Američkim Državama 1965. godine kompanija Battele Development Co. je dobila patent, pod imenom Wirand, za mikroarmirani beton odnosno za beton ojačan vlaknima, čiji je pronalazač bio Romualdi.

Praktična, masovna proizvodnja betona ojačanog čeličnim vlaknima počela je 1971. godine od strane pomenute firme u SAD. Engleska je preuzela američka iskustva, da bi zatim cijeli niz zemalja prihvatio i počeo proizvodnju i primjenu betona ojačanog čeličnim vlaknima, kao npr. Kanada, Japan, Australija, Novi Zeland. Veliki značaj i doprinos razvoju betona ojačanog vlaknima potvrdio je ACI (American Concrete Institute) organizovanjem jednog od prvih zvaničnih simpozijuma 1973. godine o betonima ojačanim vlaknastim materijalima. Simpozijum je predstavio 15 radova o betonima sa primjenom čeličnih vlakana, 8 radova o betonima sa staklenim vlaknima i jedan sa ojačanjem betona sa ugljenim vlaknima. U septembru 1975. godine održana je RILEM konferencija, u Londonu, koja se bavila isključivo problematikom betona ojačanog čeličnim vlaknima. U njemačkoj literaturi je odomaćen izraz „Stahlfasern in beton” ili “Stahlfaserbeton“, dok englesko govorno područje koristi naziv „Fiber reinforced concrete“, odnosno “Steel fibre reinforced concrete“.

Istraživanje o upotrebi blisko razmaknute čelične žice u masi betona u kasnim 1950-im i ranim 1960-im godinama prošlog vijeka bila je osnova za patent i razvoj mikroarmiranog betona na bazi primjene čeličnih vlakana. Portland Cement Association (PCA) je takođe istraživala beton armiran vlaknima u kasnim 1950-im godinama prošlog vijeka. Dodavanje vlakana u matricu betona je pokazalo da se povećava žilavost tog materijala i da prisustvo mikroarmature utiče na odlaganje pojave prve pukotine u takvom betonu.

Od sredine 1960-ih godina prošlog vijeka mikroarmirani beton se primjenjuje u izgradnji saobraćajnica, podnih ploča industrijskih objekata, vatrostalnih materijala i betonskih proizvoda.

Korisna primjena betona armiranog čeličnim vlaknima je napredovala zahvaljujući razvoju i napretku drugih tehnologija koje prate razvoj, primjenu i ugradnju ove vrste betona. To je doprinijelo upotrebi mikroarmiranog betona u različitim tipovima podzemnih konstrukcija.

U moderno doba, širok spektar inženjerskih materijala (keramika, plastika, cement, gips) uključuju vlakana za poboljšanje kompozitnih svojstva. Poboljšana svojstva podrazumijevaju povećanja zatezne čvrstoće, pritisne čvrstoće, modula elastičnosti, otpora širenju prslina, kontroli pukotina, trajnost, zamor, otpornost na udarce i habanje, skupljanje, širenje, termičke karakteristike i otpornost na vatru.

Eksperimentalna ispitivanja i patenti koji uključuju korištenje diskontinualnog čelika za armiranje elemenata kao što su sječena žica u segmentima i druge vrste metala za poboljšanje svojstva dolaze iz perioda 1910. Tokom ranih 1960-ih godina u Sjedinjenim Državama, sprovedeno je veliko istraživanje za procjenu potencijala čeličnih vlakana kao ojačanje za beton.

Upotreba staklenih vlakana u betonu je doživjela prvi pokušaj u SSSR-u krajem 1950-ih godina prošlog vijeka. Ubrzo, nakon toga uspostavljeno je mišljenje da Priručnik o betonu sa primjenom običnih staklenih vlakana nije za praktičnu upotrebu, jer su staklena vlakna napadnuta i uništena od strane alkalne sredine i cementne paste. Značajan razvojni put bio je usmjeren ka proizvodnji alkalno otpornih staklenih vlakana. To je dovelo do značajne upotrebe ove vrste vlakana za proizvodnju panela za oblaganje građevinskih objekata.

Početni pokušaji razvoja i upotrebe sintetičkih vlakana (najlon, polipropilen) u masi betona nisu bili tako uspješni kao pokušaji primjene čelika ili stakla. Međutim, bolje razumijevanje koncepta proizvodnje vlakana, nove metode izrade i nove vrste organskih vlakana doveli su istraživače do zaključka da i sintetička i prirodna vlakana mogu biti uspješno primjenjena u masi betona. Na osnovu prethodno izloženog istorijskog pregleda razvoja mikroarmiranog betona, u sledećoj tabeli dat je prikaz prednosti i nedostataka različitih sistema armiranja do kojih je autor došao.

Tabela 2.1. Pregled prednosti i nedostataka primjene klasične armature i mikroarmature

Vrsta armature, mikroarmature	Prednosti	Nedostaci
Konvencionalni način armiranja	1.Pruža strukturalni integritet konstrukcije 2.Izuzetno rasprostranjen način armiranja konstrukcija 3.Povoljna i isplativa ugradnja armature	1. Može biti teško izvodljiva u slučaju zahtjevne geometrije konstrukcije 2.Nije pogodna za primjenu izuzetno tankih konstrukcija/konstruktivnih elemenata
Vlakanasta armatura	1.Može se dodati tokom spravljanja betona	1.Rijetko se koristi kao primarna armatura
Polimerna vlaknasta armatura	1.Dobra izdržljivost s obzirom na koroziju 2. Može biti upotrijebljena u tankim elementima	1.Elementi mogu biti degradirani u dodiru sa soli 2.Tehnologija proizvodnje ove vrste vlakana može da bude izuzetno skupa 3.Konstrukcije/dijelovi konstrukcije dožive brzo krti lom 4. Termičko širenje vlakana je različito od betona, pa je moguće zadržavanje vode 5.Ograničena otpornost na požar
Tekstilna vlaknasta armatura	1.Može biti primjenjena u različitim oblicima 2.Dozvoljena upotreba samo za tanke konstrukcije	1.Betonske mješavine su ograničene na trajnost i nosivost 2.Potrebno je poboljšati tehnološki razvoj vlakana
Čelična vlaknasta armatura	1.Dobre mehaničke karakteristike mikroarmature 2.Dobro razvijena tehnologija proizvodnje vlakna 3. Jeftina proizvodnja vlakna	1. U nekim zemljama vlasti ne dozvoljavaju miješanje sa konvencionalnim načinom armiranja u situacijama gdje je moguć dodir sa hlorom 2.Moguća pojava korozije na površini
Staklena vlaknasta armatura	1.Visoka čvrstoća betona	1.Čvrstoća opada sa vremenom 2.Moguća osjetljivost na alkalne sredine

Polimerna vlaknasta armatura	1.Nema korozije	1.Nizak Young-ov modul elastičnosti 2.Beton osjetljiv na puzanje 3.Povišene temperature mogu izazvati probleme u toku eksploatacije
Karbonska vlakna	1.Beton otporan na alkalnu sredinu 2.Oblik konstrukcije/ dijela konstrukcije vrlo postojan 3.Visoka čvrstoća betona	1.Teško je postići dobro dispergovana karbonska vlakna u matrici betona
Prirodna vlaknasta armatura	1.Dostupna u zemljama u razvoju	1.Izuzetno je teško postići zahtijevani kvalitet vlakana u betonskoj mješavini 2. Vlakna su higroskopna 3.Procjena pouzdanosti betonske mješavine ne može biti precizno određena

Na osnovu predhodno izloženog tabelarnog pregleda, može se zaključiti da klasični način armiranja i dalje prednjači u pogledu zahtjevnih građevinskih konstrukcija ili dijelova konstrukcija koje su izložene složenim vrstama opterećenja. Dalje je vidljivo da alternativne tehnike armiranja, posebno armiranje čeličnim vlaknima, može biti uključeno kao dodatni strukturni integritet u pogledu žilavosti betona.

Jedan od zadataka predmetne disertacije je bio da se prikaže mogućnost nosivosti obloge od mikroarmiranog betona kao i njeno poređenje sa oblogom od klasičnog betona. Izabranom recepturom betona, laboratorijskim ispitivanjem predmetnog mikroarmiranog i klasičnog betona, kao i proračunom tunelske obloge pomoću dobijenih parametara iz laboratorije, ustanovljeno je da su bliske nosivosti i totalna pomjeranja dvije obloge - od mikroarmiranog i klasičnog betona.

2.2. Mikroarmirani beton, osnovne karakteristike matrice i vlakana

Mikroarmirani beton predstavlja savremeni i složeni kompozitni materijal koji je dobijen zahvaljujući ojačanju cementne matrice pomoću ravnomjerno dispergovanih različitih vrsta vlakana (čeličnih, sintetičkih, etilenskih, polipropilenskih, staklenih...) u masi betona. Ovako predstavljen, mikroarmirani beton spada u složenu vrstu betona gdje se jasno mogu razlikovati dvije komponente: osnovni materijal-matrica betona i dodatni materijal-mikroarmatura. Zadatak vlakana je višestruk a njihov najveći doprinos je povećanje čvrstoće i duktilnosti kompozita uz istovremeno smanjenje zapreminskih deformacija skupljanja.

Polazeći od činjenice da se dodavanjem vlakana u masi betona postižu izuzetne čvrstoće i duktilnosti novog, mikroarmiranog betona, u disertaciji je postavljen novi novi izazov o mogućnostima modeliranja i primjene novog, poboljšanog mikroarmiranog betona. U zavisnosti od vrste konstrukcije kao i njenog opterećenja primjena mikroarmiranog betona je moguća u pojedinim konstruktivnim elementima bez upotrebe klasične armature koja bi preuzela primarna zatežuća naprezanja, dok bi sama matrica betona preuzela napone pritiska. Tako se postiže da novi kompozit (beton+mikroarmatura) nije samo betonski element koji preuzima napone pritiska, već se ponaša kao element koji prihvata napone zatezanja. Budući, da je za postizanje takvog ponašanja mikroarmiranog betonskog elementa prvenstveno potrebno odabrati prikladnu vrstu vlakana, količinu vlakana, upotrijebljeni agregat, polje istraživanja optimalne mješavine mikroarmiranog betona koja daje najmanje loše rezultate, predstavlja širok dijapazon budućih eksperimenata. U tom svjetlu, u okviru predmetne doktorske disertacije sprovedeno je eksperimentalno istraživanje da bi se upotpunilo polje primjene mikroarmiranih betona u građevinskim konstrukcijama ili dijelovima konstrukcija.

Mikroarmirani beton je baziran na principu da će cjelokupni materijal uz prisustvo minimuma defekata, kao što su mikropukotine, pore, prilično uravnotežen odnos L/D i maksimalne veličine upotrijebljenog zrna, biti sposoban ostvariti veći procenat potencijalne čvrstoće definisane njegovim visokokvalitetnim upotrijebljenim komponentama: agregat, cement, voda, vlakna i aditivi. Prema tome, jasno je vidljivo da se razvoj i poboljšanje karakteristika mikroarmiranog betona može posmatrati kroz sledeće principe:

- Povećanje gustine betona se postiže optimizacijom granulometrijskog sastava
- Povećanje homogenosti betona se postiže eliminisanjem krupnog agregata
- Povećanje duktilnosti se postiže primjenom čeličnih vlakana
- Povećanjem athezije na spoju beton-vlakno
- Razvoj naprednih tehnologija za proizvodnju mikroarmiranog betona

Upotreba aditiva omogućava bolju obradljivost i ugradljivost mikroarmiranog betona. Ako se tome doda i optimizacija granulometrijske krive, tada dobijamo beton sa smanjenim sadržajem vode, što dovodi do redukovanja poroznosti betona. Smanjena poroznost mikroarmiranog betona čini ga otpornim na dejstvo vode, što je izuzetno važno kod primjene ove vrste betona u hidrotehničkim konstrukcijama pri udarnom opterećenju i pojavi kavitacije. Na ovaj način osiguravamo produženu trajnost konstrukcija ili dijelova konstrukcija od mikroarmiranog betona. Svi, prethodno nabrojani principi razvoja, koje je potrebno pratiti i poštovati, u sebi sadrže veliki dio promjenljivih faktora koji gotovo svaki eksperiment i istraživanje čine jedinstvenim i značajnim za dalji razvoj i upotrebu mikroarmiranog betona.

Analiza mikroarmirane betonske mješavine sa čeličnim vlaknima podrazumijeva važnu činjenicu o osiguranju Standarda proizvodnje ovog betona, Standarda transporta i implementacije betona u svježem stanju, kao i osiguranje betonske mješavine od agresivnih uslova i okruženja u kojem takav betonski kompozit može biti izložen.

Teorijski princip razvoja mikroarmiranog betona baziran je dakle na mehaničkim i fizičkim karakteristikama matrice betona i vlakana čija mješavina predstavlja jedinstveni kompozit–mikroarmirani beton.

2.3 Glavni parametri vlakana mikroarmiranog betona

Savremena tendencija razvoja betona ojačanih vlaknima datira od 60-ih godina XX veka. U prvo vrijeme korištena su isključivo čelična vlakna dobijena sječenjem prave i glatke žice. Armiranje betonske matrice čeličnim vlaknima doprinijelo je povećanju žilavosti i duktilnosti a u nešto manjoj mjeri i rastu čvrstoće pri pritisku i savijanju ove vrste kompozita. Razvoj mikroarmiranog betona praćen je i definisanjem osnovnih parametara vlakana koji utiču na kvalitet betona. To su:

- količina vlakana, tj. masa (m_v – izražena u kg/m^3) ili
- zapremina vlakana (V_v – izražena u procentima u odnosu na ukupnu zapreminu svježe mješavine),
- faktor oblika (L/D) koji predstavlja odnos dužine (L) i prečnika (D) vlakana, najčešće izražen u mm/mm .
- orijentacija vlakana u masi betona
- oblik, površinska obrada, zatezna čvrstoća vlakana

Zahvaljujući prethodno navedenim parametrima koje reprezentuju vlakna u masi betona, danas je pred istraživače postavljen veliki broj novih eksperimenata. Na osnovu rezultata tih eksperimenata i naučnih metoda dolazimo do poboljšane primjene mikroarmiranog betona u različitim dijelovima građevinskih konstrukcija. Zahvaljujući naprednim tehnologijama, izabranim naučnim metodama i postignutim eksperimentalnim rezultatima, danas možemo govoriti o zajedničkoj primjeni klasičnog načina armiranja i betona armiranog vlaknima. Ovakav pristup armiranju je moguć kada i funkcionalno i ekonomski opravdava svoju primjenu.

2.3.1 Vrste vlakana

Na osnovu porijekla vlakna možemo podeliti na:

- vlakna prirodnog porijekla i
- vlakna vještačkog porijekla

S obzirom da su u okviru eksperimentalnog programa doktorske disertacije korištena isključivo vještačka vlakna, u ovom dijelu rada će se dati opis i pregled vještačkih vlakana.

2.3.2 Vlakna vještačkog porijekla

U oblasti građevinske struke rasprostranjena je primjena čeličnih vlakana, dok veliku grupu vještačkih materijala koji se koriste u ove svrhe čine sintetički materijali karaktera polimera (kao što su polipropilen, polietilen, poliester, poliamid,...). Prednosti ovih vlakana u odnosu na čelična ogledaju se u značajnom smanjenju dilatacija skupljanja, redukciji izdvajanja vode na površini betona, lakšoj ugradljivosti i obradljivosti svježih mješavina. Sa druge strane, čelična vlakna imaju znatno bolje mehaničke karakteristike, naročito modul elastičnosti, u poređenju sa većinom polimernih vrsta vlakana. Primjena karbonskih vlakana doživjela je naglu ekspanziju nakon pronalaska postupka dobijanja ovog materijala iz nafte, što je višestruko snizilo proizvodne troškove. Ova vlakna privukla su naročitu pažnju stručnjaka zbog svojih visokih mehaničkih karakteristika (čvrstoće i modula elastičnosti) u odnosu na većinu drugih sintetičkih vlakana.

U novije vrijeme izuzetno su rasprostranjena vlakna mineralnog porijekla od kojih su najznačajnija staklena vlakna. Jedan od glavnih nedostataka ovih vlakana je njihova trajnost u uslovima alkalne sredine, ali je taj nedostatak uspješno riješen razvojem novih vrsta alkalno-rezistentnog stakla, kao i novih tipova aditiva za modifikovanje PH vrijednosti cementne matrice.

U vlakna vještačkog porijekla ubrajamo:

- čelična (od običnog ili nerđajućeg čelika)
- polimerna (polipropilenska, polietilenska, karbonska, najlonska, itd.)

- mineralna (staklena, azbestna, itd.)

Kao ilustracija izloženog o važnijim svojstvima vještačkih tipova mikroarmature, u okviru naredne tabele br.2.2. dat je uporedni pregled osnovnih fizičko–mehaničkih, deformacionih i eksploatacionih karakteristika najčešće korištenih tipova vještačkih vlakana u građevinarstvu.

Tabela 2.2. Važnija svojstva različitih tipova vlakana

Vrsta vlakana	Specifična masa γ_s [g/cm ³]	Čvrstoća pri zatezanju f_z [MPa]	Modul elastičnosti G [GPa]	Izduženje pri kidanju ϵ_{uk} [%]	Maksimalna temperatura T [°C]	Otpornost u alkalnoj sredini
Staklena (AR)	2,5-2,7	1500- 3700	75	1,5-3,5	-	otporna
Polipropilenska	0,9	300-750	3,5-12,0	6,0-25,0	~160	otporna
Poliestarska	1,4	800-1100	10,0-19,0	$\leq 5,0$	~240	neutralna
Polietilenska	0,9	20-30	0,12-0,40	300-700	~100	neutralna
Polivinil - alkohol	1,3	800-900	26,0-30,0	5,0-7,5	~240	otporna
Akrilna	1,1-1,2	600-900	15,0-20,0	6,0-9,0	~150	otporna
Najlonska	1,1-1,4	700-800	7,0-13,0	16,0-20,0	~400	neutralna
Vještaka svila	1,5	400-600	6,0-7,0	10,0-25,0	-	-
Karbonska	1,6-1,9	550-2600	30-230	1,0-2,0	3000	otporna
Celulozna	1,2-1,5	200-500	5,0-40,0	$\leq 3,0$	-	neutralna
Pamučna	1,5	400-700	4,0-5,0	3,0-10,0	-	neutralna

U okviru eksperimentalnog rada doktorske disertacije laboratorijski su ispitana osnovna svojstva i karakteristike primjenjene vrste i tipova mikroarmature.

Upotrijebljena čelična vlakna su izrađena od čistog čelika, kao i mješavine čelika i aluminijuma. Ova osobina neuniformnosti materijala primjenjenih vlakana uticala je na konačne osobine mikroarmature, što je vidljivo iz naredne tabele br. 2.3. ali je istovremeno uticala i na konačne fizičko-mehaničke karakteristike mikroarmiranog kompozita.

Tabela 2.3. Osobine primjenjenih čeličnih vlakana u okviru eksperimenta

Osobine	SF50	SF31	SF25
Oblik			
Dužina mm	50	31	25
Prečnik mm	0,75	0,75	0,75
Faktor oblika L/D	67	41	34
Gustina kg/m³	7100	7350	7400
Zatezna čvrstoća MPa	1150	1250	1300

Zatezna čvrstoća upotrijebljene čelične mikroarmature se kreće u rasponu od 1150 N/mm² i 1300 N/mm². Dužina primjenjenih vlakana varira u opsegu: 50, 31 i 25mm, sa prečnikom od 0,75 mm. Geometrijski posmatrano upotrijebljene su sledeće vrste vlakana:

- čelična vlakna sa zakrivljenim krajevima, dužine 50 mm i 31 mm i istog prečnika 0,75 mm
- talasasta čelična vlakna dužine 25mm i prečnika 0,75 mm.

Osnovne karakteristike vlakana koje utiču na karakteristike betona su:

- oblik vlakna
- zatezna čvrstoća vlakana
- faktor oblika, (L/D) vlakana.

Upotrijebljena čelična vlakna su vrsta građevinskog materijala koji znatno doprinosi ojačanju betona a danas su svestrano prihvaćena zbog izuzetnih prednosti koje pružaju tom betonu. Prednosti čeličnih vlakana koje se ogledaju u njihovoj primjeni u masi betona su:

- zamjenjuju armaturnu mrežu
- jednostavnija i brža ugradnja betona
- smanjeni troškovi ugradnje
- bolja athezija sa betonom
- sprečavanje pojave pukotina u betonu
- veća mehanička otpornost na udarce
- beton koji je trajniji i otporniji na dinamičko-reološke uticaje

Prilikom pripreme mikroarmiranog betona posebna pažnja je bila posvećena raspršivanju vlakana u masi betona, jer se u slučaju loše ugradnje smanjuje modul elastičnosti kao i čvrstoća konačnog proizvoda-mikroarmiranog betona.

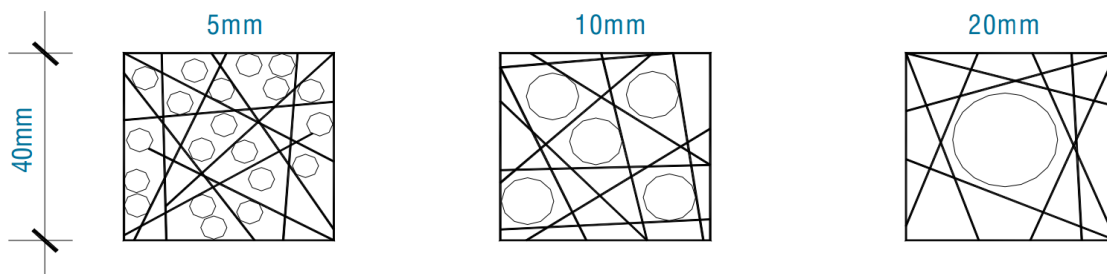
2.4. Agregat

Teorijska osnova mikroarmiranog betona zasnovana je na fizičkim i mehaničkim karakteristikama matrice i vlakana. S obzirom da napone pritiska prima matrica betona, to je potrebno posvetiti posebnu pažnju prilikom modeliranja i izbora granulometrijske krive koja će biti pogodna za spravljanje mikroarmiranog betona. Važno je istaći da je odnos veličine maksimalno upotrijebljenog zrna agregata i upotrijebljene dužine čeličnog vlakna od velike važnosti za konačan proizvod-mikroarmirani betonski kompozit. To znači da je upotrijebljeno vlakno 2-3 puta duže od veličine maksimalno upotrijebljenog zrna agregata.

U mikroarmiranim betonima primjenjuju se kako obični agregati (agregati normalne težine), tako i laki agregati. Najčešće se upotrebljava agregat sa nominalno najkrupnijim zrnom veličine 16mm. Sa povećanjem nominalno najkrupnijeg zrna (d_{max}), javljaju se teškoće pri miješanju vlakana i teško je postići ravnomjerno dispergovana vlakna u matrici betona. Na slici br.2.1. šematski je prikazan uticaj povećanja maksimalnog zrna agregata (d_{max}) na raspoređivanje

vlakana u svježem betonu. Ograničavanjem maksimalne veličine zrna agregata $d_{\max}$, povećavamo obradljivost i smanjenje mogućnosti pojave vlakana u "grudvicama".

Prisustvo vlakana u "grudvicama" je pojava koja je vidljiva u slučaju smjese sa diskontinualnom granulometrijskom krivom i/ili relativno malom količinom finog agregata i to je razlog zbog čega važe preporuke povećanja finog materijala ($d < 2\text{mm}$), u odnosu na ukupnu količinu agregata. Druga teorema, na osnovu istraživanja, jeste da se odnos zapremine finog agregata i zapremine ukupnog agregata moraju prilagoditi tako da se postignu optimalne gustine mješavine. Gustina kompozita se smanjuje sa povećanjem obima vlakana, kao i sa smanjenjem sadržaja finog agregata i/ili povećanjem odnosa dužine i prečnika vlakana (L/D). U zavisnosti od obima vlakana, optimalna gustina je dostignuta kada je odnos zapremine finog i ukupnog agregata u obimu 40 i 60%.

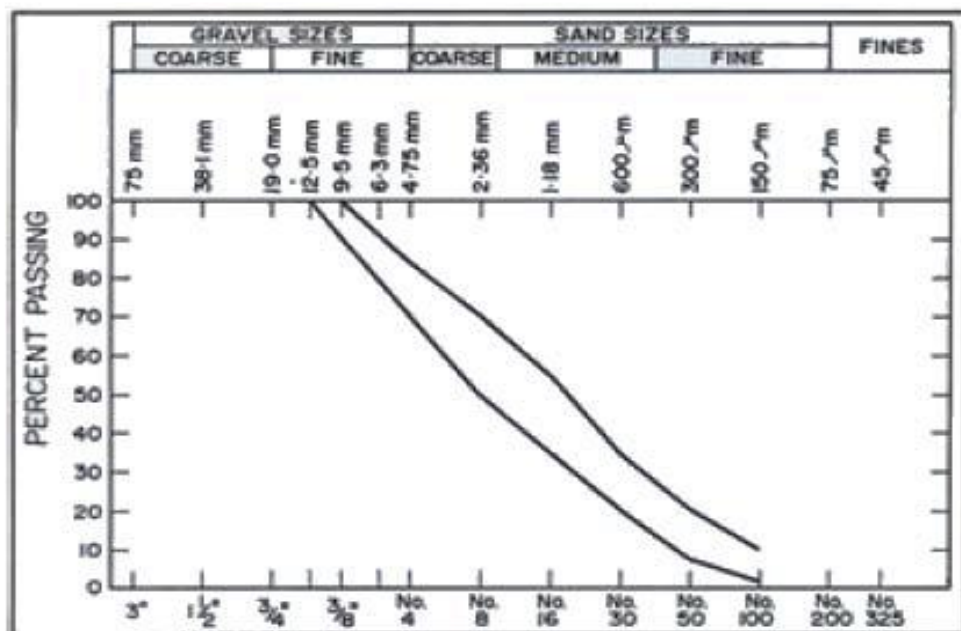


*Sl. 2.1. Uticaj maksimalne veličine zrna na distribuciju i orijentaciju vlakana
(Johnston, 1996; Kooiman, 2000)*

Prema ACI standardu, za izradu mikroarmiranih betona sa čeličnim vlaknima u većini slučajeva u upotrebi je granulometrijska kriva br. 2. koja je data na slici br.2.2. sa maksimalnim prečnikom zrna agregata od 10 mm. Prema ovoj granulometrijskoj mješavini osnovna mješavina agregata sadrži između 20 i 35% agregata od 10-5 mm. Gradacija br. 3. Prema standardu ACI, koja ima maksimalno zrno agregata 20 mm, rijetko se upotrebljava za beton armiran čeličnim vlaknima.

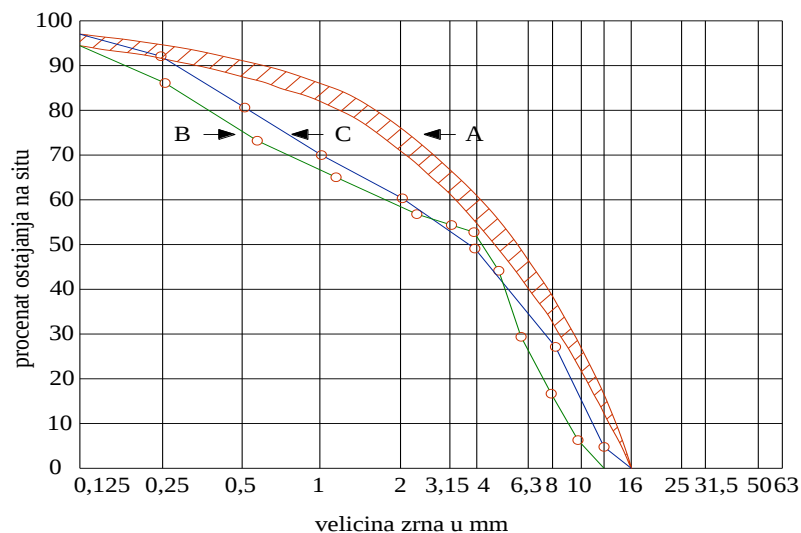
Tabela 2.4. Granulometrijske krive prema ACI standardu

VELIČINA OTVORA STANDARDNE KVADRATNE MREŽE [mm]	TEŽINSKI PROCENAT KOJI PROLAZI KROZ SITA		
	Granulometrijska kriva br. 1	Granulometrijska kriva br. 2	Granulometrijska kriva br. 3
19	-	-	100
12	-	100	80 - 95
10	100	90 - 100	70 - 90
4,75	95 – 100	70 - 85	50 - 70
2,4	80 -100	50 - 70	35 - 55
1,2	50 – 85	35 - 55	20 - 40
0,6	25 – 60	20 - 35	10 - 30
0,3	10 – 30	8 - 20	5 - 17
0,15	2 – 10	2 - 10	2 - 10



Sl. 2.2. Granulometrijske krive za mikroarmirani beton prema ACI standardu

Na sl. 2.3. predstavljena je kriva prosijavanja prema BAS-Standardu, za maksimalno zrno agregata 16mm, pri čemu se postižu betoni visokih otpornosti.



Sl. 2.3. Granulometrijske krive za mikroarmirani beton prema BAS Standardu

Za granulometrijsku krivu A dobijaju se betoni izuzetnih karakteristika. S obzirom da je u stvarnosti to izuzetno teško realizovati, nastoji se dobiti granulometrijska kriva između idealne krive “A” i krivih “B” ili “C”.

Funkcionalna zavisnost veličine maksimalnog zrna agregata u mješavini i dužina primjenjenih vlakana za ojačanje matrice ne mogu se zanemariti. Naime, naprijed navedeno značajno utiče na obradivost betonske mješavine.

Na osnovu iznesenog o agregatu koji se koristi za izradu mikroarmiranog betona, može se zaključiti da bi krive prosijavanja trebalo da budu kontinualne jer povećano prisustvo sitne frakcije izaziva pretjerano skupljanje betona dok povećana količina krupnije frakcije dovodi do slabije athezije između zrna i upotrijebljenog vlakna.

2.5. Cement

Primjena čeličnih vlakana u matrici betona utiče na izbor vrste cementa ili na karakteristike cementa koji će biti primjenjen. Postoje tri osnovna kriterijuma važnih hemijskih reakcija koji se odvijaju u betonskoj mješavini a zavise od vrste izabranog cementa. To su:

- tražena snaga cementa ili stepen razvijanja snage cementa,
- aspekt trajnosti i
- maksimalna dozvoljena disipacija toplote (hidratacija).

Karakteristike cementa u reakciji s vodom su određene sadržajem i finoćom cementa. U mješavinama mikroarmiranog betona sa prisustvom čeličnih vlakana preporučuje se povećanje težine cementa približno za 10% u odnosu na procentualno učešće cementa u mješavini klasičnih betona. Važno je istaći potrebu da se ispuni unutrašnja površina matrice betona finom cementnom pastom, da obavije čelična vlakna i tako doprinese što boljoj atheziji matrice i vlakana. Povećanjem procentualnog učešća cementne paste u mješavini mikroarmiranog betona povećava se athezija između vlakna i upotrijebljenog agregata a time se poboljšava obradivost betonske mješavine.

2.6. Voda

Voda predstavlja važnu komponentu svake betonske mješavine jer je isključivo sa vodom moguće razviti proces jačanja cementa. U situaciji kada je potrebno utvrditi količinu vode uvijek dolazi do sukoba između potrebe za aditivima (za poboljšanje obradivosti) i prirodne namjere da se smanji vodocementni faktor. Ovo je posebno važno za trajnost i ekvivalent čvrstoće betona.

Budući da je zapremina cementne paste mikroarmiranog betona povećana u odnosu na mješavinu klasičnog betona, količinu vode bi trebalo takođe uvećati. Ovo povećanje ne mora smanjiti kvalitet kompozitnih materijala. Vodo-vezivni faktor (WBF) mora biti stalno zadržan tako da količina potrebne vode mora biti proporcionalno povećana u odnosu na količinu upotrijebljenog cementa. Aditiv (superplastifikator) često se koristi u slučaju potrebe za manjim vodo-vezivnim faktorom koji će osigurati relativno visoke čvrstoće i produžiti trajnost betona.

2.7. Zapremina vazduha

Ispitivanja su pokazala da se zapremina vazduha u betonskim mješavinama kreće od 1,5 do 2%. U slučaju analize smjese mikroarmiranog betona sa čeličnim vlaknima, zapremina vazduha varira od 4 do 8%. Međutim, kada je dobro pripremljena kompozitna mješavina (matrica + vlakna), zapremina prisutnog vazduha će dostići vrijednosti koje se javljaju u klasičnom betonu.

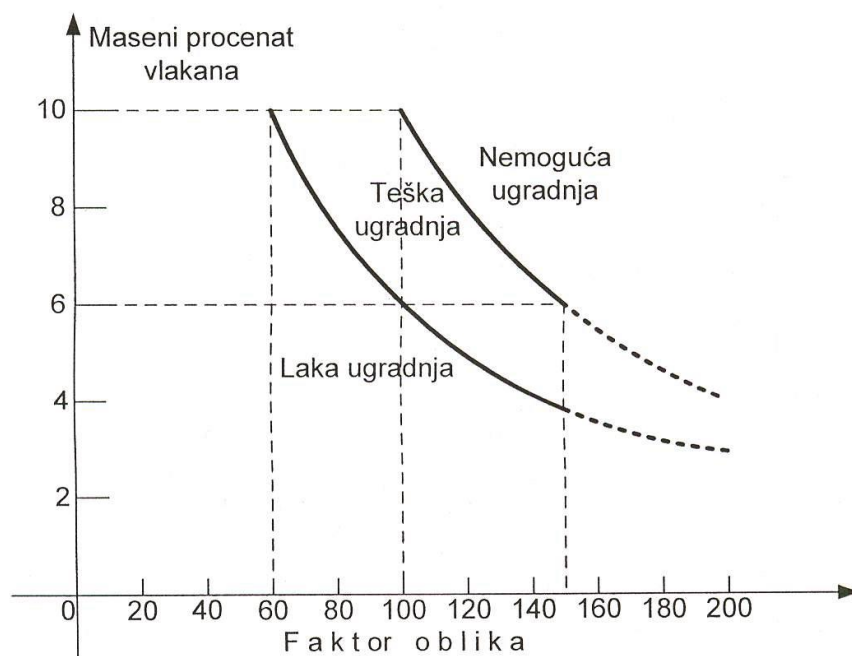
3. PRIPREMA I OBRADLJIVOST MIKROARMIRANIH BETONA

3.1. Mješavina mikroarmiranog betona

Prilikom spravljanja mikroarmiranih betona vrijeme miješanja betonske mješavine se produžava u odnosu na uobičajeni postupak spravljanja klasičnog betona (bez dodatka vlakana). Ovo se objašnjava činjenicom da je u mikroarmiranoj mješavini potrebno obezbijediti ravnomjernu disperziju vlakana u svim pravcima i u cijeloj zapremini mješavine.

Primjena monofilamentnih (pojedinačnih) vlakana više utiče na promjenu ugradljivosti i obradljivosti svježih mješavina nego fibrilizovana (međusobno povezana) vlakna. Isti efekat se postiže i prilikom upotrebe vlakna manjeg prečnika i većih dužina tj. vlakana sa većim faktorom oblika (L/D). Dakle, sa porastom faktora oblika broj vlakana u jedinici zapremine betona se značajno povećava a posebno ako je riječ o monofilamentnim vlaknima.

Konzistencija osnovnog kompozita se značajno mijenja dodavanjem odgovarajuće količine vlakana (postaje inertnija i kruća) i sa povećanjem faktora oblika upotrijebljenih vlakana (L/D), kao i sa porastom nominalno najkrupnijeg zrna agregata (d_{max}).



Sl. 3.1. Uticaj faktora oblika (L/D) na obradljivost betonske mješavine

Prisustvo vlakana u masi betona značajno se unapređuju karakteristike kao što su:

- povećanje čvrstoće pri zatezanju, savijanju i smicanju
- povećanje žilavosti (duktilnosti) i otpornost na termičke promjene
- smanjenje mogućnosti pojave prslina usljed skupljanja
- odlaganje pojave prslina i njihovo ograničavanje usljed povećanja opterećenja
- povećana otpornost na dinamičke uticaje, habanje i otpornost na hemijske uticaje
- poboljšanje karakteristika svježe betonske mase

Prilikom izbora vlakana koja se dodaju matrici betona modul elastičnosti upotrijebljenih vlakana trebalo bi da bude veći od modula elastičnosti čistog betona. Ovo pravilo je u potpunosti ispunjeno u slučaju čeličnih, karbonskih, staklenih vlakana, dok u slučaju vlakana od celuloze, najlona, polipropilena i nekih drugih to nije slučaj.

Čvrstoće pri zatezanju i izduženja prilikom kidanja takođe moraju da budu veća od istih u betonu. Prisustvo osobine tečenja vlakana takođe je bitno jer u slučaju izostanka tečenja dolazi

do relaksacije napona u njima. Naime, prilikom upotrebe vlakana organskog porijekla javljaju se velika tečenja. Ako se tome doda relativno nizak modul elastičnosti potrebno je voditi računa da ne dođe do velikih deformacija u takvom elementu. Pri upotrebi mikroarmature sa niskim modulom elastičnosti i visokim Poasonovim koeficijentom dolazi do pojave velikih poprečnih napona i deformacija. Kao rezultat toga javljaju se pukotine i izvlačenje mikroarmature iz matrice betona.

3.2. Atezijska mikroarmatura i betona

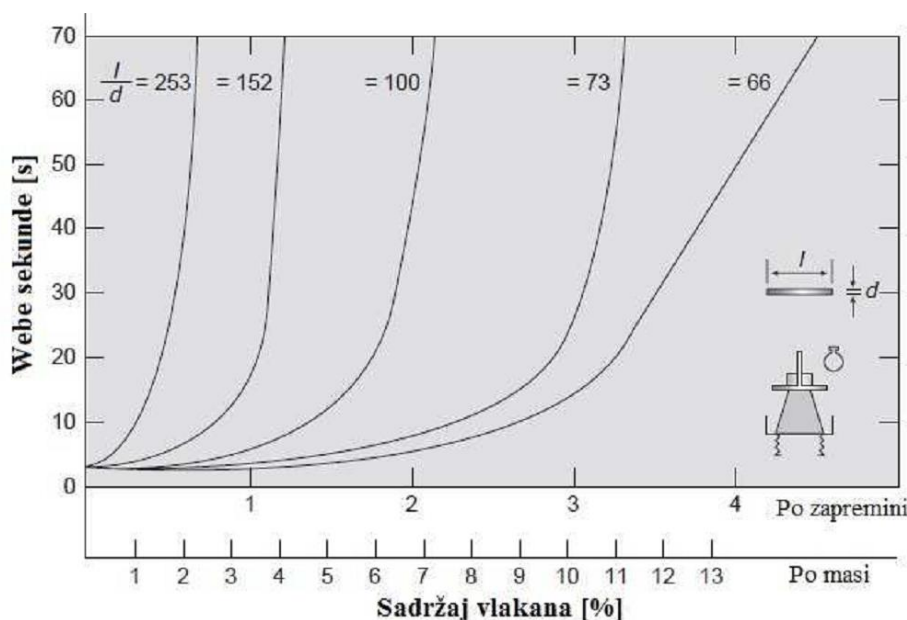
Vlakna se dodaju u masu betona da bi nosivi mehanizam novog, unaprijeđenog betona ostvario prenos naprezanja sa matrice na vlakna, što se postiže dobrom atezijom između vlakna i matrice betona. Oba materijala i matrica i vlakno prenose naprezanje sve dok matrica ne pukne. Poslije pucanja matrice, naprezanja na mjestu nastale pukotine preuzimaju vlakna. Zbog toga je izuzetno bitna pravilna tehnologija izrade vlaknastog betona da bi vlakna bila raspršena u matrici. Do loma redovno dolazi poslije popuštanja veze između vlakana i matrice. U ovakvom mehanizmu lom je duktilan. Ako bi do loma došlo zbog iscrpljenosti vlakna napregnutih na zatezanje, lom bi također bio duktilan zbog velikih mogućnosti plastičnih deformacija čeličnih vlakana. U suprotnom, možemo govoriti i o “krtom” lomu koji se dešava usljed nedovoljnog prisustva čeličnih vlakana u masi betona i nemogućnosti vlakana da pri pojavi pukotine prihvati sva nastala zatežuća naprezanja koja su prije loma bila raspoređena na matricu i vlakna.

Pojačana atezija između mikroarmature i betona postiže se pravilnim izborom oblika, dužine i prečnika vlakna čime se dobija poboljšano sidrenje u masi betona. Shodno tome, izbor vlakana u okviru eksperimentalnog rada predmetne disertacije varirao je od vlakana sa zakrivljenim krajevima do talasastih, čeličnih vlakana da bi se što bolje prikazale razlike koje su se pojavile u karakteristikama nosivosti mikroarmiranih betona.

Vlakna se dodaju betonu u cilju poboljšanja fizičkih, mehaničkih, deformacionih, reoloških, tehnoloških svojstava ovog kompozita, kao što su: čvrstoća pri zatezanju, čvrstoća pri savijanju, udarna otpornost, deformacije skupljanja, otpornost na ciklični zamor, trajnost u

različitim uslovima sredine. Da bi se postigli navedeni ciljevi, suštinski je važno ostvariti najbolju moguću interakciju između vlakana i matrice betona.

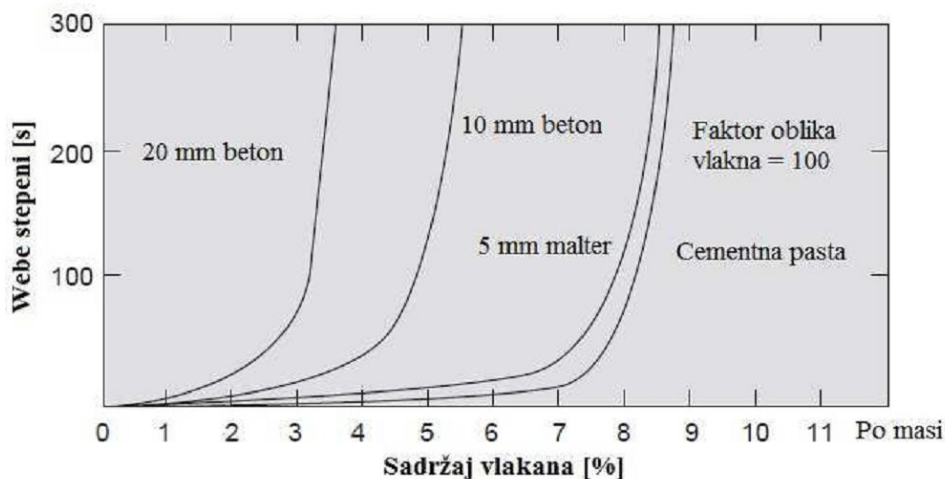
Poznato je da dodatak bilo koje vrste vlakana običnom betonu smanjuje njegovu obradljivost. Bez obzira na tip vlakana, gubitak obradljivosti je proporcionalan zapremini koncentracije vlakana u betonu. Pošto vlakna doprinose boljoj koheziji svježe betonske mase, metoda slijeganja pomoću Abramsovog konusa nije pogodna za ocjenu obradljivosti. Smatra se da je Webe metoda pogodnija za procjenu obradljivosti betona sa mikrovlaknima.



Sl. 3.2. Uticaj faktora oblika vlakana na konzistenciju betona

Na slici br. 3.2. prikazan je uticaj sadržaja vlakana i faktora oblika vlakana na konzistenciju betona određenu Webe metodom. Sa aspekta povećanja čvrstoće i žilavosti betona poželjno je da vlakna imaju visoku vrijednost faktora oblika, kao i visoku koncentraciju vlakana. Sa druge strane, kao što se može vidjeti sa dijagrama, sa povećanjem ove dvije promjenljive smanjuje se obradljivost betonske mješavine. Rezultati ispitivanja su pokazali da čelična vlakna sa faktorom oblika većim od 100 imaju tendenciju da proizvedu efekat poznat kao „uvijanja naviše“ pri koncentraciji vlakana od 2% ukupne

zapremine. Svakako, potreban i dovoljan uslov se mora postići odgovarajućim izborom količine i faktora oblika vlakana. Dakle, količina čeličnih vlakana je ograničena na 3% po zapremini, sa maksimalnim faktorom oblika $L/D=100$.



Sl. 3.3. Uticaj krupnoće agregata i sadržaja vlakana na konzistenciju betona

Pri sadržaju vlakana u količini 2% u odnosu na ukupnu zapremnu betonske mješavine, obradljivost mikroarmiranog betona se naglo smanjuje sa povećanjem krupnoće agregata, slika br. 3.3. Agregate krupnije od 19 mm ne bi trebalo koristiti za izradu mikroarmiranih betona sa čeličnim vlaknima. Takođe je potrebno naglasiti da je u spravljanju mikroarmiranih betona potrebno upotrijebiti više od 25% po masi agregata zrna krupnije od 9 mm. Postizanje dobre obradljivosti betonske mase postiže se primjenom aeranata, plastifikatora, većom količinom cementne paste i primjenom spojenih vlakana.

Ispitivanje čvrstoće na pritisak na betonima sa čeličnim vlaknima ukazuju na izvjesno poboljšanje ove karakteristike koja u izvjesnim slučajevima prelazi 25%. Ponašanje mikroarmiranih kompozita izloženih naponima pritiska razlikuje se od onog koje odlikuje klasične betone bazirane na istoj cementnoj matrici.

Promjene vrijednosti modula elastičnosti mikroarmiranih betona su primjetne u odnosu na kompozite spravljene bez vlakana, nezavisno od vrste i količine ovih dodataka.

Sa druge strane, mikroarmatura uglavnom doprinosi značajnom porastu duktilnosti (žilavosti) betona, kako prilikom upotrebe čeličnih, tako i u slučaju primjene ostalih vještačkih vlakana: polimernih, karbonskih, staklenih i drugih. Eventualni porast čvrstoće pri pritisku uslovljen dodatkom vlakana, zavisi od većeg broja parametara od kojih su najvažniji: vrsta vlakana, količina vlakana, faktor oblika (L/D) i sastav matrice betona.

Jedan od osnovnih razloga upotrebe mikroarmature u masi betona jeste nastojanje da se poboljša njegova čvrstoća pri zatezanju, odnosno čvrstoća pri savijanju. Slično kao i kod čvrstoće pri pritisku, najvažniji parametri koji utiču na čvrstoću pri savijanju a koji se tiču samih vlakana su: vrsta vlakana, količina vlakana, faktor oblika (L/D) i sastav betonske matrice.

Čelična vlakna više doprinose porastu čvrstoće pri savijanju u poređenju sa ostalim vlaknima, što je razumljivo imajući u vidu njihova naprednija mehanička svojstva. Vlakna veće dužine i većih vrijednosti faktora oblika (L/D) obezbjeđuju u ovom smislu bolje karakteristike mikroarmiranih kompozita. Isto tako, povećanje količine vlakana u jedinici zapremine svježe mješavine, do određene mjere, doprinosi povećanju čvrstoće pri savijanju, što će se jasno vidjeti u dijelu eksperimentalna istraživanja. Dodatak vlakana betonu utiče na vrijednost statičkog modula elastičnosti. Sa povećanjem sadržaja vještačkih vlakana npr. polipropilenskih vlakana u masi betona dolazi do smanjenja statičkog modula elastičnosti. Ovo se objašnjava činjenicom da je modul elastičnosti polipropilenskih vlakana znatno manji (oko 9 puta) od modula elastičnosti betona, odnosno cementne matrice. Nasuprot tome, ispitivanja mikroarmiranih betona sa vlaknima sa visokim modulom elastičnosti, kao što su čelična vlakna, su pokazala povećanja statičkog modula elastičnosti. Ustanovljeno je da se modul elastičnosti mikroarmiranog betona sa čeličnim vlaknima povećava sa povećanjem sadržaja vlakana i da porastu modula elastičnosti veći doprinos daju vlakna sa većim faktorom oblika. Važno je primijetiti da vrijednost Poasonovog koeficijenta opada sa porastom sadržaja vlakana u masi betona.

Sopstvenim ispitivanjem statičkog modula elastičnosti na betonima sa 1,0%; 2,0%; 3,0% prisustva čeličnih vlakana u masi betona, zaključeno je da vlakna doprinose povećanju modula elastičnosti mikroarmiranog betona za prosječno 10% u odnosu na etalon tj. beton bez vlakana.

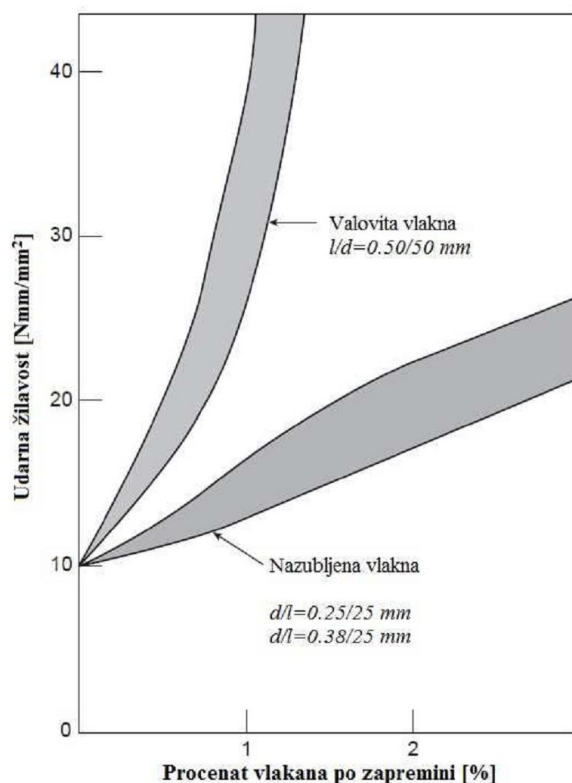
Veoma važan doprinos mikroarmature betonu jeste povećanje otpornosti pri djelovanju dinamičkih, udarnih opterećenja. Kao što je poznato, beton spada u grupu izrazito krutih građevinskih materijala, sa relativno malom energijom deformacije, pa samim tim ima i srazmjerno nisku otpornost pri dejstvu cikličnog ili udarnog-dinamičkog opterećenja.

Veoma važno eksperimentalno ispitivanje u predmetnoj disertaciji jeste ispitivanje mikroarmiranih ploča na udarno-dinamičko opterećenje. Unaprijeđene dinamičke čvrstoće betona pri visokocikličnom zamoru jedan su od razloga za sve širu primjenu mikroarmature kod konstrukcija kao što su aerodromske piste, kolovozne ploče, mostovi, temelji industrijskih dinamički opterećenih mašina i drugi objekti koji su izloženi seizmičkim uticajima. U tu svrhu najviše se koriste čelična vlakna, mada su sve češći primjeri upotrebe polimernih vlakana. Danas nisu ni rijetke kombinacije ove dvije mikroarmature (npr. čelična i polipropilenska vlakna). Mikroarmirani kompoziti se sve više koriste u konstrukcijama koje su izložene udarnim opterećenjima (kranske staze, lučni i obalski objekti, mostovski stubovi).

Testovi koji su vršeni na uzorcima betonskih ploča spravljenim sa dodatkom 2% i 3% čeličnih vlakana pri djelovanju udarnog-dinamičkog opterećenja, pokazale su porast dinamičke čvrstoće od 60-85% u odnosu na etalonske uzorke, bez vlakana. Veličina ovog porasta varirala je u zavisnosti od upotrebene količine vlakana, kao i od inteziteta opterećenja (odnosno raspona između minimalnog i maksimalnog napona) i brzine nanošenja opterećenja.

U betonskim mješavinama sa dodatkom mikroarmature u količini od 1% do 3% čeličnih vlakana, u odnosu na ukupnu masu betona, zabilježen je porast žilavosti (duktilnosti) do 33% u odnosu na etalonske uzorke. Svakako, sa povećanjem procentualnog učešća mikroarmature, rasle su i dinamička čvrstoća kao i udarna žilavost kompozita.

Na slici br. 3.4. je prikazan dijagram koji predstavlja primjer relativnog poboljšanja žilavosti (duktilnosti) koja je nastala zamjenom talasastih (valovitih) čeličnih vlakana, nazubljenim vlaknima sa zakrivljenim krajevima. Ovaj primjer otvara mogućnost novih ispitivanja mikroarmiranih betona u cilju postizanja što bolje žilavosti (duktilnosti) tog kompozita, a sve u funkciji izbora odgovarajućih parametara mikroarmiranog betona.

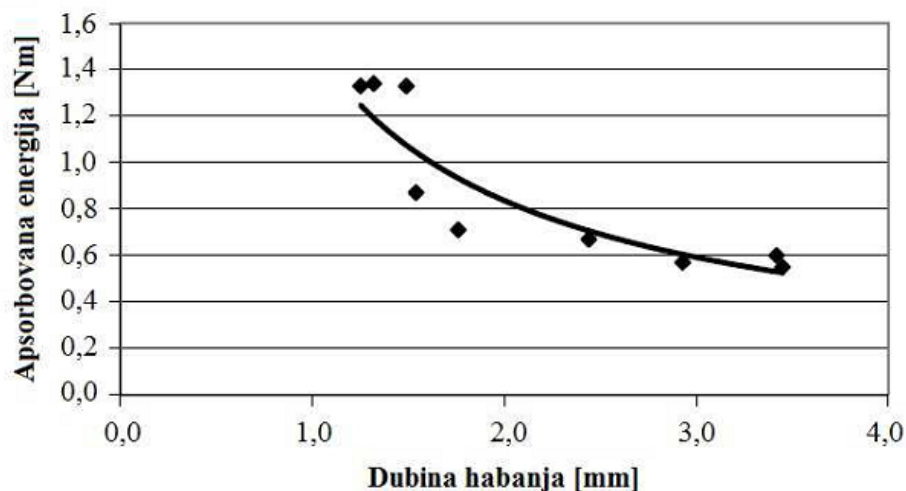


Sl. 3.4 Uticaj valovitih (talasastih) i nazubljenih čeličnih vlakana, sa zakrivljenim krajevima na udarnu otpornost betona

U dijelu eksperimenta o mikroarmiranim pločama posebna pažnja je posvećena otpornosti ploča protiv ljušpanja, otkidanja dijelova ploča pod dejstvom opterećenja i autor je došao do zaključka da je beton otporniji na ljušpanje ukoliko ima veću čvrstoću pri pritisku i tvrdoću u površinskom sloju kada je ploča izložena udarnim-dinamičkim uticajima.

Da bi se ostvario zadovoljavajući kvalitet očvrslog kompozita potrebno je spriječiti izdvajanje viška vode na površini, kao i onemogućiti pojavu segregacije agregata unutar svježije mješavine. Dodatak mikroarmature u velikoj mjeri može da doprinese rješavanju navedenih problema. Ispitivanja na hidrotehničkim betonima visokih performansi

mikroarmiranim čeličnim vlaknima, pokazala su da podvodna abrazija takođe proporcijalno raste sa povećanjem sposobnosti kompozita da apsorbuje energiju, slika br.3.5.

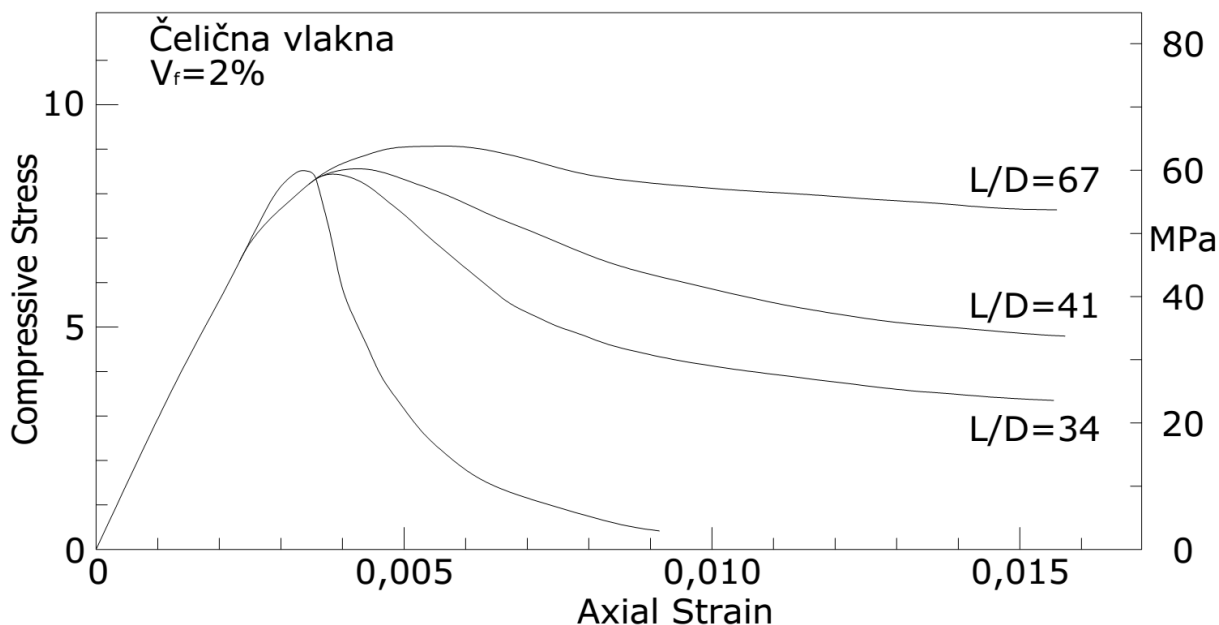


Sl. 3.5 Zavisnost između abrazivnog habanja i apsorbovane energije betona mikroarmiranih čeličnim vlaknima

Na osnovu prethodno izloženog može se zaključiti da djelovanja čeličnih vlakana u masi mikroarmiranog betona zavise od njihove količine u masi betonske mješavine (kg/m^3), faktora oblika vlakna tj. odnosa L/D čeličnih vlakana, kao i od oblika vlakana (talasasta, sa zakrivljenim krajevima i sl). Tanjih (vitkijih), čeličnih vlakana količinski mnogo više stane u 1kg ili 1l apsolutne zapremine. Tanja vlakna imaju manju površinu omotača, njihovo miješanje iziskuje mnogo veće znanje ali takvo zalaganje i rad doprinosi i dobijanju poboljšanih fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranog kompozita. U poređenju sa kontrolnim betonom koji ne sadrži vlakna, mikroarmirani beton sa čeličnim vlaknima se ponaša kao “idealno elasto–plastičan” materijal.

Na dijagramu, slika br. 3.6 zaključuje se da betoni spravljeni sa čeličnim vlaknima sa većim faktorom oblika čak i sa manjom količinom učešća ($V=2\%$), pokazuju veću duktilnost od

betona koji su spravljeni sa vlaknima nižeg faktora oblika, pa čak i sa većom količinom mikroarmature ($V_f=3\%$).



Sl. 3.6. Uticaj faktora oblika vlakana na σ - ϵ dijagram

Dakle, mikroarmiranjem čvrstoća pri pritisku mikroarmiranog betona se povećava ali se znatno povećava i sigurnost na krti lom, otpornost na habanje, čvrstoća na udare i smanjuje se sklonost prema pojavi prslina. Dokazi poboljšanih osobina eksperimentalno su potkrijepljeni i zbog takvih fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmirani betoni sa čeličnim vlaknima danas predstavljaju sve veće izazove za nova istraživanja i upotrebu u oblasti kolovoznih ploča mostova, ploča za popločavanje koji se zimi sole, visokofrekventnih puteva i kranskih staza, hidrotehničkih konstrukcija izloženih habanju i kavitaciji ali i za izradu temelja objekata koji su izloženi seizmičkim uticajima.

4. EKSPERIMENTALNI PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Za utvrđivanje osobina građevinskih materijala (fizičko-mehaničkih, dinamičko-reoloških, tehnoloških), koji se primjenjuju za izgradnju konstrukcija, neophodno je izvršiti eksperimentalno istraživanje i analizirati dobijene rezultate. Naučni eksperiment u okviru predmetne disertacije je sproveden kao plansko, organizovano i metodsko proizvođenje i mijenjanje realnih pojava u cilju otkrića nepoznatih parametara mikroarmiranog betona i njegovih svojstava. Sprovedeno eksperimentalno istraživanje je omogućilo da se iz kompleksa dobijenih parametara mogu izdvojiti najznačajniji parametri (karakteristike) koji imaju presudnu važnost za postavljeni naučni cilj u predmetnoj doktorskoj disertaciji. Karakteristike kompozitnog građevinskog materijala, kakav je mikroarmirani beton, utvrđene su metodama ispitivanja, na različitim aparaturama, u skladu sa važećim Standardima:

USA standardi

ASTM A 820–90 - Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete

ASTM C 995–91 - Standard Test Method for Time of Flow of Fiber Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone

ASTM C 1018– 89-Standard Test Method for Flexural Toughness and First –Crack Strength of Fiber–Reinforced Concrete (Using Beam With Third – Point Loading)

Njemački tehnički propisi

DBV–Merkblatt:1991 - Grundlagen zur Bemessung von Industriefuböden aus Stahlfaserbeton

DBV–Merkblatt:1992.Aug. - Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfasers-pritzbetons

DBV–Merkblatt:1992.Sept. - Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau

VorlaufigeRichtlinien:1985 - Vorlaufige Richtlinien für die Prüfung und Güteüber-wachung von Erzeugnissen aus Faserbeton

Austrijski standard

ÖNORMB 5073:1989 - Stahlfaserbetonrohre und zugehörige Formstücke. Anforderungen,Prüfung und Gütesicherung

Francuski standardi i tehnički propisi

AFNOR P 18-409:1993 - Béton avec fibres métalliques.Essai de flexion

S.N.C.F.Ref.5876:1989 - Région de Toulouse.Tunnel de Grand Mergieux. Travaux de confortement de l'ouvrage.Cahier des Prescriptions Speciales (CPS)

Japanski tehnički propisi

JSCE-SF1:1984 - Method of making steel fiber reinforced concrete in the laboratory

JSCE-SF2:1984 - Method of making specimens for strength and toughness tests of steel fiber reinforced concrete

JSCE-SF3:1984 - Method of making specimens for strength and toughness tests of shotcreted steel fiber reinforced concrete

JSCE-SF4:1984 - Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete

JSCE-SF5:1984 - Method of tests for compressive strength and compressive toughness of steel fiber reinforced concrete

JSCE-SF6:1984 - Method of tests for shear strength of steel fiber reinforced concrete

JSCE-SF7:1984 - Method of tests for fiber content of steel fiber reinforced concrete

Belgijski standardi

NBN B 15-238:1992 - Proeven op vezelversterkt beton – Bugproef op prismatische proefstukken

NBN B 15-239:1992 - Karakterisering van staalvezels op basis van de conventionele buigtreksterkte

Takođe, primjenjena je i nestandardna metoda ispitivanja usljed nedostatka odgovarajuće opreme, usljed razvoja novih metoda u ispitivanju materijala i usljed želje da se što realnije simuliraju eksploatacioni uslovi u kojima se nalazi predmetni materijal, mikroarmirani beton. Eksperimentalno istraživanje, kao najvažniji dio doktorske disertacije obuhvata spravljanje i ispitivanje uzoraka izrađenih od cementa kao veziva, standardnih frakcija agregata I(0/4mm), II(4/8mm) i III(8/16mm), vode, aditiva za beton tipa superplastifikatora, tri tipa čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50mm i 31mm i talasastih čeličnih vlakana dužine 25mm kao i prečnika svih vlakana 0,75mm.

4.1. Program istraživanja

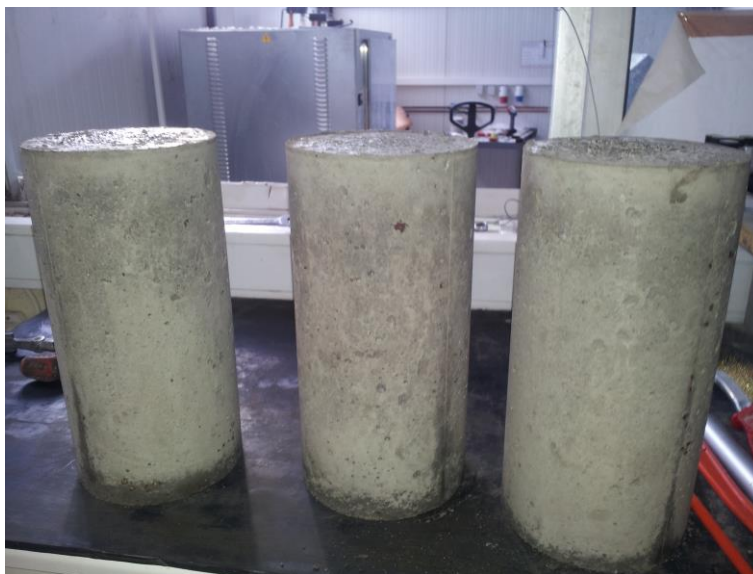
Na osnovu postavljenog cilja istraživanja u okviru predmetne disertacije formulisan je program eksperimentalnog istraživanja. Za potrebe ispitivanja betona armiranog čeličnim vlaknima izrađene su sledeće vrste uzoraka i to:

Cilindrični uzorci dimenzija 300x150 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)



Sl. 4.1. Cilindri upotrijebljeni u eksperimentalnom radu dimenzija (300x150)mm



Sl. 4.2. Izrađeni cilindrični uzorci dimenzija 300x150mm

Gredni nosači dimenzija 100x100x400 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)



Sl. 4.3. Grede upotrijebljene u eksperimentalnom radu dimenzija (100x100x400)mm



Sl. 4.4. Izrađeni gredni uzorci dimenzija (100x100x400)mm

Ploče

Ploče dimenzija: 400x400x50 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=50mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=50mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=50mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=31mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=31mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=31mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna L=25mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna L=25mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna L=25mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)

Ploče dimenzija: 400x400x100 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna L=50mm), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)

- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)

Ploče dimenzija: 400x400x150 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)

- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)

Ploče dimenzija: 400x400x200 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)

- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)

Ploče dimenzija: 400x400x 300 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)

Ploče dimenzija: 400x400x400 mm

- Etalon beton, bez čeličnih vlakana (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=50\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa čeličnim vlaknima ojačanim na krajevima (dužina vlakna $L=31\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 1% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 2% (serija od 3 uzorka)
- Beton sa talasastim čeličnim vlaknima (dužina vlakna $L=25\text{mm}$), sa zapreminskim učešćem u masi betona 3% (serija od 3 uzorka)



Sl. 4.5. Izrađeni uzorci ploča (etaloni i ploče od mikroarmiranog betona)



Sl. 4.6. Izrađeni uzorci ploča (etaloni i ploče od mikroarmiranog betona)

Eksperimentalna istraživanja su sprovedena na betonskoj mješavini jednake recepture u pogledu primjenjenog agregata, cementa, vode i aditiva, dok su varijacije vršene u pogledu procentualnog učešća različitih oblika čeličnih vlakana u masi betona.

Ispitivanja mikroarmiranog betona su vršena u cilju modeliranja i postizanja poboljšanih fizičko-mehaničkih svojstava mikroarmiranog betona u laboratoriji sa izabranim komponentama, na uzorcima oblika cilindra, grede i ploče. Osnovna ispitivanja sprovedena su za sledeće vrste opterećenja:

1. Opterećenje na pritisak
2. Opterećenje na zatezanje
3. Opterećenje na savijanje
4. Dinamično-udarno opterećenje

Dobijeni rezultati su prikazani grafo-analitičkim putem.

Ispitivanja su vršena na svježim betonskim mješavinama i pri starosti betona od 28 dana. Za izradu betonskih mješavina svih vrsta i oblika uzoraka korišten je portland cement, agregat sa maksimalnom veličinom zrna 16 mm, voda iz gradskog vodovoda, aditiv za beton tipa superplastifikator Sika Viscocrete 3070. Upotrebene su tri vrste čeličnih vlakana engleskog proizvođača i to: čelična vlakna sa ojačanjem na krajevima dužine 50 i 31 mm i talasasta čelična vlakna dužine 25 mm, dok je prečnik svih vlakana 0,75mm.

Količina cementa za spravljanje betonske mješavine iznosila je 400 kg/m^3 . Takođe, betonska mješavina za sve vrste uzoraka i opterećenja je izrađena sa istim odnosom mase vode i mase veziva ($w/b=0,45$) i sa približno istom konzistencijom, što je postignuto korištenjem superplastifikatora „Sika ViscoCrete 3070“. Granulometrijski sastav mješavine osnovnih frakcija agregata se nalazi između standardnih granulometrijskih krivih prema ASTM standard-u.

Na svježem betonu izvršena su sledeća ispitivanja:

- određivanje konzistencije metodom slijeganja (Abramsov konus)
- određivanje zapreminske mase u svježem ugrađenom stanju
- određivanje sadržaja uvučenog vazduha

Nakon dvadeset i osam dana na betonskim uzorcima su sprovedena sledeća ispitivanja:

- određivanje zapreminske mase očvrslog betona
- određivanje čvrstoće pri pritisku
- određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku
- određivanje čvrstoće pri savijanju
- određivanje čvrstoće pri zatezanju
- ispitivanje dinamičke otpornosti mikroarmiranih betonskih ploča – sopstvena metoda za potrebu izrade disertacije (Kugla mase 7,24 kg pada sa određene visine-max do 2,0m, na

betonsku ploču. Udarci se sprovode u seriji od po 12 sa predviđene visine (0,25m; 0,5m; 0,75m; 1,0m; 1,25m; 1,5m; 1,75m; 2,0m do konačnog loma uzorka) odgovarajućom brzinom, pri čemu se mjeri broj udaraca do nastanka prve prsline, kao i broj udaraca do konačnog loma ploče. Na taj način dobija se energija (J) kojom se ostvaruje lom betonske ili mikroarmirane ploče.

4.2 Svojstva upotrijebljenih komponentnih materijala

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja u predmetnoj disertaciji izvršeno je spravljanje i ispitivanje betonske mješavine pri čemu je upotrijebljen riječni agregat, cement, voda, superplastifikator i tri vrste čeličnih vlakana: sa ojačanjem na krajevima (vlakna dužine 50 mm sa oznakom 50/0,75mm i vlakna dužine 31 mm sa oznakom 31/0,75mm, te talasasta vlakna sa oznakom 25/0,75).

4.2.1. Cement

Za predmetnu betonsku mješavinu korišten je portland cement, bez mineralnih dodataka. Prema odredbama važećih Standarda ASTM izvršena su laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika upotrijebljenog cementa i predstavljena su u tabeli br. 4.1. Hemijski sastav cementa za potrebe predmetnog istraživanja dostavio je proizvođač cementa i prikazan je u tabeli br. 4.2.

Tabela 4.1. Fizičko-mehaničke karakteristike upotrijebljenog cementa

Vrste ispitivanja	Jedinica mjere	Rezultat ispitivanja	Uslovi kvaliteta	Zaključak
1. Standardna konzistencija	%	28,0	max 30-32 %	zadovoljava
2. Vrijeme vezivanja	sati i min	Početak 3h 10' Završetak 4h	početak >55 min završetak < 10h	zadovoljava
3. Stalnost zapremine	mm	1,0	max 10 mm	zadovoljava
4. Finoća mliva	%	Ostatak na situ 0,09mm 2%	sito 0,09 mm 10%	zadovoljava
5. Zapreminska masa u rastresitom stanju	kg/m ³	925	nije predložena standardom	-
6. Zapreminska masa u zbijenom stanju	kg/m ³	1521	nije predložena standardom	-
7. Specifična masa	kg/cm ³	3,2	min 3	zadovoljava
8. Specifična površina po Blenu	cm ² /g	3640	min 2400	zadovoljava
9. Čvrstoća pri savijanju	MPa	poslije 2 dana – 7 poslije 28 dana – 9,1	nije predložena standardom	-
10. Čvrstoća pri pritisku	MPa	poslije 2 dana – 32,5 poslije 28 dana – 50, 4	min 20 min 42, 5	zadovoljava

Tabela 4.2. Hemijski sastav upotrijebljenog cementa

<i>Parametar</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>Mg O</i>	<i>SO₃</i>	<i>S</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>MnO</i>	<i>CO₂</i>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Vrijednosti	25,86	2,5	7,0	60,2	2,34	2,6	0,12	0,33	0,66	0,15	0,9



Sl. 4.7. Upotrijebljeni portland cement za izradu uzoraka

4.2.2. Agregat

Za eksperimentalna istraživanja upotrijebljen je agregat u tri osnovne frakcije I(0/4mm), II(4/8mm) i III(8/16mm). Veličina nominalno najkrupnijeg zrna agregata iznosila je $d_{\max}=16\text{mm}$. Glavni razlog izbora najkrupnijeg zrna agregata $d_{\max}=16\text{ mm}$ jeste težnja da se postigne što bolja athezija između zrna agregata i izabраних čeličnih vlakana, tj. da se postigne

optimalna kombinacija maksimalno najkrupnijeg upotrijebljenog zrna agregata i odnosa faktora oblika upotrijebljenih vlakana L/D. Za potrebe ovog rada izvršena su ispitivanja svojstava upotrijebljenih frakcija agregata a dobijeni rezultati su prikazani tabelarno, tabela br. 4.3.

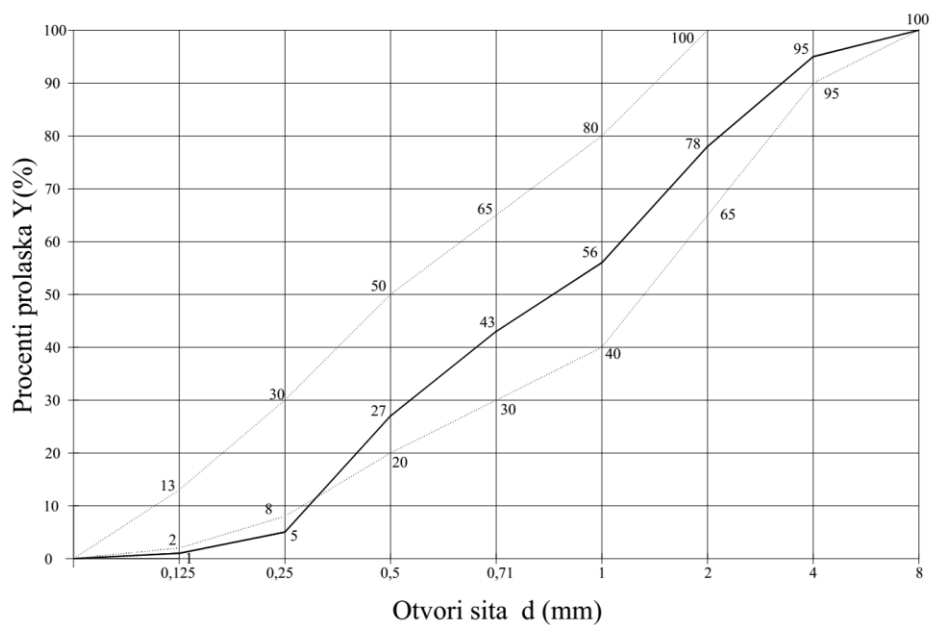
Tabela 4.3. Rezultati ispitivanja frakcija upotrijebljenog agregata

Karakteristike agregata	Jed. mjere	Frakcija I (0/4mm)	Frakcija II (4-8mm)	Frakcija III (8-16 mm)	Uslovi kvaliteta
1. Zapreminska masa	kg/m ³	2630	2650	2650	2000-3000
2. Zapreminska masa u rastresitom stanju	kg/m ³	1480	1480	1460	nije predložena standardom
3. Zapreminska masa u zbijenom stanju	kg/m ³	1730	1610	1640	nije predložena standardom
4. Sadržaj sitnih čestica	%	2,36	0,2	0,15	< 5 sitan agregat < 1 krupan
5. Sadržaj organskih materija	%	-	-	-	
6. Oblik zrna agregata (zapreminski koeficijent)	-	-	0,25	,26	<0,2
7. Upijanje vode	%	-	0,9	0,87	nije predložena standardom

Kontinualna, izabrana i upotrijebljena granulometrijska kriva agregata je određena metodom suvog prosijavanja. Procenti prolaska pojedinih frakcija kroz sita dati su u tabeli br.4.4. dok je granulometrijski sastav prikazan na slici br.4.8.

Tabela 4.4. Procentualni sadržaj upotrijebljenog agregata

Frakcija	Procentat prolaska na situ (mm)											
	0,125	0,25	0,5	0,71	1	2	4	8	11,2	16	22,4	31,5
0/4 mm	1	5	30	45	55	80	95	100	100	100	100	100
4/8 mm	0	0	0	0	0	0	4	95	100	100	100	100
8/16 mm	0	0	0	0	0	0	0	2	47	100	100	100



Sl. 4.8. Granulometrijska kriva upotrijebljenih frakcija agregata za izradu uzoraka



Sl.4.9. Agregat upotrijebljen za izradu uzoraka

4.2.3. Voda

Za spravljanje betonske mješavine upotrijebljena je voda iz gradskog vodovoda i dodatna ispitivanja njenih karakteristika nisu vršena.

4.2.4. Čelična vlakna

U eksperimentalnom istraživanju upotrijebljene su tri vrste čeličnih vlakana:

- čelična vlakna sa ojačanim krajevima i faktorom oblika $L/D = 50/0,75$ mm
- čelična vlakna sa ojačanim krajevima i faktorom oblika $L/D = 31/0,75$ mm
- talasasta čelična vlakna sa faktorom oblika $L/D=25/0,75$ mm



Sl. 4.10. Čelična vlakna sa zakrivljenim krajevima i faktorom oblika $L/D = 50/0,75$ mm



Sl. 4.11. Čelična vlakna sa ojačanim krajevima i faktorom oblika $L/D = 31/0,75$ mm



Sl. 4.12. Talasasta čelična vlakna sa faktorom oblika $L/D=25/0,75$ mm

Površina upotrijebljenih čeličnih vlakana je glatka i time je obezbijeđena zadovoljavajuća adhezija između vlakna i matrice betona. Potrebno je naglasiti da je za matricu betona, za sve vrste eksperimentalnih uzoraka (cilindar, greda i ploča), izabrana jedinstvena matrica sa različitim procentualnim sadržajem vlakana u količini od 1%, 2% i 3% u odnosu na ukupnu masu betona.

Ovim eksperimentalnim radom je dokazana promjena fizičko-mehaničkih karakteristika betona ojačanog različitim vrstama izabranih čeličnih vlakana u zavisnosti od količine i vrste tih vlakana u matrici betona.

Izabrana vlakna su ispitana u laboratoriji a njihove osnovne karakteristike su predstavljene u tabeli broj 4.5.

Tabela 4.5. Karakteristike upotrijebljenih čeličnih vlakana

Karakteristika	Čelična vlana sa zakrivljenim krajevima		Talasasta čelična vlana
Oznaka	L/D=0,75/50	L/D=0,75/31	L/D= 0,75/25
Osnovni materijal	čelik i aluminijum	čelik	čelik
Tip vlakana	sa zakrivljenim krajevima	sa zakrivljenim krajevima	Talastasata vlakna
Poprečni presjek vlakana	Kružni	kružni	kružni
Prečnik vlakana	0,75	0,75	0,75
Dužina vlakana	50	31	25
Faktor oblika	67	41	34
Čvrstoća pri zatezanju (Mpa)	1150	1250	1300
Preporučeno doziranje (kg/m³)	20-70	20-70	20-70

Izabrana čelična vlakana u masi betona u sprovedenim eksperimentima su doprinijela poboljšanju sledećih karakteristika složenog kompozita:

- povećanje čvrstoće pri pritisku betona;
- povećanje čvrstoće pri zatezanju;
- smanjuje se ili isključuje potreba za klasičnom armaturom;
- sprečavanje i odlaganje pojave prve pukotine i prsline u betonu;
- povećanje duktilnosti betona;
- povećanje udarne-dinamičke otpornosti betona;
- povećanje otpornosti na ciklično opterećenje (efekat zamora);
- jednostavna i brza ugradnja betona;
- smanjeni troškovi ugradnje;
- dobra disperzija vlakana u betonskoj masi (uz pravilnu upotrebu aditiva)

Na osnovu sprovedenih eksperimenata navodi se činjenica da sve vrste upotrijebljenih vlakana (sa zakrivljenim krajevima i faktorom oblika $L/D=50/0,75$, sa zakrivljenim krajevima i faktorom oblika $L/D=31/0,75$, kao i talasasta čelična vlakana sa faktorom oblika $L/D=25/0,75$) su pokazala poboljšane rezultate u poređenju sa etalonima, tj. betonskom matricom bez vlakana što se može vidjeti iz narednih tabela: tabela br. 4.6.; tabela br. 4.7.; tabela br. 4.8.

Tabela 4.6. Efekat dodavanja čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$ mm na karakteristike betonske mješavine oblika cilindra

Karakteristike Efekat čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine cilindričnih uzoraka	Odredbe i kriterijumi za procjenu usaglašenosti EN 14889-1	Podaci o mjeranju	Interpretacija dobijenih rezultata
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine cilindričnih uzoraka bez prisustva vlakana	EN 14845-2 Za prslinu na cilindru CMOD=0,5mm	Min – max 35 – 37 MPa Srednja	U granici dozvoljenog
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine cilindričnih uzoraka sa vlaknima	EN 14845-2 Za prslinu na cilindru CMOD=0,3mm	2,5- 4,8 MPa Srednja vrijednost	U granici dozvoljenog
Prosječna čvrstoća na pritisak sa čeličnim vlaknima za 3 uzorka (cilindara) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 1% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na pritisak > 36,5	36,5 MPa	
Prosječna čvrstoća na pritisak sa čeličnim vlaknima za 3 uzorka (cilindara) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 2% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na pritisak > 37,1	37,0	
Prosječna čvrstoća na pritisak sa čeličnim vlaknima za 3	Prosječna čvrstoća na pritisak > 38,5	38,0	

<i>uzorka (cilindara) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 3% vlakana u matrici betona</i>			
<i>Efekat čeličnih vlakana na konzistenciju betona WEBE (s)</i>	EN 12350-3 Mješavina bez vlakana Vrijeme 5s	Srednja vrijednost 5s	U granici dozvoljenog
	EN 12350-3 Mješavina sa vlaknima 15s	Srednja vrijednost 10s	

Tabela 4.7. Efekat dodavanja čeličnih vlakana L/D=50/0,75 mm na karakteristike betonske mješavine oblika greda

Karakteristike Efekat čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima faktora oblika L/D=50/0,75 na osobine greda	Odredbe i kriterijumi za procjenu usaglašenosti EN 14889-1	Podaci o mjeranju	Interpretacija dobijenih rezultata
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika L/D=50/0,75 na osobine greda - uzorci bez prisustva vlakana	EN 14845-2 Za prslinu na gredi CMOD=0,6mm ili vertikalno savijanje 3,5mm	Min – max 1,9– 2,9MPa Srednja vrijednost 2,4 MPa	U granici dozvoljenog
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika L/D=50/0,75 na osobine greda - uzoraka sa vlaknima	EN 14845-2 Za prslinu na gredi CMOD=0,3mm	2,5- 3,8 MPa Srednja vrijednost 3,65 MPa	U granici dozvoljenog
Prosječna čvrstoća na savijanje sa čeličnim vlaknima za 3 uzorka (grede) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 1% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na savijanje > 1,5		
Prosječna čvrstoća na savijanje sa čeličnim vlaknima za 3 uzorka (greda) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 2% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na savijanje > 2,3		

<i>Prosječna čvrstoća na savijanje sa čeličnim vlaknima za 3 uzorka (greda) poslije 28 dana MPa, koji sadrže 3% vlakana u matrici betona</i>	Prosječna čvrstoća na savijanje > 3,0		
<i>Efekat čeličnih vlakana na konzistenciju betona WEBE (s)</i>	EN 12350-3 Mješavina bez vlakana Vrijeme 5s	Srednja vrijednost 5s	U granici dozvoljenog
	EN 12350-3 Mješavina sa vlaknima 15s	Srednja vrijednost 10s	

Tabela 4.8. *Efekat dodavanja čeličnih vlakana $L/D=50/0,75$ mm na karakteristike betonske mješavine oblika ploča*

Karakteristike Efekat čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine ploča	Odredbe i kriterijumi za procjenu usaglašenosti	Podaci o mjeranju	Interpretacija dobijenih rezultata
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine ploča - uzorci bez prisustva vlakana	Za prslinu na ploči $d=3,0\text{mm}$ ili vertikalno savijanje ploča $3,5\text{mm}$ Prosječna čvrstoća na	-	-
Efekat čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$ na osobine ploča - uzoraka sa vlaknima	Za prslinu na ploči $d=0,3\text{mm}$	-	-
Prosječna čvrstoća na dinamičko, udarno opterećenje ploča, kojie sadrže 1% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na udarno, dinamičko opterećenje: $65,16\text{J}$ do $955,68\text{J}$		
Prosječna čvrstoća na dinamičko, udarno opterećenje ploča, kojie sadrže 2% vlakana u matrici betona	Prosječna čvrstoća na udarno, dinamičko opterećenje: $108,6\text{J}$ do $1071,52\text{J}$		
Prosječna čvrstoća na dinamičko, udarno opterećenje	Prosječna čvrstoća na udarno, dinamičko		

<i>ploča, koje sadrže 3% vlakana u matrici betona</i>	opterećenje: 166,52J do 1187,36J		
<i>Efekat čeličnih vlakana na konzistenciju betona WEBE (s)</i>	EN 12350-3 Mješavina bez vlakana Vrijeme 5s	Srednja vrijednost 5s	U granici dozvoljenog
	EN 12350-3 Mješavina sa vlaknima 15s	Srednja vrijednost	

4.2.5. Aditivi

Prilikom modeliranja betonske mješavine, a u cilju postizanja potrebne konzistencije upotrijebljen je dodatak za beton – superplastifikator *Sika ViscoCrete 3070*. Prema priloženom prospektu proizvođača ovaj superplastifikator se definiše kao dodatak betonu bez sadržaja formaldehida i hlorida, na bazi modifikovanih polikarboksilata, koji omogućavaju spravljanje cementnih mješavina visokih performansi sa očuvanjem tečne konzistencije u toplim klimatskim uslovima ili pri transportu na veće udaljenosti. Upotreba ovog plastifikatora omogućava značajno smanjenje skupljanja usljed gubitka vode iz betona i plastičnog skupljanja, čime utiče na povećanje ranih i konačnih čvrstoća, kao i na povećanje trajnosti betona. Dozira se u rasponu od 0,5 do 1,2% u odnosu na masu cementa. Rezultati ispitivanja uticaja dodatka na svojstva matrice betona u predmetnoj doktorskoj disertaciji prikazani su u tabeli br. 4.7.

Tabela 4.9. Rezultati ispitivanja uticaja dodatka „Sika ViscoCrete 3070“ na svojstva
 betonske matrice

Vrsta ispitivanja	Jed mjere	Rezultati ispitivanja								Uslovi koji moraju biti ispunjeni
		Etalon		Količina dodataka aditiva %						
		Cilindri			Grede					
Cilindri	Grede	0,5	0,8	1,0	0,5	0,8	1,0			
Standardna konzistencija	%	27	30	26	25	23	28	26	23	-
Vrijeme vezivanja										Min 50 Max 600
-početak	Min	240	240	260	280	350	260	280	350	
-kraj	max	480	480	300	320	400	300	320	400	
Sadržaj vazduha	%	7	7	8,5	8,7	8,8	8,5	8,7	8,8	-
Povećanje vazduha u odnosu na etalon	%	-	-	1,5	1,7	1,8	1,5	1,7	1,8	Max 2
Povećanje čvrstoće na pritisak (cilindrični uzorci) 28 dana	MPa Do 4%	4	-		4	4	-	-	-	-
Povećanje čvrstoće na savijanje (uzorci oblika grede)	Mpa Do 50%	-		-	-	-				-

Linearne deformacije 28 dana	(mm/m)	-0,5	-0,45	-0,45	-0,4	-0,3	-0,4	0,3	0,35	
---	--------	------	-------	-------	------	------	------	-----	------	--

4.2.6. Projektovanje betonske mješavine upotrijebljene u eksperimentalnom istraživanju

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja u okviru disertacije projektovana je betonska mješavina u kojoj je zadržan isti sastav betonske matrice, dok su varirane količine i vrste čeličnih vlakana za sve ispitivane uzorke: cilindre, grede i ploče. Kao što je već naglašeno, betonska matrica je projektovana uz upotrebu čistog cementa, agregata maksimalne veličine zrna $d_{\max}=16\text{mm}$ čija je granulometrijska kriva prikazana na slici br. 4.8.

Betonska matrica je projektovana sa istim odnosom mase vode (uključujući i masu superplastifikatora) i mase veziva ($m_w/m_b=0,45$) i istim odnosom mase agregata i mase veziva ($m_a/m_b=4,45$).

Betonske mješavine svih ispitivanih uzoraka su imale približno istu konzistenciju, što je ostvareno primjenom superplastifikatora. Korišten je portland cement, dok je za agregat izabran riječni agregat dostupan u laboratoriji u kojoj je eksperiment izvođen. Istovremeno je agregat grupisan u tri osnovne frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm u razmjeri miješanja 50%, 30% i 20%. Ističe se da je ista granulometrijska kriva upotrijebljena za izradu svih vrsta uzoraka: cilindara, greda i ploča.

Tabela br.4.10. Granulometrijska kriva matrice betona korištena u eksperimentu

Mješavina agregata	Procenat prolaska kroz sito (mm)							
	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	11,2	16
Granična kriva "A"	5	7	15	21	36	60	80	100
Granična kriva "B"	10	20	35	45	55	75	90	100
Osnovne frakcije upotrijebljenog agregata	4	14	25	35	45	70	85	100

Dakle, pored portland cementa i riječnog agregata, upotrijebljene su tri vrste čelične mikroarmature za sve oblike uzoraka (cilindri, grede i ploče), sa faktorima oblika:

$L/D=50/0,75$ – sa zakrivljenim krajevima (mješavina čelika i aluminijuma)

$L/D=31/0,75$ – sa zakrivljenim krajevima (čisti čelik)

$L/D=25/0,75$ – talasasta čelična vlakna (čisti čelik)

Prečnik upotrijebljenih vlakana je ostao nepromijenjen 0,75mm, dok je varirala dužina vlakana, materijal od koga su izađeni (čisti čelik i mješavina čelika i aluminijuma), kao i količina vlakana u betonskoj mješavini i to: 1%, 2% i 3% u odnosu na ukupnu zapreminu betona/m³. Istovremeno, nije izoastala i upotreba već pomenutih superplastifikatora za betonsku mješavinu.

Za efikasno sprečavanje razvoja prslina u betonu, čelična vlakna odolijevaju ukoliko se nalaze unutar određenog međusobnog rastojanja. Ovaj uslov stvara prirodnu granicu za veličinu zrna agregata gdje je eksperimentalno istraživanje dalo potvrdu da je idealna, najveća veličina zrna agregata, do 16 mm. Nasuprot tome, smanjivanje maksimalnog zrna agregata negativno utiče na čvrstoću betona ojačanog čeličnim vlaknima na pritisak. Kako je čvrstoća na pritisak betona ojačanog čeličnim vlaknima veća nego kod klasičnog betona, to nepovoljno djeluje kod elemenata koji su izloženi stalnom ili povremenom pritisku. Da bi se postigla potpuna harmonija, potrebno je povećati količinu cementa i održati pritisnu čvrstoću. Ovaj uslov se poklapa sa činjenicom da je za bolje ugrađivanje mikroarmiranog betona potrebna veća količina cementa, nego li je to slučaj kod klasičnih betona. Dakle, potrošnja cementa kod betona ojačanog čeličnim vlaknima je veća, u poređenju sa klasičnim betonom.

Zapreminska učešća upotrijebljenih komponenti u masi betona su sledeća:

Zapremina agregata: V_a

Zapremina veziva (cementa): V_c

Zapremina vode: V_v

Zapremina aditiva (hemijskog dodatka): V_d

Zapremina čeličnih vlakana: V_f

Zapremina pora: V_p

Zapremina svježe betonske mase: $V_{b,sv}$

$$V_{b,sv} = V_a + V_c + V_v + V_d + V_f + V_p$$

$$V = m/\gamma$$

$$V_{b,sv} = 1,0 = m/\gamma + m_a/\gamma_{sa} + m_c/\gamma_{sc} + m_v/\gamma_{sd} + m_f/\gamma_{sf} + V_p$$

Izbor upotrijebljenog materijala za izradu uzoraka bez vlakana (etalona):

$$m_a = 1567,44 \text{ kg/m}^3$$

$$m_c = 421 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 205 \text{ kg/m}^3$$

$$m_d = 1,938 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2195,38 \text{ kg/m}^3$$

Količine upotrijebljenih čeličnih vlakana:

$$V_{f1} = 1\% = 70 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{f2} = 2\% = 140 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{f3} = 3\% = 210 \text{ kg/m}^3$$

Tabela 4.11. Gustine betonske mješavine bez vlakana i sa prisustvom čeličnih vlakana

Prisustvo vlakana u masi betona	Gustina betonske mješavine ρ (kg/m³)
0%	2195,38
1%	2265,38
2%	2335,38
3%	2405,38



Sl. 4.13. Postupak spravljanja mikroarmiranog betona

Spravljanje betonske mješavine je sprovedeno u laboratoriji, u mješalici sa vertikalnom osovinom. Komponente betona su dozirane sledećim redoslijedom: mješalica je prvobitno ispunjena pojedinačnim, već prethodno pripremljenim frakcijama agregata, od najkrupnije prema najsitnijem agregatu. Uslijedilo je dodavanje mase vode, pri čemu je izvršeno miješanje u trajanju od 1min. Poslije toga, dozirana je predviđena količina cementa, i predviđena količina plastifikatora. Postupak miješanja betona trajao je 5 min. Na ovaj način dobijena je betonska mješavina za izradu etalona, uzoraka bez vlakana. Na isti način dobijena je i betonska mješavina sa čeličnim vlaknima, uz razliku da je ovoj mješavini dodata predviđena količina čeličnih vlakana i vrijeme miješanja je duže trajalo. Temperatura svih komponenti odgovarale su laboratorijskim uslovima u granicama od 20-25°C.

Poslije dopremanja svih potrebnih komponenti u Laboratoriju za ispitivanje materijala i konstrukcija, pristupilo se izradi uzoraka oblika cilindra, dimenzija 300x150mm, greda dimenzija 100x100x400mm, kao i ploča dimenzija 400x400x(50,100,150,200,300,400)mm. Ista betonska mješavina, koja je navedena u prethodnih tabeli, je korištena za izradu svih vrsta uzoraka.

Osnovni razlog izbora uzoraka oblika cilindara i greda, na kojima su vršena ispitivanja, bio je da se na najbolji način reprezentuju sledeće osobine klasičnog i mikroarmiranog betona:

- modul elastičnosti
- Poisson–ov koeficijent
- zapreminska masa
- čvrstoća pri pritisku i
- čvrstoće na zatezanje i
- skupljanje (linearne deformaacije)

Laboratorijski rezultati upotrijebljeni su u okviru doktorske disertacije, u poglavlju br. 6 „Primjena dobijenih eksperimentalnih laboratorijskih rezultata u proračunu tunelske konstrukcije“, za modeliranje tunelske obloge.

4.3. Ispitivanje svojstava svježeg betona

Nakon spravljanja betonskih mješavina vršena su ispitivanja svježeg betona. Ugrađivanje svježeg betona u kalupe različitih oblika i dimenzija (u zavisnosti od predviđene metode ispitivanja na očvrslom betonu) izvršeno je pomoću pervibratora.

Za ispitivanje betonske mješavine spravljeno je ukupno uzoraka:

- 12 cilindara dimenzija 300x150mm
- 12 greda dimenzija 100×100×400 mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x50mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x100mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x150mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x200mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x300mm
- 24 ploče dimenzija 400x400x400mm

Modeliranje i ispitivanje svježe betonske mješavine je podrazumijevalo:

- određivanje konzistencije metodom slijeganja (Abramsov konus)
- određivanje zapreminske mase u svježem ugrađenom stanju
- određivanje sadržaja uvučenog vazduha

Kako je mikroarmirani beton osjetljiv na pojavu stvaranja grudvica prilikom dodavanja mikroarmature, posebna pažnja je posvećena osobinama homogenosti mješavine, ugradljivosti, obradljivosti ili pojavi nagomilavanja vlakana.

4.3.1 Ispitivanje konzistencije svježeg betona

Pod konzistencijom betona podrazumijeva se stepen povezanosti komponenata svježe betonske mješavine koji utiče na veličinu unutrašnjeg trenja u masi betona. Konzistencija betonske mješavine je, pored ugradljivosti, obradljivosti i tiksotropnosti, veoma bitna tehnološka karakteristika svježeg betona.

Konzistencija podrazumijeva niz karakteristika svježe betonske mješavine: povezanost, stabilnost (segregacija), mogućnost transporta, mogućnost ugradljivosti i obradljivosti.

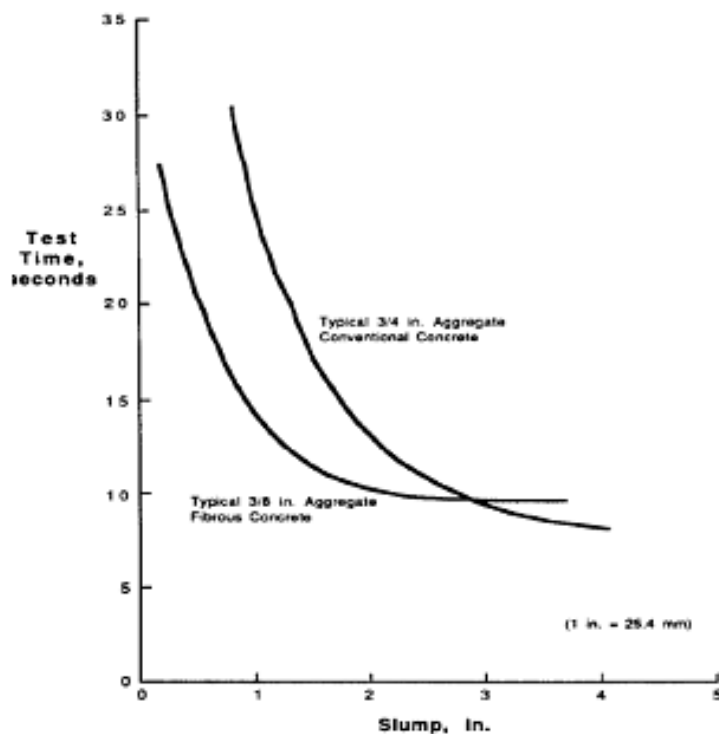
Konzistencija betona može se utvrditi primjenom sledećih metoda:

- metodom slijeganja
- metoda rasprostiranja
- Webe metoda
- Metoda slijeganja vibriranjem
- Metoda rasprostiranja samougradivog betona

Kod mikroarmiranih betona za utvrđivanje konzistencije svježeg betona, od standardnih metoda moguće je primijeniti WEBE metodu. Za mjerenje konzistencije svježeg mikroarmiranog betona na gradilištu koristi se standardni Abramsov konus koji se postavlja 7 cm od podloge, napuni se betonom, nakon toga se mjeri vrijeme u sekundama, koje je potrebno da se beton izlije iz konusa pomoću vibriranja vibroiglom.

Konzistencija svježeg betona je sprovedena metodom slijeganja pomoću Abramsovog konusa prema standardu EN 12350-2:2010. Konzistencije betonskih mješavina u granicama slijeganja (90 do 105 mm), ostvarena je primjenom superplastifikatora Sika ViscoCrete 3070. Rezultati ispitivanja konzistencije betona metodom slijeganja za betonsku mješavinu dati su u tabeli br. 4.12. Prikazani rezultat predstavlja srednju vrijednost slijeganja Δh koja je dobijena na osnovu ispitivanja tri uzorka svježe betonske mješavine sa čeličnim vlaknima faktora oblika: $L/D=50/0,75$; $L/D=31/0,75$; $L/D=25/0,75$.

Kod etalonskih uzoraka mjera slijeganja je bila 5 cm a kod mjerenja vremena izlivanja betona iz konusa reuzultat je bio 5 sekundi, što je u granicama očekivanog prema slici br.4.14.



Sl.4.14. Mjera slijeganja i mjera konzistencije utvrđena metodom za mikroarmirani beton

Tabela 4.12. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima
($L/D=50/0,75$) metodom Abramsovog konusa

Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine metodom Abramsovog konusa:

Betonska mješavina: $L/D=50/0,75$	Veličina slijeganja $\Delta h_{sr}(mm)$
Betonska mješavina bez vlakana	105
Betonska mješavina sa prisustvom 1% vlakana	100
Betonska mješavina sa prisustvom 2% vlakana	95
Betonska mješavina sa prisustvom 3% vlakana	90

*Tabela 4.13. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima
($L/D=31/0,75$) metodom Abramsovog konusa*

<i>Betonska mješavina: $L/D=31/0,75$</i>	<i>Veličina slijeganja $\Delta h_{sr}(mm)$</i>
Betonska mješavina bez vlakana	105
Betonska mješavina sa prisustvom 1% vlakana	102
Betonska mješavina sa prisustvom 2% vlakana	97
Betonska mješavina sa prisustvom 3% vlakana	92

*Tabela 4.14. Rezultati ispitivanja konzistencije betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima
($L/D=25/0,75$) metodom Abramsovog konusa*

<i>Betonska mješavina: $L/D=25/0,75$</i>	<i>Veličina slijeganja $\Delta h_{sr}(mm)$</i>
Betonska mješavina bez vlakana	105
Betonska mješavina sa prisustvom 1% vlakana	103
Betonska mješavina sa prisustvom 2% vlakana	97
Betonska mješavina sa prisustvom 3% vlakana	92

4.3.2. Ispitivanje zapreminske mase svježeg zbijenog betona

Dodatak čeličnih vlakana doprinosi povećanju zapreminske mase zbijenog svježeg betona, pri čemu je količina vlakana varirala 1%, 2%, 3% u odnosu na ukupnu zapreminu betona.

Tabela 4.15. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=50/0,75$)

	<i>Etalon</i>	<i>Beton sa 1% vlakana</i>	<i>Beton sa 2% vlakana</i>	<i>Beton sa 3% vlakana</i>
<i>Projektovana zapreminska težina betonske mješavine</i>	2195,38	2265,38	2335,38	2405,38
<i>Mjerena zapreminska težina svježe betonske mješavine</i>	2194,5	2263	2333	2402

Tabela 4.16. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=31/0,75$)

	<i>Etalon</i>	<i>Beton sa 1% vlakana</i>	<i>Beton sa 2% vlakana</i>	<i>Beton sa 3% vlakana</i>
<i>Projektovana zapreminska težina betonske mješavine</i>	2195,38	2230,5	2305,8	2390,4
<i>Mjerena zapreminska težina svježe betonske mješavine</i>	2194,5	2227	2301	2386

Tabela 4.17. Rezultati ispitivanja zapreminske težine svježe betonske mješavine bez vlakana i sa vlaknima (L/D=25/0,75)

	<i>Etalon</i>	<i>Beton sa 1% vlakana</i>	<i>Beton sa 2% vlakana</i>	<i>Beton sa 3% vlakana</i>
<i>Projektovana zapreminska težina betonske mješavine</i>	2195,38	2220,6	2278,9	2358,7
<i>Mjerena zapreminska težina svježe betonske mješavine</i>	2194,5	2217,5	2277	2357

4.3.3. Sadržaj vazduha u svježem betonu

Određivanje količine zaostalog vazduha u svježoj betonskoj mješavini koji je nastao i ostao u istoj tokom spravljanja betona je naročito značajno ukoliko se koriste hemijski dodaci ili vlakna različitog porijekla i oblika.

Rezultati mjerenja sadržaja vazduha u svježem betonu dati su u sledećim tabelama a dobijeni na bazi srednjih vrijednosti tri uzorka uzorka.

Tabela 4.18. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima (L/D=50/0,75)

	Etalon	Beton sa 1% vlakana	Beton sa 2% vlakana	Beton sa 3% vlakana
Sadržina vazduha %	2%	2,3	2,6	3,0

Tabela 4.19. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=31/0,75$)

	Etalon	Beton sa 1% vlakana	Beton sa 2% vlakana	Beton sa 3% vlakana
Sadržina vazduha %	2%	2,0	2,3	2,8

Tabela 4.20. Sadržaj vazduha u betonskoj mješavini bez vlakana i sa vlaknima ($L/D=25/0,75$)

	Etalon	Beton sa 1% vlakana	Beton sa 2% vlakana	Beton sa 3% vlakana
Sadržina vazduha %	2%	2,0	2,1	2,5

Nakon sprovedenog ispitivanja može se zaključiti da prisustvo čeličnih vlakana u masi betona ima relativno mali uticaj na procenat vazduha u betonskoj mješavini. Ovaj efekat je više izražen u slučaju dodatka veće količine čeličnih vlakana (3%) i takođe je ovaj efekat prisutnosti vazduha u betonskoj mješavini više izražen kod upotrebe čeličnih vlakana sa većim faktorom oblika. Kada se analizira prisustvo vazduha u betonskoj mješavini sa čeličnim vlaknima, može se konstatovati da je broj čeličnih vlakana u jedinici zapremine manji nego npr. broj polipropilenskih vlakana, pa je zbog toga upotreba čeličnih vlakana prihvatljivija u poređenju sa ostalim.

4.4. Ispitivanje karakteristika očvrsllog betona

Ispitivanje svojstava očvrsllog betona je funkcija velikog broja parametara, počevši od kvaliteta i količine komponentnih materijala, ostvarene strukture betonskog kompozita, načina spravljanja, ugrađivanja i njege betona, uslova spoljašnje sredine (temperatura, vlažnost, prisustvo štetnih i agresivnih uticaja), načina eksploatacije i starosti betona.

4.4.1. Fizičko-mehaničke karakteristike očvrsllog betona

Kada govorimo o fizičko-mehaničkim karakteristikama mikroarmiranog betona one u prvom redu zavise od vrste i količine vlakana, numeričkog faktora, karakteristika same matrice te postupka ugrađivanja. Uopšte, beton armiran čeličnim vlaknima ima poboljšana fizičko-mehanička svojstva u odnosu na beton istog kvaliteta ali bez vlakana. Poboljšane karakteristike ogledaju se u povećanoj čvrstoći na savijanje, većoj nosivosti na poprečne sile, povećanoj žilavosti i apsorpciji energije, odloženom stvaranju pukotina, većoj izdržljivosti na dinamičke uticaje, otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje, otpornosti na habanje. Na osnovu teorijskih i eksperimentalnih istraživanja došlo se do zaključka o poboljšanim fizičko-mehaničkim karakteristikama mikroarmiranog betona u poređenju sa etalonima tj klasičnim betonom bez mikroarmature. Slijede neke od njih: raspucavanje i širenje pukotina elemenata napregnutih na zatezanje i savijanje se znatno redukuju i uticaj čeličnih vlakana na nosivost kod svih modela pri lomu je jasno izražen. Nosivi mehanizam obuhvata prenos naprezanja sa matrice na vlakna preko prionljivosti na njihovom spoju. Oba materijala (matrica i vlakno) zajednički prenose naprzanje sve dok matrica ne pukne. Poslije pucanja matrice, sva naprezanja na mjestu pukotine prihvataju vlakna. Do loma redovno dolazi zbog popuštanja veze spoja između vlakana i matrice. Iz ovih razloga se upravo pridaje veliki značaj atheziji matrice i vlakana. U ovakvom mehanizmu lom je duktilan, što je i poželjno. Ako bi do loma došlo zbog iscrpljenosti vlakana napregnutih na zatezanje, lom bi, takođe, bio duktilan zbog velikih mogućnosti plastičnog deformisanja čeličnih vlakana. Međutim, lom može biti i "krt" ako nema dovoljno vlakana, odnosno ako je njihova površina manja od minimalno potrebne da pri pojavi pukotine prihvati sva zatežuća naprezanja,

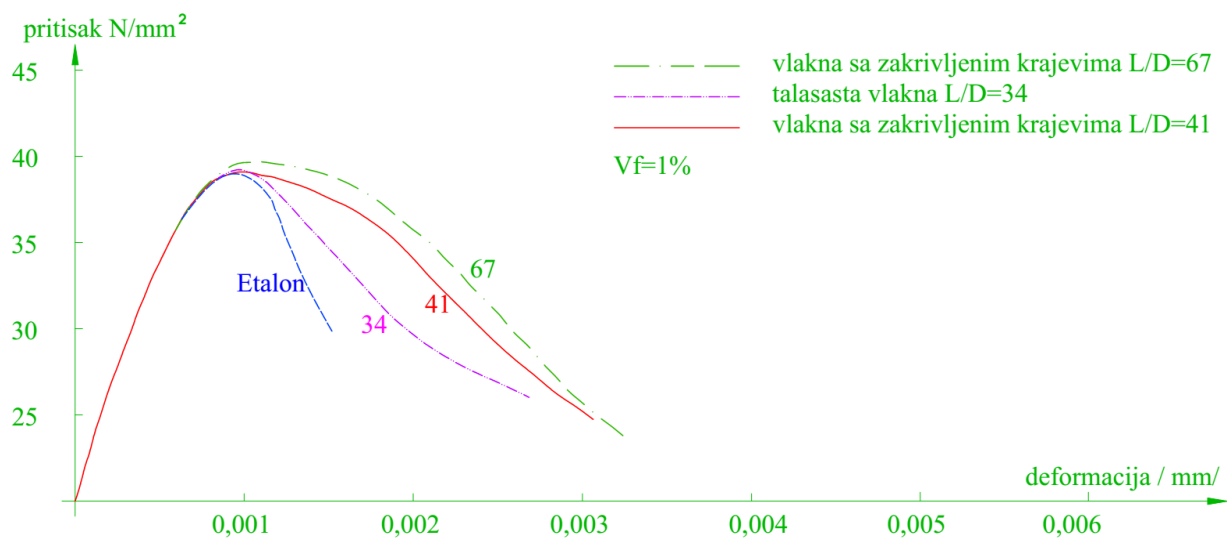
koja su prije toga bila raspoređena na matricu i vlakna. Povećana athezija postiže se vlaknima sa zakrivljenim krajevima, vlaknima sa kukama na krajevima ili rebrastim, kao i talasastim vlaknima, gdje se prionljivost zasniva na lijepljenju i mehaničkim vezama. Takođe postoji i prijedlog da se koristi i akril polimer u količini od 10-15% od težine cementa za povećanje athezije između matrice i vlakana. Ovaj dodatak omogućava dobru obradljivost, pa se može smanjiti količina vode i postići visoka čvrstoća betona. Dobra prionljivost se obrazlaže time što i nakon popuštanja veze lijepljenjem vlakna nisu glatka već hrapava zbog ostataka matrice na njima, pa se visoka prionljivost održava trenjem i mehanički. Poznavanjem fizičko-mehaničkih svojstava mikroarmiranog betona izuzetno je važno za proračun i konstruisanje objekata, i u nastavku se daje pregled ispitivanja koja su sprovedena u okviru predmetne doktorske disertacije na očvrslom betonu, starosti 28 dana.

4.4.1.2. Čvrstoća na pritisak

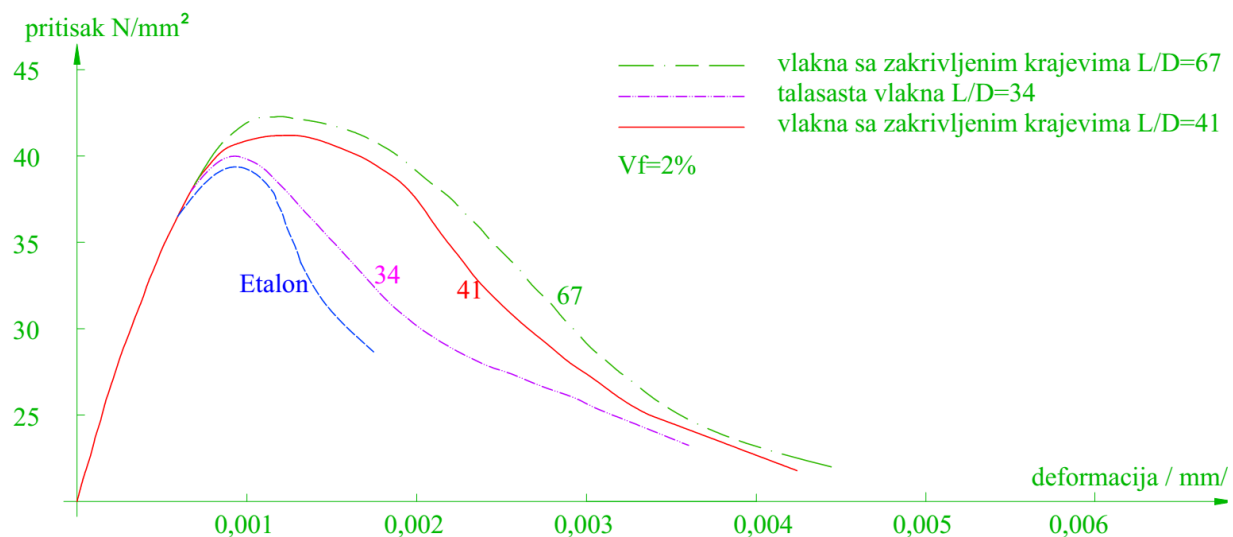
Čvrstoća betona na pritisak je prosječan napon u uzorku izloženom aksijalnom pritisku pri vrijednosti sile pri kojoj dolazi do loma, u slučaju određene starosti betona. Čvrstoća na pritisak je ispitivana na uzorcima oblika cilindra, starosti 28 dana na presi sa maksimalnom silom od 2000kN. Uslovi ispitivanja su bili takvi da je bila prisutna sile trenja, zbog kojih se stvaraju veoma složena naponska stanja, posebno u dijelovima uzorka na kontaktu između površine uzorka i prese kojom se nanosi sila. Na osnovu ispitivanja ustanovljeno je da se efekat čeličnih vlakana u pogledu čvrstoće na pritisak mikroarmiranog betona povećava od zanemarljive vrijednosti do 9,37% u odnosu na čvrstoću matrice tj. etalona. Posebnu pažnju bilo je potrebno posvetiti kompaktiranju betona prilikom ugradnje (specijalno u slučaju prisustva mikroarmature) jer u slučajevima nedovoljnog kompaktiranja moguće su smanjene čvrstoće na pritisak. Ovo se objašnjava zaostalim uvučenim vazduhom u mikroarmirani beton, što su pokazala i ispitivanja sadržaja vazduha u projektovanom betonu. Zavisnost ispitane čvrstoće na pritisak od parametara kao što su: numerički faktor, oblik vlakana, sadržaj vlakana u betonu prikazani su u tabeli br.4.21.

Tabela 4.21. Zavisnost čvrstoće na pritisak od vrste vlakana i količine vlakana poslije 28 dana

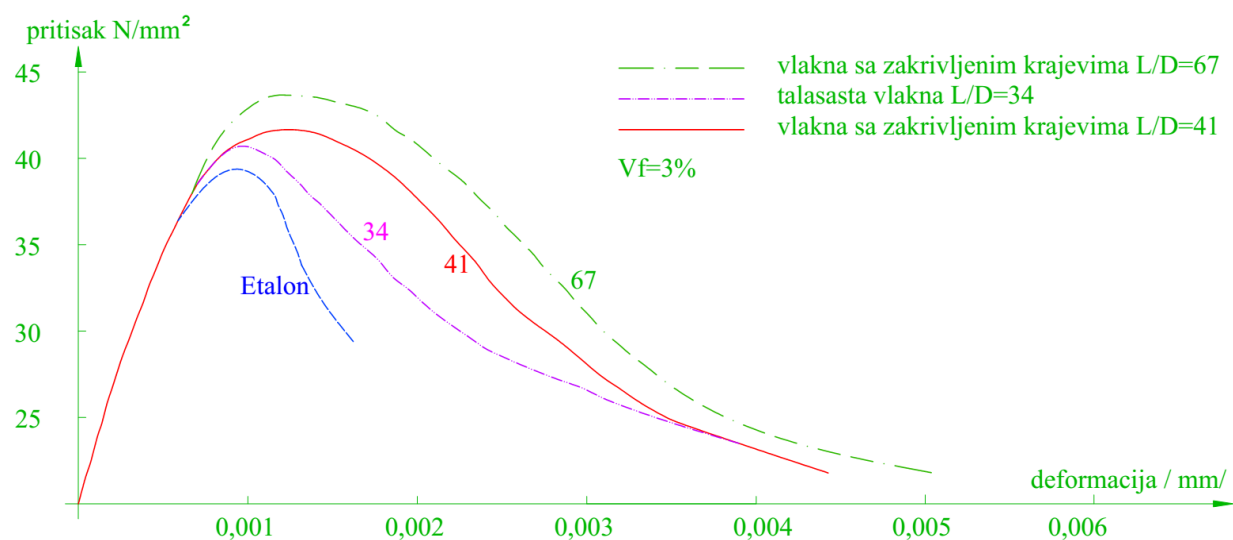
Karakteristike upotrijebljenih vlakana				Sadržaj vlakana	Čvrstoća na pritisak		
Oblik vlakana	L	D	L/D		Etalon (beton bez vlakana)	Mikroarmirani beton	Povećanje čvrstoće na pritisak
	[mm]	[mm]		%	[MPa]	[MPa]	%
	50	0,75	67	1	35,2	36,5	3,69
	50			2	35,2	37,1	5,39
	50			3	35,2	38,5	9,37
	31	0,75	41	1	30,4	32,6	7,23
	31			2	31,5	33,2	5,39
	31			3	32,0	34,6	8,12
	25	0,75	25	1	23,6	25,3	7,02
	25			2	24,1	24,2	0,41
	25			3	25,8	26,2	1,55



Sl. 4.15. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 1%



Sl. 4.16. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 2%



Sl. 4.17. Radni σ - ϵ dijagram mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana u količini od 3%

4.4.1.3. *Određivanje modula elastičnosti i reološko-dinamička analiza uzoraka betona sa čeličnim vlaknima $L/D=50/0,75$*

Iz kategorije deformacionih svojstava betona ispitivanjima je određen statički a zatim i dinamički modul elastičnosti pri pritisku na cilindrima prečnika 150mm i visine 300mm pri starosti od 28 dana.

Modul elastičnosti je vrlo važna karakteristika ne samo betona, već i svih građevinskih materijala. Modul elastičnosti se definiše na osnovu σ - ϵ dijagrama (dijagram odnosa napona i deformacija). Za određivanje modula elastičnosti izabrani su uzorci cilindričnog oblika kod kojih su odnosi podužnih i poprečnih dimenzija $d:h = 1:2$. Na istim takvim uzorcima vrši se i određivanje radnog dijagrama, koji opisuje zavisnost između napona i deformacija u slučajevima djelovanja kratkotrajnog opterećenja. Ispitivanje modula elastičnosti odvijalo se tako što se uzorak podvrgavao unaprijed predviđenom naprezanju, usljed kojeg dolazi do pojave deformacija (dilatacija). Vrijednosti naprezanja (opterećenja) i odgovarajućih dilatacija se zapisuju, pa se na osnovu tih podataka dobijaju radni dijagrami, koji između ostalog zavise i od brzine nanošenja opterećenja. Pošto se kod opterećivanja kratkotrajnim opterećenjem javljaju elastične (povratne) i plastične (nepovratne) dilatacije, ovo ispitivanje izvodilo se po pravilu naizmjeničnog višekratnog opterećivanja i rasterećivanja, koje ima za cilj da eliminiše sve druge oblike deformacija izuzev elastičnih. Linija napon(σ)-deformacija (ϵ) je samo za trenutno opterećenje pravolinijska, dok je u opštem slučaju kriva linija. Međutim, u području napona manjih od $(0,3 - 0,5)f_p$, (koje predstavlja i područje takozvanih radnih napona najvećeg broja betonskih konstrukcija), σ - ϵ dijagram jeste *približno* pravolinijski i modul elastičnosti se može definisati kao tangens ugla koji ta prava linija zaklapa sa apscisom.

Statički modul elastičnosti utvrđuje se odnosom:

$$E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$$

$\Delta \sigma$ – razlika napona σ_g (koji iznosi $1/3$ od f_p betona) i σ_d (koji iznosi $\sim 0,5$ Mpa)

$\Delta \epsilon$ – razlika srednjih vrijednosti dilatacija koje odgovaraju naponima σ_g i σ_d .

Poslije odgovarajućeg broja ciklusa opterećivanja i rasterećivanja σ - ε dijagram je približno prava linija na području napona (0,3–0,5) f_p i nagib te linije predstavlja modul elastičnosti betona (E).

Na samom početku ispitivanja polazi se od male vrijednosti napona σ_d (donja granica izabranog naprezanja), pa se uzorak opterećuje do napona σ_g (gornja granica opterećivanja). Nakon toga, uzorak se ponovno rasterećuje do vrijednosti napona σ_d , pa se cijeli ciklus ponavljao iznova nekoliko puta u području napona σ_d - σ_g , kako bi ostale samo elastične deformacije.

$$\Delta \varepsilon = \Delta l / l$$

Δl – srednja vrijednost razlike čitanja u posljednjem ciklusu

l - mjerna baza

Između modula elastičnosti i čvrstoće betona pri pritisku moguće je uspostaviti relacijski odnos – betoni većih čvrstoća imaju veće vrijednosti modula elastičnosti E.

Tako je, prema pravilniku o tehničkim normativima za beton i armirani beton, modul elastičnosti definisan izrazom:

$$E = 9,25 \sqrt[3]{f_{bk} + 10} \text{ – karakteristična vrijednost čvrstoće betona pri pritisku}$$

Modul elastičnosti je takođe i funkcija vremena. Sa starošću betona, rastu i vrijednosti modula elastičnosti pri čemu se u prvih 28 dana ostvari 70-80% vrijednosti koja odgovara teorijskom slučaju kada $t \rightarrow \infty$. Za vrijednost modula elastičnosti E karakterističan je brzi prirast u intervalu $t < 28$ dana, a poslije toga prirast je znatno manji. Poprečno širenje je približno jednako nuli pri krajevima, jer je uspostavljeno trenje između prese i ispitivanog uzorka, ali je u sredini dužine uzorka poprečno širenje najviše izraženo.

U slučaju mjerenja podužne dilatacije (Δl) i poprečnu dilataciju ($\Delta \varepsilon_{pop}$), tada se lako mogu izračunati i Poisson-ov koeficijent betona (μ) kao odnos poprečnih deformacija (ε_{pop}) i podužnih deformacija (ε_{pod}).

$$\varepsilon_{pop} = \frac{\Delta \varepsilon_{pop}}{\varepsilon_{0,pop}}; \varepsilon_{pod} = \frac{\Delta l}{l_0}; \mu = \frac{\varepsilon_{pop}}{\varepsilon_{pod}}.$$

Kao što je naglašeno, ispitivanje modula elastičnosti vršeno je na uzorcima cilindričnog oblika prečnika 150mm i visine 300mm, starosti 28 dana. Za mjerenje su korišteni komparatori sa podatkom 10^{-2} mm. S obzirom da autor nije pronašao Standard za pomenuto određivanje modula deformacije, isti je sproveden na osnovu Standarda za određivanje modula elastičnosti betonskih uzoraka opterećenih na pritisak. Uzorci su pripremljeni za ispitivanje, obilježene su mjerne baze $l_0 = 100\text{mm}$ i formirani su nosači za instrumente i komparateri. Zabilježeno je šest komparatera koji su vršili ulogu određivanja dilatacije sa tri strane uzoraka.

Poslije centriranja uzorka ispod prese, uzorak je opterećen naponom od 1,2MPa, zabilježena su pomjeranja na komparaterima. Odgovarajućom brzinom ($0,5 \pm 0,3$ MPa/s), opterećenje je raslo do graničnog koje je imalo različite vrijednosti za uzorke bez vlakana, i uzorke sa vlaknima u količini od 1%, 2% i 3%.

Zabilježena su stanja dilatacija sa komparatera pri graničnom naponu a napon je potom opet vraćen na početnu vrijednost. Ovaj postupak je ponovljen uzastopno tri puta uz stalna očitavanja. Nakon postizanja vrijednosti σ_g (gornja granica naprezanja) napon je nanijet do vrijednosti $\sim 0,5 \times \sigma_{\text{loma}}$, koji je prethodno predviđen i opet su očitane vrijednosti sa komparatera. Poslije sprovedenog ispitivanja uzorak je opterećen do loma. U ovom radu daje se primjer proračuna modula elastičnosti jednog cilindričnog uzorka bez vlakana i jednog cilindričnog uzorka sa vlaknima. Na ovaj način izvršena su mjerenja modula elastičnosti svih cilidara u seriji po tri, a zatim izračunate prosječne vrijednosti modula elastičnosti za uzorke različitih vrsta vlakana i različitog procentualnog učešća u masi betona.

*Tabela 4.22. Prikaz određivanja modula elastičnosti jednog uzorka cilindričnog etalona
dimenzija 150x300mm*

Modul elastičnosti – uzorak broj 1.					Etalon
Mjerno mjesto dilatacije 10⁻³(mm)	Sila (kN)				
1	0	20	140	240	460
2	0	4	45		
3	0	4	15		
4	0	1	21		
5	0	1	4		
6	0	0	3		
1		18	38		
2		3	18		
3		1	19		
4		1	5		
5		0	4		
6		0	1		
1		9	35	90	200
2		7	16	30	65
3		0	15	50	110
4		2	3	7	20
5		0	2	5	20
6		0	1	2	5

$$\Delta\sigma=(\sigma_g-\sigma_d)/A= 5,43 \text{ Mpa}$$

$$\Delta\varepsilon=(\Delta\varepsilon_1+ \Delta\varepsilon_2+ \Delta\varepsilon_3)/3= 0,00023 \text{ MPa}$$

$$Ee_1=23608,7 \text{ Mpa}$$

Tabela 4.23. Prikaz određivanja modula elastičnosti cilindričnog mikroarmiranog uzorka, dimenzija 150x300mm, 2% čeličnih vlakana L/D=50/0,75

Modul elastičnosti – uzorak broj 1. Mikroarmirani beton 2% čeličnih vlakana L/D=50/0,75							
Mjerno mjesto dilatacije 10⁻³(mm)	Sila (kN)						
1	0	20	140	240	460	540	600
2	0	5	30				
3	0	3	20				
4	0	1	15				
5	0	0	2				
6	0	1	0				
1		2	28				
2		10	13				
3		1	15				
4		1	2				
5		0	1				
6		0	0				
1		2	30	55	150	480	600
2		1	15	20	50	153	200
3		7	10	30	99	134	234
4		0	2	5	15	54	150
5		1	1	4	13	34	50
6		2	1	1	7	30	45

$$\Delta\sigma=(\sigma_g-\sigma_d)/A= 5,43 \text{ Mpa}$$

$$\Delta\varepsilon=(\Delta\varepsilon_1+ \Delta\varepsilon_2+ \Delta\varepsilon_3)/3= 0,0003 \text{ MPa}$$

$$E_{21}=21720,0 \text{ Mpa}$$

Na osnovu izvršenih ispitivanja, izračunate su srednje vrijednosti modula elastičnosti E za etalonske uzorke:

$$E_e = 23608,7 + 18560,5 + 17581,95 / 3 = 19917,05 \text{ Mpa}$$

kao i za uzorke od mikroarmiranog betona i to:

1% čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$

$$E_1 = 21350,40 + 20450,2 + 20467,28 / 3 = 20879,16 \text{ Mpa};$$

2% čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$

$$E_2 = 21720,0 + 22415,3 + 22418,5 / 3 = 22061,4 \text{ Mpa}$$

3% čeličnih vlakana faktora oblika $L/D=50/0,75$

$$E_3 = 22231,4 + 22140,05 + 22177,4 / 3 = 22182,95 \text{ Mpa}$$

Na slici br.4.18. su prikazani rezultati reološko-dinamičkog modela ponašanja materijala u standardnom betonskom cilindru na osnovu eksperimentalnih podataka iz tabele br. 4.24. Iz priloženog se zaključuje, kako prisustvo vlakana raste to Poasonov koeficijent opada. U daljem razmatranju, na osnovu sprovedenih ispitivanja to znači da kompozitni materijal kakav je mikroarmirani beton jeste krući materijal u poređenju sa etalom a samim tim mikroarmirani beton ima i veću deformabilnost. Ovo je izuzetno važna činjenica koju je potrebno naglasiti kod analiziranja mikroarmiranog betona. U pogledu radnog dijagrama bitna je deformacija pri pritisknoj čvrstoći f_c kao i ultimna deformacija. Pritisne čvrstoće i odgovarajuće deformacije se kod sva četiri uzorka betona poklapaju sa ekperimentalnim podacima.

Uobičajeno je da se u kvazi-statičkom analiziranju ovih dijagrama razmatra i energija loma, odnosno žilavost pri pritisku, G_C . Takođe minimalni koeficijent lomljivosti, f_c/G_C određuje najpovoljniju mješavinu betona u cilindru. U ovom slučaju, to je etalon–uzorak bez vlakana.

Tabela 4.24. Rezultati modula elastičnosti etalona i mikroarmiranog betona ($L/D=50/0,75$)

1. Karakteristike uzorka betona/etalona bez vlakana.

$F_{b, 28}=37,60$ Mpa

ρ (kg/m ³)	E_h (Mpa)	E_d (Mpa)	μ	ε (mm)
2195,38	19917,05	24877.312	0.188	0,003

2. Karakteristike uzorka mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana: $V_f= 1\%$ u 1m³ betona.

$F_{b, 28}= 38,00$ Mpa

ρ (kg/m ³)	E_h (Mpa)	E_d (Mpa)	μ	ε (mm)
2210,16	20879,16	26079,95	0.1685	0,0033

3. Karakteristike uzorka mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana: $V_f= 2\%$ u 1m³ betona.

$F_{b, 28}=38,7,00$ Mpa

ρ (kg/m ³)	E_h (Mpa)	E_d (Mpa)	μ	ε (mm)
2235,64	22061,4	27557,75	0.1565	0,0034

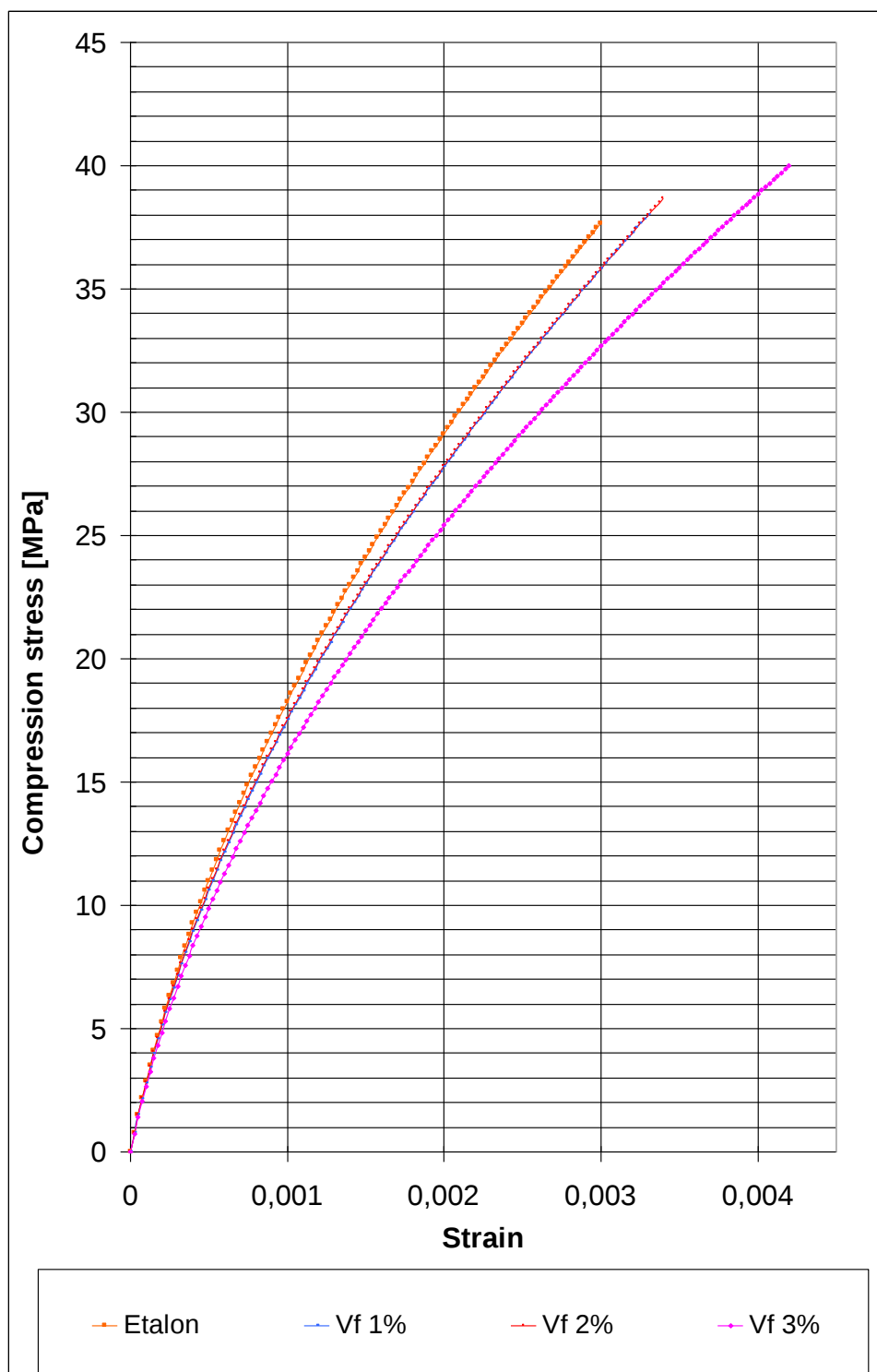
4. Karakteristike uzorka mikroarmiranog betona sa prisustvom vlakana: $V_f = 3\%$ u 1m^3 betona.

$$F_{b, 28} = 40,00 \text{ MPa}$$

ρ (kg/m ³)	E_h (Mpa)	E_d (Mpa)	μ	ϵ (mm)
2258,23	22182,95	27709,68	0.1373	0,0042

Tabela 4.25. Rezultati reološko-dinamičke analize mikroarmiranog betona ($L/D=50/0,75$)

beton	f_c	$\square_{f_c}$	$\square_{ult.}$	G_C N/mm	f_c/G_C
Etalon	37.6	0.003	0.004794	21.0711	1.784
V_f 1%	38	0.0033	0.004979	20.0526	1.895
V_f 2%	38.7	0.0034	0.004954	19.1411	2.022
V_f 3%	40	0.0042	0.005791	20.3057	1.970



Sl. 4.18. Grafički prikaz reološko-dinamičkog modela za vlakna faktora oblika $L/D=50/0,75$

4.4.1.4. Ispitivanje čvrstoće na zatezanje

Iako je čvrstoća betona pri zatezanju (f_z) znatno manja od čvrstoće betona pri pritisku, poznavanje čvrstoće betona pri zatezanju je korisno kako bi se utvrdilo kada će se početi razvijati prsline. Prsline predstavljaju nedostatak betona koji bitno utiče na fizičko–mehanička svojstva betona kao i na trajnost betonskih konstrukcija. Čvrstoća betona pri zatezanju (f_z) zavisi prvenstveno od vrste agregata, sadržaja cementa, vodocementnog faktora, vrste i količine vlakana, faktora oblika, tehnoloških postupaka spravljanja, ugrađivanja te njege betona. Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju (f_z) se najčešće vrši jednom od metoda:

- ispitivanje direktnim aksijalnim zatezanjem,
- ispitivanje savijanjem i
- ispitivanje cijepanjem putem linijskog pritiska

$$f_z = 2 \times P_{\text{loma}} / \pi \times d \times l$$

P_{loma} – granična sila loma uzorka

$$f_z = 1,95 \text{ MPa}$$

d – prečnik cilindra

l – dužina cilindra

Ispitivanja na zatezanje su sprovedena metodom cijepanja putem linijskog pritiska poslije 28 dana, na uzorcima cilindra dimenzija 150x300mm. Uzorci su bili postavljeni na postolje i zatim su se opterećivali u sredini raspona pomoću prese, preko elementa za centrično nanošenje pritiska sve do loma. Prilikom loma bilježeni su rezultati granične sile P_{loma} , sa prese. Kod metode ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cijepanjem do loma uzoraka dolazi pri složenom naponskom stanju (istovremeno se javljaju zatezanje i pritisak), pri čemu se pretpostavlja da je cijepanje posljedica prekoračenja graničnih napona zatezanja (koji su za većinu betona 10 do 15 puta niži od graničnih napona pritiska). Na mjestima kontakta čeličnih ploča prese i betonskog uzorka postavljaju su odgovarajući distanceri koji obezbjeđuju ravnomjerno prenošenja sile pritiska duž izvodnica cilindra.

Zavisnost čvrstoće na zatezanje od numeričkog faktora, oblika vlakana i sadržaja vlakana u betonu prikazani su u tabeli br.4.26. Potrebno je napomenuti da se čvrstoća na zatezanje

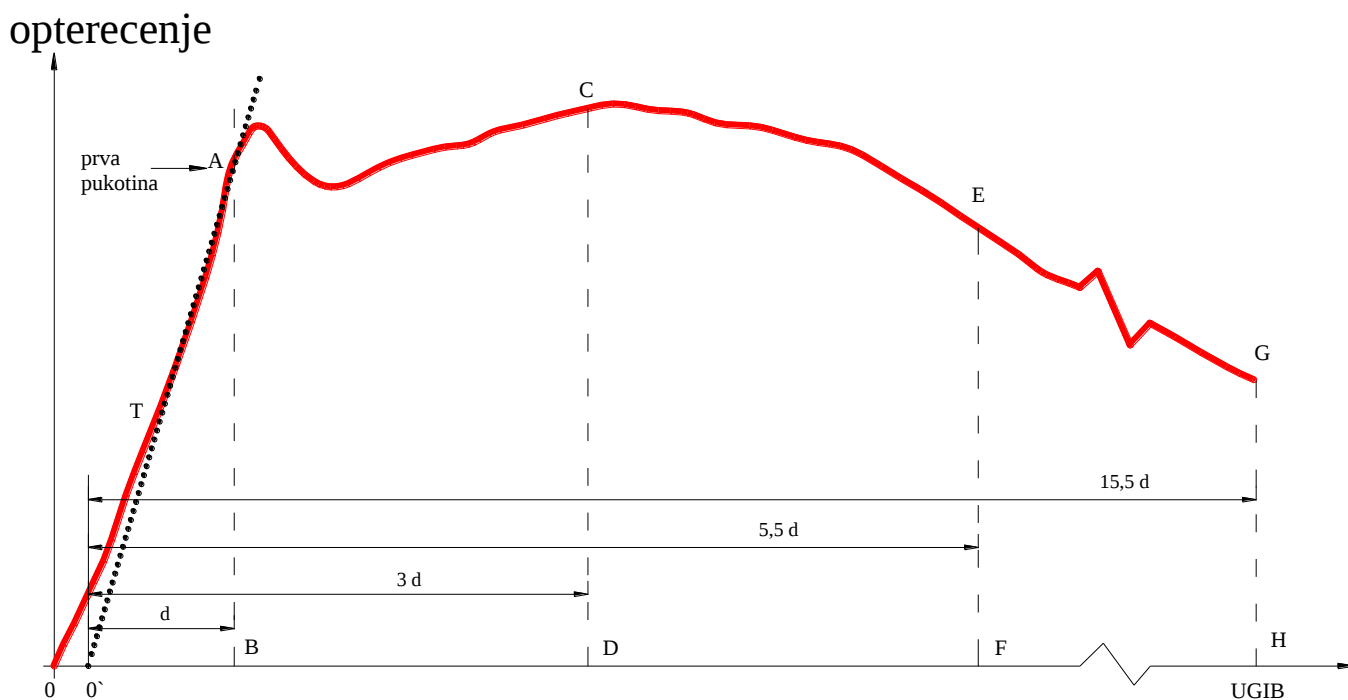
vlaknastog betona povećala znatno u odnosu na čvrstoću na zatezanje bez vlakana. Međutim, žilavost vlaknastog betona može biti dvostruko veća od njegove matrice. Ovo se objašnjava velikim otporom izvlačenja vlakana nakon otvaranja mnogobrojnih uskih pukotina. Za sada nema standardne metode za dobijanje radnog dijagrama napon–deformacija za vlaknasti beton naprežan na zatezanje. Karakteristike dijagrama zavise od više faktora od kojih su najznačajniji: veličina uzorka, metoda ispitivanja, vremensko trajanje mjerenja, kao i broj pukotina koje se javljaju na posmatranom uzorku.

Tabela 4.26. Rezultati čvrstoća na zatezanje pri upotrebi različitih vrsta vlakana i količine vlakana

Karakteristike upotrijebljenih vlakana				Sadržaj vlakana	Čvrstoća na zatezanje		
Oblik vlakana	L	D	L/D		Etalon (beton bez vlakana)	Mikroarmirani beton	Povećanje čvrstoće na zatezanje
	[mm]	[mm]		%	[MPa]	[MPa]	%
	50	0,75	67	1	6,0	11,59	93,16
	50			2	6,0	12,0	100
	50			3	6,0	11,7	95
	31	0,75	41	1	6,0	9,5	58,33
	31			2	6,0	9,4	56,66
	31			3	6,0	9,4	56,66
	25	0,75	25	1	6,0	7,8	30
	25			2	6,0	7,9	31,66
	25			3	6,0	8,0	33,33

4.4.1.5. Čvrstoća na savijanje

Uticaj čeličnih vlakana na čvrstoću pri savijanju mikroarmiranog betona je mnogo veći nego na čvrstoću na pritisak i čvrstoću na zatezanje. Kod elemenata napregnutih na savijanje daju se obično dvije čvrstoće. Prva nazvana "čvrstoća kod pojave prve pukotine", odgovara na dijagramu opterećenju – ugib tački do koje je dijagram približno linearan (tačka A, slika br.4.19.) a druga, nazvana "granična čvrstoća", odgovara maksimalno postignutom naponu. Na slici br. 4.19. to je tačka C koja odgovara maksimalnom opterećenju.



Slika 4.19. Dijagram opterećenje - ugib mikroarmiranog betona, grede 100X100X400mm

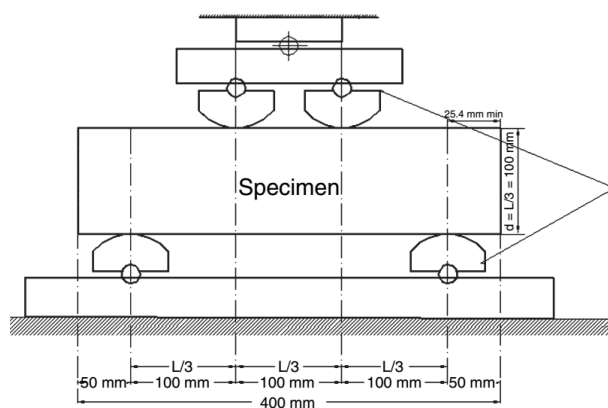


Sl.4.20. Uzorak bez čeličnih vlakana za ispitivanje čvrstoće na savijanje

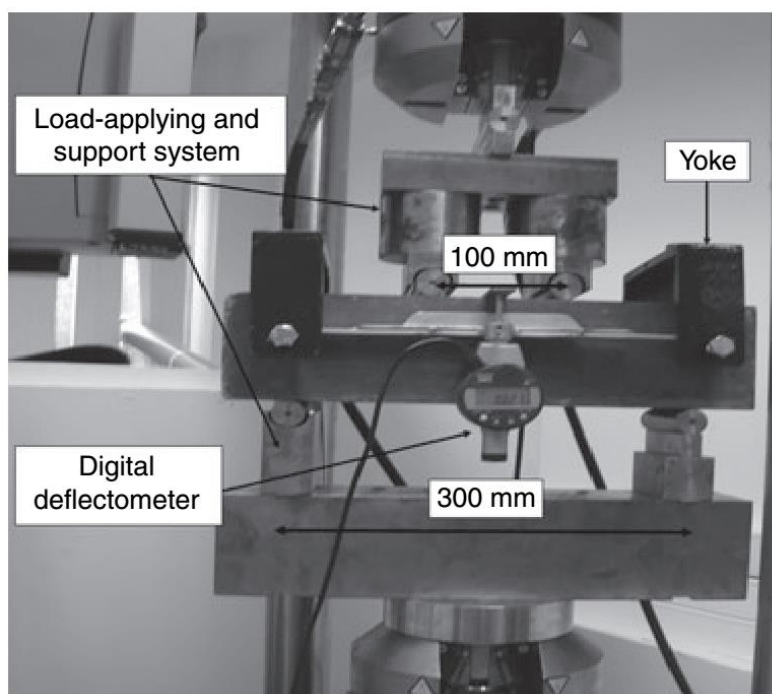


Sl.4.21. Uzorak sa čeličnim vlaknima za ispitivanje čvrstoće na savijanje

Da bi se predstavila funkcionalna zavisnost savijanja, žilavosti, otpornosti na savijanje i drugih faktora čvrstoće kod greda, u ovom eksperimentu je korišten ASTM C1609/C1609M-05 standard. Test savijanja za četiri karakteristične tačke je izvršen na snopu uzoraka veličine 100x100x400mm (po tri uzorka za svaku mješavinu). Testovi su sprovedeni na servo-hydraulic Instron 8801 mašini sa maksimalnim opterećenjem od 100kN. Pripremanje uzoraka i podrška cijelog sistema je sprovedena u skladu sa ASTM C78-02 (sl. 4.22.), dok je na slici 4.23. predstavljena pomoćna aparatura za sprovođenje testa savijanja za četiri karakteristične tačke. Tačno mjerenje ugiba je od velike važnosti za određivanje žilavosti mikroarmiranog betona.



Sl. 4.22. Šema opterećenja primjenjenog sistema prilikom ispitivanja čvrstoće na savijanje



Sl.4.23. Aparat za sprovođenje testa savijanja za četiri karakteristične tačkene gredama
dimenzija: 100x100x400mm

Skup parametara koji proizilazi iz sprovedenog testa opterećenje – ugib za svaki uzorak dat je u tabeli br.4.27.

Tabela 4.27. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka oblika grede 100x100x400mm

<i>Mješavina</i>	$P_1(N)$	$f_1(Mpa)$	$P_p(N)$	$f_p(Mpa)$	$P_{100,0,5}(N)$	$f_{100,0,5}(Mpa)$	$P_{100,2}(N)$	$f_{100,2}(Mpa)$	$T_{100,2}(J)$
Etalon	13970	4,0	13970	4,0	-	-	-	-	-
 L/D=67 1%	11970	3,5	11970	3,5	5679	2,2	4130	1,5	10
2%	14358	4,3	14378	4,4	8765	3,1	6525	2,3	13
3%	15080	4,8	17655	5,5	10745	4,2	8720	3,0	30
 L/D= 41 1%	10654	3,3	9980	3,4	5080	2,1	3956	1,3	8
2%	12435	4,4	12434	4,4	7535	2,8	5678	1,4	5
3%	14326	4,6	14420	4,7	9865	3,8	7654	1,6	20
 L/D=34 1%	12879	3,8	12879	3,8	4000	1,9	2000	0,89	5
2%	15785	4,5	15785	4,5	8570	3,85	5015	2,3	10
3%	16543	6,0	16543	6,0	10000	3,6	7895	2,1	15

Rezultati ispitivanja čvrstoće mikroarmiranog betona na savijanje koji su predstavljeni u prethodnoj tabeli govore da prisustvo i povećanje mikroarmature u mješavini betona doprinosi odlaganju pojave prve pukotine, i povećanju žilavosti, odnosno duktilnosti mikroarmiranog

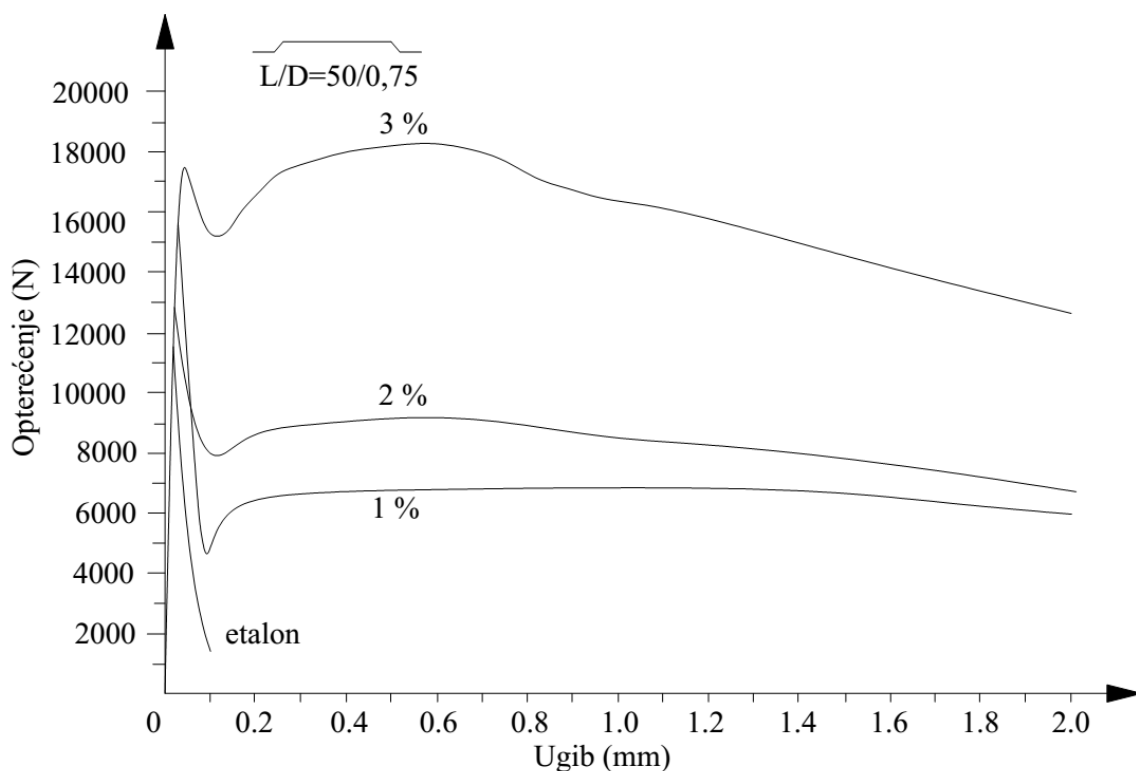
kompozita. Istovremeno se zaključuje da vlakna sa zakrivljenim krajevima doprinose većem povećanju žilavosti nego li je to slučaj sa talasatim vlaknima ali je primjetno da talasasta vlakna imaju bolju toleranciju za pojavu prve pukotine nego li je to slučaj sa vlaknima sa zakrivljenim krajevima.

Čvrstoća na savijanje (modul kidanja) je jednaka:

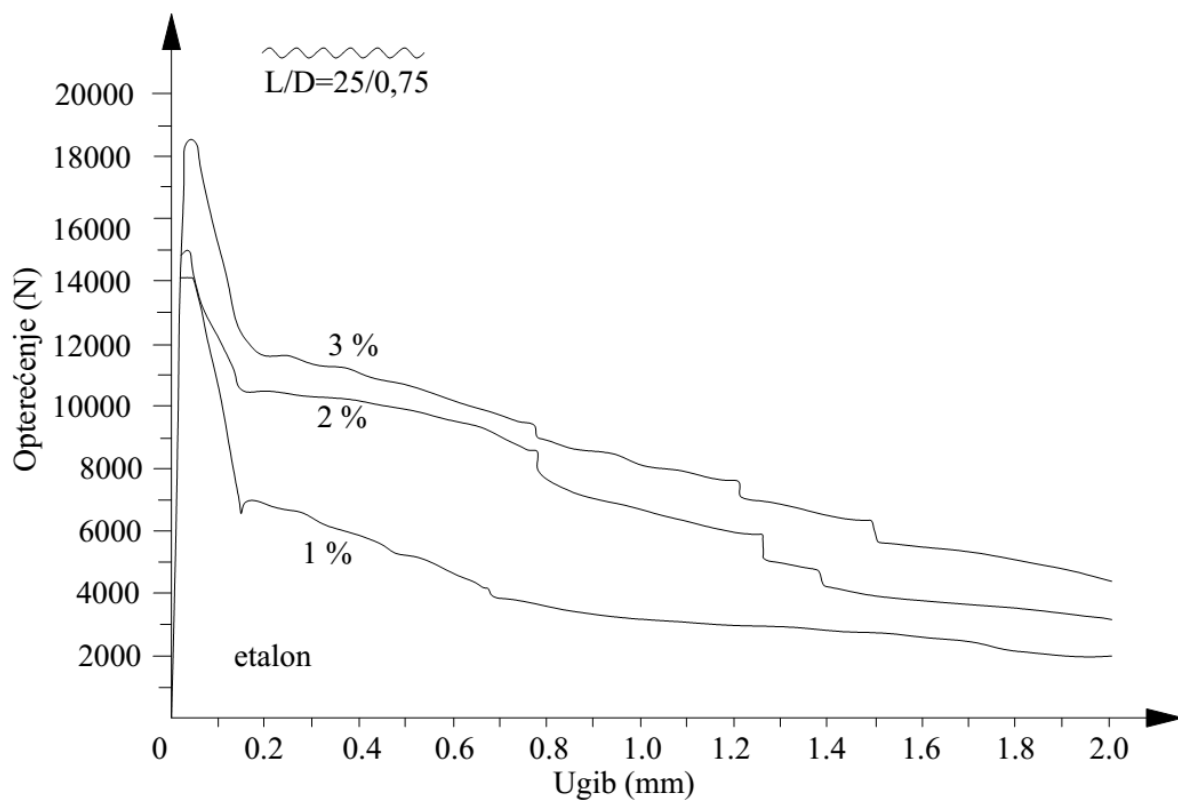
$$F = P \times L / b \times d^2,$$

pri čemu je:

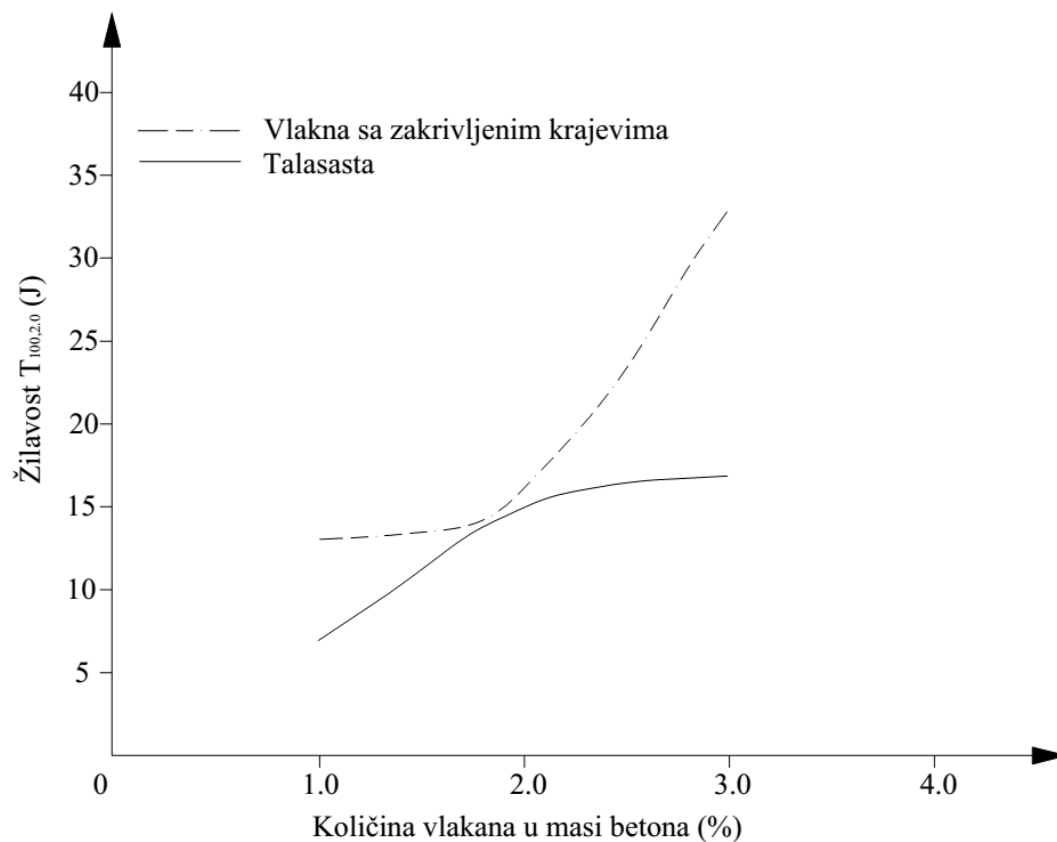
- P- opterećenje (N)
- L- rastojanje između oslonaca 300mm
- b – širina uzorka (100mm)
- d - prosjek dubine prsline (100mm)



Sl.4.24. Rezultati poređenja dobijenih dijagrama (opterećenje – ugib) za različite količine učešća vlakana u masi betona, faktora oblika $L/D=50/0,75$

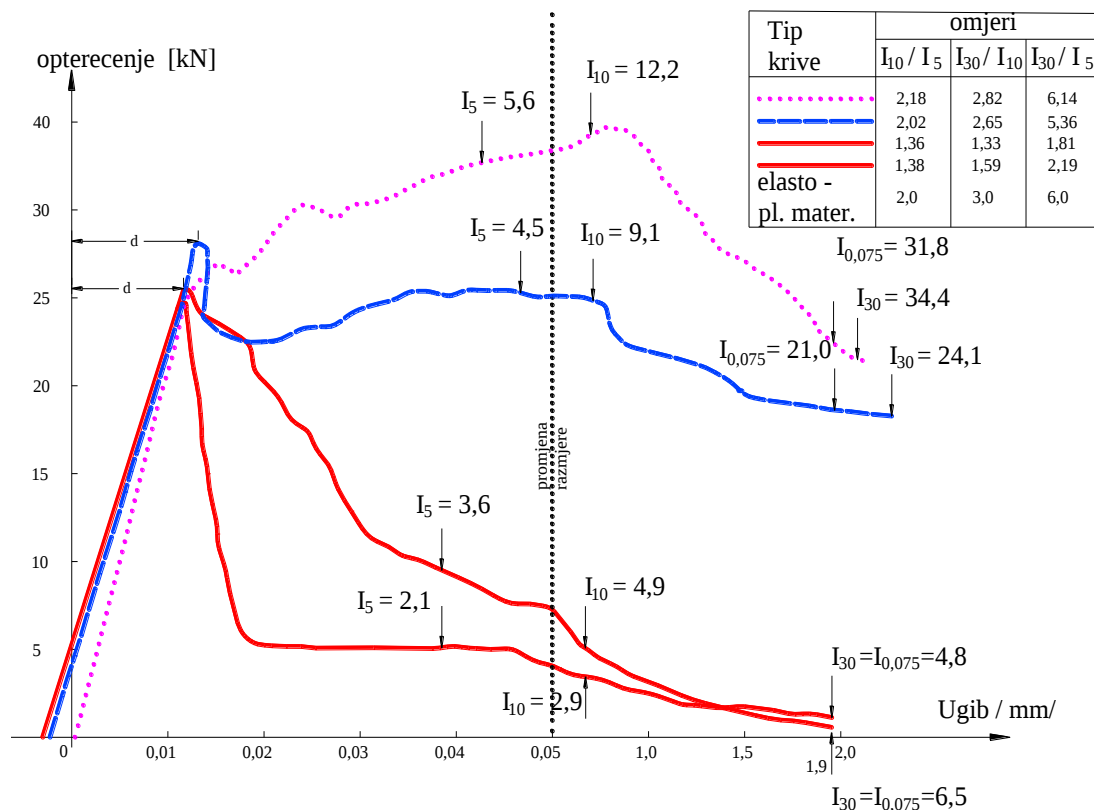


Sl.4.25. Rezultati poređenja dobijenih dijagrama (opterećenje – ugib) za različite količine učešća vlakana u masi betona, faktora oblika $L/D=25/0,75$



Sl.4.26. Rezultati poređenja žilavosti mikroarmiranog betona za upotrijebljena vlakna:
 $L/D=50/0,75$ i $L/D=25/0,75$

Pri upotrebi veće količine čeličnih vlakana (gornja kriva na slici 4.27.), jasno su izražene obje čvrstoće (čvrstoća raspucavanja i granična čvrstoća). Međutim, kod upotrebe male količine vlakana događa se da je čvrstoća koja odgovara pojavi prve pukotine ujedno i maksimalna, odnosno granična (donja kriva na slici 4.27.).



Sl.4.27. Uticaj količine i vrste vlakana na čvrstoću na savijanje

Oblik padajuće grane, odnosno površina ispod krive vrlo je značajna jer je karakteriše žilavost pri savijanju, što je važno svojstvo materijala. Ispitivanje čvrstoće pri savijanju, kako je već pomenuto, sprovedeno je na gredicama 100x100x400mm. Međutim, moguće su i druge dimenzije uzoraka za ispitivanje zavisno od dimenzija konstrukcije i dužine vlakana. Minimalna dimenzija uzorka trebalo bi da bude veća od tri dužine vlakna i maksimalnog zrna agregata. Potrebno je napomenuti da rezultati zavise od dimenzija uzorka te ih je potrebno preračunati na rezultate uzoraka standardnih dimenzija. Granična čvrstoća pri savijanju raste sa količinom vlakana (V_f) i numeričkim faktorom (L/D). Količina vlakana od 1% i numeričkim faktorom manji od 50 ugrađena u beton, daju mikroarmirani beton kome će padajuća grana imati nagli pad. Granična čvrstoća biće jednaka onoj kod koje nastaje prva pukotina. Upotrebom veće

količine vlakana, posebno onih sa velikom prionljivošću, dobiće se mikroarmirani beton kod koga su čvrstoće na savijanje i za 100 % veće od njegove matrice.

Uopšte, čvrstoće vlaknastog betona na savijanje zavise od količine i vrste vlakana te od vodocementnog faktora. Visoke čvrstoće mogu se postići upotrebom veće količine vlakana, te upotrebom plastifikatora ili superplastifikatora za redukciju vodo-cementnog faktora. Takođe je potrebno napomenuti da tehnologija spravljanja mikroarmiranog betona i homogenost mješavine daju nemjerljiv doprinos u postizanju poboljšanih karakteristika mikroarmiranog betona.

4.4.1.6. Ispitivanje dinamičke-udarne otpornosti mikroarmiranih ploča

Čvrstoća mikroarmiranog betona koji je opterećen udarom, dinamičkim savijanjem, zatezanjem i pritiskom, znatno je veća od čvrstoće istog betona, bez vlakana. Osjetno povećanje dinamičke čvrstoće obrazlaže se potrebom velike energije za izvlačenje vlakana iz matrice, odnosno raspucavanje i drobljenje mikroarmiranog betona izloženog naglim promjenama opterećenja. Ukupna apsorpcija energije ploča mikroarmiranog betona napregnutog na udarno, dinamičko opterećenje dobijena je u laboratoriji razvijanjem sopstvene metode za ispitivanje ploča. Eksperimentalno ispitivanje na udarno, dinamičko opterećenje bilo je potrebno sprovesti u svrhu dokazivanja odnosa vrste upotrijebljenih čeličnih vlakana, količine upotrijebljenih čeličnih vlakana na udarnu otpornost jednog od osam mlinova za dopremanje rude u Termoelektrani Gacko. U nedostatku metoda za ispitivanje, a u svrhu stvarnog simuliranja problema, razvijena je sopstvena metoda za udarno opterećenje i postavljeni su granični uslovi ispitivanja.

Formulisanje modela za ispitivanje i formiranje graničnih uslova zasnivano je prema novoj metodi ispitivanja prilagođenoj zahtjevu postavljenog problema. Princip ispitivanja se sastojao u tome da se uzorak (betonska i mikroarmirana ploča) i nadsloja (metalne ploče debljine 1,5cm) opterećuje tegom mase 7,24 kg koji pada kroz cijev na metalnu podlogu u sredini ploče. Ukoliko pri početnoj visini ispitivanja nakon serije od 12 udaraca pri brzini od 2,5m/s ne dođe do oštećenja betonske ili mikroarmirane podloge, visina se povećava za 1 korak u rasponu od 0,25m pa sve do konačnih 2,0m. Dakle, za svaku predloženu visinu ispitivanja od: 0,25m; 0,5m; 0,75m; 1,0m; 1,25m; 1,5m; 1,75m; i 2,0m predviđa se serija od po 12 udaraca. Ako poslije svih serija ne

dode do konačnog loma uzoraka (što je bio slučaj u predmetnom ispitivanju), broj padova sa visine od 2,0m se ponavljao do konačnog loma uzorka. Svaki udar je morao biti u centru ispitivane ploče, na površini uzorka, a rezultat ispitivanja je potrebna energija za nastanak prve pukotine ili druge vrste oštećenja (drobljenje, odlamanje). Dakle, zadatak sprovedenog istraživanja je bio da se na osnovu prisustva različite vrste vlakana i količine vlakana u masi betona uspostavi relacija i promjene koje se dešavaju na različitim debljinama betonskih ili mikroarmiranih ploča.

Rezultati analize pokazali su da se povećanjem debljine ploče i povećanjem prisustva količine čeličnih vlakana smanjuju naprezanja u ploči. Takođe, povećanjem debljine čeličnog nadsloja, smanjuju se naprezanja u betonu. Širenje talasa pukotina kroz ploču se smanjuje usljed povećanja debljine ploče i količine prisutnih vlakana u poređenju sa etalonima, pločama bez vlakana. Ispitivanja su sprovedena na pločama bez vlakana, dimenzija kao u tabeli broj. 4.28. kao i na pločama istih dimenzija ali sa prisustvom čeličnih vlakana u količini 1%, 2%, 3% u masi betona i njihovih osobina kao u tabeli broj 4.29.

Tabela 4.28. Dimenzije betonskih i mikroarmiranih ploča na kojima je sprovedeno udarno opterećenje

Veličina uzorka	Granični uslovi
40×40×5cm+nadsloj	Kruta podloga
40×40×10 cm+nadsloj	
40×40×15 cm+nadsloj	
40×40×20 cm+nadsloj	
40×40×30 cm+nadsloj	
40×40×40 cm+nadsloj	

Tabela 4.29. Vrsta upotrijebljenih čeličnih vlakana za ispitivanje mikroarmiranih ploča

Karakteristika	Čelična vlana sa zakrivljenim krajevima		Talasasta čelična vlana
Oznaka	L/D=0,75/50	L/D=0,75/31	L/D= 0,75/25
Osnovni materijal	čelik i aluminijum	čelik	čelik
Tip vlakana	sa zakrivljenim krajevima	sa zakrivljenim krajevima	Talastasata vlakna
Poprečni presjek vlakana	Kružni	kružni	kružni
Prečnik vlakana	0,75	0,75	0,75
Dužina vlakana	50	31	25
Faktor oblika	67	41	34
Čvrstoća pri zatezanju (Mpa)	1150	1250	1300
Preporučeno doziranje (kg/m ³)	20-70	20-70	20-70

Ispitivanja su sprovedena u seriji po tri uzorka. Pri projektovanju objekata u kojima nastaju udarna, dinamička opterećenja neophodno je predvidjeti i mogućnost pojave te vrste naprezanja u betonskim elementima. Naime, zbog samog procesa proizvodnje, kretanja teških vozila, pretovarivanja i skladištenja sirovina, velika je vjerovatnoća oštećenja površine od udara. Pri tome nastaju oštećenja u obliku pukotina, odlamanja površinskog sloja i drobljenja, čije su posljedice ne samo skupe sanacije, već i zastoj u proizvodnji koji dovodi do dodatnih troškova. Kako se pri sanaciji betonskih površina za dopremanje rude uglja na jednom od osam kanala termoelektrane Gacko javila potreba za definisanjem metode ispitivanja takvih betonskih površina na pojavu udarnog opterećenja, ova doktorska disertacija dala je eksperimentalni odgovor na taj problem. Naime, osnovno polazište je bila činjenica da su ploče od mikroarmiranog betona sistemi koji se sastoje od nekoliko slojeva potpuno različitih karakteristika (mikroarmirane ploče i metalna ploča koja predstavlja završni sloj) tako da

postojeće normirane metode ispitivanja ne odgovaraju postavljenom problemu s obzirom na oblik, dimenzije lijevka, i sam način sprovođenja udarnog opterećenja.

4.4.1.6.1. Predložena metoda ispitivanja

Na osnovi pregledanih normiranih metoda ispitivanja, zaključeno je da niti jedan od postupaka ispitivanja ne odgovara postavljenom problemu. Većina metoda ispituje pojedinačno beton a nikako višeslojni sistem. Pojedine metode u kojima je predviđeno ispitivanje sistema, nisu prikladne zbog veličine opterećenja.

Uzimajući u obzir osnovne principe iz normiranih metoda ispitivanja, zaključeno je da su sljedeći parametri relevantni za otpornost mikroarmiranih ploča sa čeličnim nadslojem na udarno-dinamičko opterećenje:

- veličina uzorka
- uslovi oslanjanja uzorka (konturni uslovi)
- veličina opterećenja

S obzirom na izloženo, za određivanje otpornosti na udarno opterećenje predložena je aparatura koja se sastoji od cijevi ukupne visine 200 cm i čelične kugle prečnika 7 cm, mase 7,24 kg. Uzorak se sastoji od betonske ili mikroarmirane ploče dimenzija kao u tabeli br. 4.28. na čiju se gornju površinu postavlja nadsloj - čelična ploča debljine 1,5cm. Teg pada kroz cijev na čeličnu ploču u prvom koraku sa visine od 0,25m, uvijek na sredinu uzorka, u vremenskim intervalima: 1min – 1 pad. Ukoliko pri početnoj visini ispitivanja, nakon 12 padova ne dođe do konačnog loma, visina se nakon prvih 12 padova povećava na sledeću visinu 0,5m i tako redom do visine cijevi od 2m. Ako se ni poslije 12 udaraca sa visine od 2 m ne desi granični lom, nastavlja se ponavljanje broja udaraca sa visine od 2,0m do konačnog loma. Pri tome se mjeri veličina udubljenja, odlamanja dijelova ploče i bilježi se vrsta oštećenja na mikroarmiranoj betonskoj ploči. Rezultat ispitivanja je energija potrebna za nastanak prve pukotine ili druge vrste oštećenja (drobljenje, odlamanje) kao i energija koja dovodi do potpunog sloma mikroarmirane betonske ploče.

Ponašanje konstrukcijskih dijelova izloženih udarnom opterećenju zavisi od uzajamnog djelovanja tijela koje se ispituje kao i tijela kojim se vrši ispitivanje. Njihova međusobna interakcija zavisi od odnosa masa, njihovih veličina, krutosti, relativne brzine izvođenja eksperimenta, graničnim uslovima oslanjanja ploče. Na osnovu sprovedenog ispitivanja moguće je prikazati odgovor konstruktivnih dijelova (mikroarmiranih ploča) na udarno opterećenje koji se dijeli na primarni odgovor konstrukcije koji se javlja odmah nakon udara u kontaktnoj zoni dvije mase i sekundarni odgovor koji se događa kasnije i na širem području konstrukcije. Sekundarni odgovor se još naziva dinamički odgovor. Teorijskom analizom nakon sprovedenog eksperimenta valorizovani su rezultati koji su postignuti eksperimentom, pri čemu su analizirani sledeći slučajevi:

- 1 Uticaj debljine mikroarmiranih ploča
- 2 Uticaj karakteristika nadsloja (čelična podloga)
- 3 Uticaj položaja opterećenja

Plan eksperimentalnog istraživanja i formulisanje karakterističnih slučajeva za određivanje uticaja promjene debljine mikroarmiranih ploča, karakteristike nadsloja, uslova oslanjanja na podlogu i položaja djelovanja opterećenja prikazan je u tabeli br. 4.30.

Tabela 4.30. Karakteristike eksperimentalnog ispitivanja mikroarmiranih ploča

Veličina uzorka; etalon i mikroarmirane ploče	Granični uslovi	Debljina nadsloja, čelične ploče	Položaj dejstva opterećenja
40×40×5cm+nadsloj	Kruta podloga, nije spriječeno bočno pomjeranje	1,5cm	U centru ploče
40×40×10 cm+nadsloj		1,5cm	U centru ploče
40×40×15 cm+nadsloj		1,5cm	U centru ploče
40×40×20 cm+nadsloj		1,5cm	U centru ploče
40×40×30 cm+nadsloj		1,5cm	U centru ploče
40×40×40 cm+nadsloj		1,5cm	U centru ploče

Udarno opterećenje definisano je kao sila u vremenu pri čemu je veličina sile u funkciji mase i visine sa koje teg pada na betonsku ili mikroarmiranu ploču. Za potrebe teorijske analize, izvršeni rad je dobijen zapisom u sprovedenom eksperimentu.

Tabela 4.31. Rezultati ispitivanja betonskih ploča (etalona) na dinamičko-udarno opterećenje

Broj uzorka	Debljina betonske ploče bez vlakana (m)	Visina pada kugle h(m)	Broj padova kugle	Masa kugle m=7,24kg	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.	0,05	0,25	1	7,24	-	-	-	3,62
		0,25	1	7,24	+	-	1,5	
	0,1	0,25	12	7,24	+	+	1,5	65,16
		0,5	12	7,24	+	+	2,7	
	0,15	0,25	12	7,24	+	+	2,0	202,72
		0,5	12	7,24	+	+	2,2	
		0,75	12	7,24	+	+	2,4	
		1,0	12	7,24	+	+	3,0	
	0,20	0,25	12	7,24	+	+	1,5	316,75
		0,5	12	7,24	+	+	1,7	
		0,75	12	7,24	+	+	1,9	
		1,0	12	7,24	+	+	2,1	

		1,25	11	7,24	+	+	2,4	
	0,25	0,25	12	7,24	+	+	1,2	434,4
		0,5	12	7,24	+	+	1,4	
		0,75	12	7,24	+	+	1,5	
		1,0	12	7,24	+	+	1,6	
		1,25	12	7,24	+	+	1,7	
		1,5	10	7,24	+	+	1,9	
	0,30	0,25	12	7,24	+	+	1,0	608,16
		0,5	12	7,24	+	+	1,1	
		0,75	12	7,24	+	+	1,2	
		1,0	12	7,24	+	+	1,3	
		1,25	12	7,24	+	+	1,4	
		1,5	12	7,24	+	+	1,6	
		1,75	12	7,24	+	+	1,7	
	0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	781,92
		0,5	12	7,24	+	-	-	
		0,75	12	7,24	+	+	0,9	
		1,0	12	7,24	+	+	0,9	
		1,25	12	7,24	+	+	1,0	
		1,5	12	7,24	+	+	1,0	
		1,75	12	7,24	+	+	1,1	
		2,0	12	7,24	+	+	1,2	

2.	0,05	0,25	1	7,24	-	-	-	3,62
		0,25	1	7,24	+	-	2,0	
	0,1	0,25	12	7,24	+	+	2,2	65,16
		0,5	12	7,24	+	+	2,5	
	0,15	0,25	12	7,24	+	+	2,0	209,96
		0,5	12	7,24	+	+	2,1	
		0,75	12	7,24	+	+	2,4	
		1,0	11	7,24	+	+	2,9	
	0,20	0,25	12	7,24	+	+	1,3	307,7
		0,5	12	7,24	+	+	1,5	
		0,75	12	7,24	+	+	1,6	
		1,0	12	7,24	+	+	1,9	
		1,25	10	7,24	+	+	2,1	
	0,25	0,25	12	7,24	+	+	1,3	445,26
		0,5	12	7,24	+	+	1,4	
		0,75	12	7,24	+	+	1,6	
		1,0	12	7,24	+	+	1,7	
		1,25	12	7,24	+	+	1,8	
		1,5	11	7,24	+	+	1,9	
	0,30	0,25	12	7,24	+	+	1,0	595,49
		0,5	12	7,24	+	+	1,1	

		0,75	12	7,24	+	+	1,1	
		1,0	12	7,24	+	+	1,1	
		1,25	12	7,24	+	+	1,2	
		1,5	12	7,24	+	+	1,3	
		1,75	11	7,24	+	+	1,3	
	0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	781,92
		0,5	12	7,24	-	-	-	
		0,75	12	7,24	+	-	0,8	
		1,0	12	7,24	+	-	0,9	
		1,25	12	7,24	+	+	1,0	
		1,5	12	7,24	+	+	1,1	
		1,75	12	7,24	+	+	1,1	
		2,0	12	7,24	+	+	1,1	
3.	0,05	0,25	1	7,24	-		-	3,62
		0,25	1	7,24	+		2,0	
	0,1	0,25	12	7,24	+	+	2,1	65,16
		0,5	12	7,24	+	+	2,3	
	0,15	0,25	12	7,24	+	+	1,9	217,2
		0,5	12	7,24	+	+	2,1	
		0,75	12	7,24	+	+	2,5	
		1,0	12	7,24	+	+	3,0	

	0,20	0,25	12	7,24	+	+	1,4	325,8
		0,5	12	7,24	+	+	1,5	
		0,75	12	7,24	+	+	1,7	
		1,0	12	7,24	+	+	1,9	
		1,25	12	7,24	+	+	2,3	
	0,25	0,25	12	7,24	+	+	1,3	456,12
		0,5	12	7,24	+	+	1,4	
		0,75	12	7,24	+	+	1,6	
		1,0	12	7,24	+	+	1,8	
		1,25	12	7,24	+	+	1,9	
		1,5	12	7,24	+	+	2,4	
	0,30	0,25	12	7,24	+	+	1,0	608,16
		0,5	12	7,24	+	+	1,1	
		0,75	12	7,24	+	+	1,2	
		1,0	12	7,24	+	+	1,2	
		1,25	12	7,24	+	+	1,3	
		1,5	12	7,24	+	+	1,3	
		1,75	12	7,24	+	+	1,3	
	0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	781,92
		0,5	12	7,24	-	-	-	
		0,75	12	7,24	+	-	0,8	
		1,0	12	7,24	+	+	0,8	

		1,25	12	7,24	+	+	0,9	
		1,5	12	7,24	+	+	1,0	
		1,75	12	7,24	+	+	1,1	
		2,0	12	7,24	+	+	1,1	

U daljem pregledu, daju se rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa tri različita tipa upotrijebljenih vlakana i procentualnim učešćem u betonskoj matrici od: 1%, 2% i 3%.

Tabela 4.32. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=50/0,75$, na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=50/0,75$; $V_f=1\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle $h(m)$	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24kg$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	65,16
			0,5	12	7,24	+	-	1,5	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	146,61
			0,5	12	7,24	+	+	1,3	
			0,75	12	7,24	+	+	1,4	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	253,4

			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	
			0,5	12	7,24	+	+	1,0	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,3	
			1,5	8	7,24	+	+	1,3	
									398,2
	0,25		0,25	12	7,24	-	-	-	619,02
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,4	
	0,30		0,25	12	7,24	-	-	-	734,86
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	

		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	955,68
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	24	7,24	+		1,2	
2.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	65,16
			0,5	12	7,24	+	-	1,5	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	141,18
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	260,64
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	
			1,0	12	7,24		+	1,2	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	380,1
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,3	
			1,25	12	7,24	+	+	1,4	

			1,5	5	7,24	+	+	1,4	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	488,7
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	709,52
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	12	7,24	+	+	1,3	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	955,68
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,0	
			2,0	24	7,24	+	+	1,1	

3.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	65,16
			0,5	12	7,24	+		1,4	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	152,04
			0,5	12	7,24	+	+	1,3	
			0,75	12	7,24	+	+	1,4	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	260,64
			0,5	12	7,24	+	+	1,5	
			0,75	12	7,24	+	+	1,6	
			1,0	12	7,24	+	+	1,6	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	398,2
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	
			1,0	12	7,24	+	+	1,3	
			1,25	12	7,24	+	+	1,5	
			1,5						
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	499,56
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	
			1,0	12	7,24	+	+	1,4	
			1,25	12	7,24	+	+	1,4	
			1,5	12	7,24	+	+	1,5	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	734,86

			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	12	7,24	+	+	1,3	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	955,68
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	0,9	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	24	7,24	+	+	1,1	

*Tabela 4.33. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=50/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%*

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature L/D=50/0,75; V _f =2%	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h(m)	Broj padova kugle	Masa kugle m=7,24kg	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	108,6
			0,5	12	7,24	+	-	1,1	
			0,75	8	7,24				
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	202,72
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	10	7,24				
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	325,8
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	

		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	582,82
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	10	7,24	+	+		
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	897,76
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	20	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1071,52

			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	32	7,24	+	+	1,2	
2.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	119,46
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	10	7,24	+	+	1,3	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	202,17
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	10	7,24	+	+	1,2	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	325,8
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	455,57
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	

			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	607,61
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	12	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	897,21
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	+	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	20	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1085,45
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	

			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,0	
			2,0	33	7,24	+	+	1,1	
3.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	119,46
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	10	7,24	+	+	1,3	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	202,17
			0,5	12	7,24	+	+	1,1	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	
			1,0	10	7,24	+	+	1,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	325,8
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	455,57
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24				
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	

		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	605,61
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,4	
			1,75	11	7,24	+	+	1,4	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	897,21
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	12	7,24	+	+	1,3	
			2,0	20	7,24	+	+	1,4	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1085,45
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	

			2,0	34	7,24	+	+	1,1	
--	--	--	-----	----	------	---	---	-----	--

Tabela 4.34. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=50/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=50/0,75$; $V_f=3\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h(m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	166,52
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	5	7,24	+	+	1,2	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	307,7
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	10	7,24	+	+	1,2	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	

			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
	0,20		0,25	12	7,24	-	-	-	608,16
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
	0,25		0,25	12	7,24	-	-	-	752,96
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	10	7,24	+		1,3	
	0,30		0,25	12	7,24	-	-	-	897,76
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	

			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	20	7,24	+	+	1,1	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1187,36
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	+	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	40	7,24	+	+	1,2	
2.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	166,52
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	7	7,24	+	+	1,1	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	307,7
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	10	7,24	+	+	1,2	

		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	10	7,24	+	+	1,1	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	608,16
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	752,96
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	
			1,75	12	7,24	+	+	1,3	
			2,0	10	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	897,76

			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	+	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	20	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1195
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,0	
			2,0	42	7,24	+	+	1,1	
3.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	166,52
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
			1,0	8	7,24	+	+	1,3	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	307,7
			0,5	12	7,24	+	+	1,1	
			0,75	12	7,24	+	+	1,2	

			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	10	7,24	+	+	1,2	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	10	7,24	+	+	1,2	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	608,16
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24				
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	752,96
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	

			2,0	12	7,24	+	+	1,1	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	897,76
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	22	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1203,7
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	-	-	-	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	44	7,24	+	+	1,1	

U narednim tabelama daju se rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča faktora oblika $L/D=31/0,75$ i $L/D=25/0,75$ kao prosječna vrijednost tri ispitivana uzorka:

Tabela 4.35. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=31/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=31/0,75$; $V_f=1\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h(m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	+	+	3,5	21,72
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	65,16
			0,5	12	7,24	+	+	2,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	130,32
			0,5	12	7,24	+	+		
			0,75	12	7,24	+	+		
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	217,2
			0,5	12	7,24	+	+	1,2	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
			1,0	12	7,24	+	+	1,3	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	325,8
			0,5	12	7,24	-	-	-	

			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	12	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	825,36
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	15	7,24	+		1,2	

*Tabela 4.36. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika:
L/D=31/0,75 na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%*

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature L/D=31/0,75; V _f =2%	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h(m)	Broj padova kugle	Masa kugle m=7,24kg	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	70,59
			0,5	12	7,24	+	-	1,4	
			0,75	1	7,24	+	+	1,4	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	159,28
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
			1,0	4	7,24	+	+	1,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	262,45
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	5	7,24	+	+	1,2	

		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	434,4
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,3	
			1,5	10	7,24	+	+	1,4	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	468,79
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
			1,75	1	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	752,96
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	10	7,24	+	+	1,3	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	941,2

			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	23	7,24	+	+	1,1	

Tabela 4.37. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=31/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=31/0,75$; $V_f=3\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h (m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	130,32
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	235,3
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	2	7,24	+	+	1,2	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	347,52
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	2	7,24	+	+	1,1	

		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	459,92
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	3	7,24	+	+	1,2	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	637,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	2	7,24	+		1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	752,96
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	

			2,0	10	7,24	+	+	1,1	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	1042,5
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	+	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	30	7,24	+	+	1,2	

Tabela 4.38. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=25/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 1%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=25/0,75$; $V_f=1\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h (m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	11	7,24	+	+	3,7	19,91
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	39,82
			0,5	5	7,24	+	+	2,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	97,74
			0,5	12	7,24	+	+		
			0,75	6	7,24	+	+		
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	167,51
			0,5	12	7,24	+	+	1,2	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
			1,0	5	7,24	+	+	1,3	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	263,44
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,1	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	

			1,25	5	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	370,23
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	4	7,24	+	+	1,2	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	825,36
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	15	7,24	+		1,2	

Tabela 4.39. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=25/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 2%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=25/0,75$; $V_f=2\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h (m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	65,16
			0,5	12	7,24	+	-	1,4	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	130,32
			0,5	12	7,24	+	-	1,2	
			0,75	12	7,24	+	+	1,3	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	226,25
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,2	
			1,25	1	7,24	+	+	1,2	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	380,1
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	

			1,25	12	7,24	+	+	1,3	
			1,5	5	7,24	+	+	1,4	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	456,12
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,2	
			1,5	12	7,24	+	+	1,3	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	550,24
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,0	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
			2,0	5	7,24	+	+	1,3	
		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	839,84
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	

			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	16	7,24	+	+	1,1	

Tabela 4.40. Rezultati ispitivanja mikroarmiranih ploča sa mikroarmaturom faktora oblika: $L/D=25/0,75$ na dinamičko-udarno opterećenje; prisustvo vlakana 3%

Broj uzorka	Tip i količina upotrijebljene mikroarmature $L/D=25/0,75$; $V_f=3\%$	Debljina mikroarmirane ploče (m)	Visina pada kugle h (m)	Broj padova kugle	Masa kugle $m=7,24\text{kg}$	Pojava prve prsline	Pojava habanja ploče	Širina prsline (mm)	Energija koja odgovara graničnoj nosivosti (J)
1.		0,05	0,25	12	7,24	-	-	-	97,74
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	6	7,24	+	+	1,0	
		0,1	0,25	12	7,24	-	-	-	217,2
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	+	+	1,0	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	
		0,15	0,25	12	7,24	-	-	-	434,4
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	+	+	1,1	

			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
		0,20	0,25	12	7,24	-	-	-	564,72
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,1	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
		0,25	0,25	12	7,24	-	-	-	716,76
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,2	
		0,30	0,25	12	7,24	-	-	-	680,56
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	1,0	
			1,5	12	7,24	+	+	1,1	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	5	7,24	+	+	1,1	

		0,40	0,25	12	7,24	-	-	-	919,48
			0,5	12	7,24	-	-	-	
			0,75	12	7,24	-	-	-	
			1,0	12	7,24	-	-	-	
			1,25	12	7,24	+	+	+	
			1,5	12	7,24	+	+	1,0	
			1,75	12	7,24	+	+	1,1	
			2,0	23	7,24	+	+	1,2	

5. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su ispitivanja mikroarmiranih betona kako u svježem, tako i u očvrsлом stanju. Isti su modelirani uz upotrebu različitih oblika i procentualnog učešća čelične mikroarmature. Ispitivanja su sprovedena u cilju određivanja fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranog kompozita čije su vrijednosti upotrijebljene za proračun tunelske konstrukcije. Ovim je zatvoren krug modeliranja, ispitivanja i proračuna konstrukcije od mikroarmiranog betona, što je i bio konačan cilj doktorske disertacije. U prvom redu su sprovedena ispitivanja komponentalnih materijala koji ulaze u sastav betonske mješavine. Zatim je usvojen sastav betonske matrice odnosno projektovane količine agregata, cementa, vode, aditiva i mikroarmature. Poslije usvojenog sastava betonskih mješavina, izvršeno je eksperimentalno ispitivanje njihovih svojstava. Od značajnih karakteristika betona u svježem stanju ispitane su sledeće:

- Zapreminska masa svježe betonske mješavine
- Sadržaj uvučenog vazduha u masi betona
- Konzistencija betonske mješavine

Kad govorimo o fizičko-mehaničkim karakteristikama mikroarmiranog i klasičnog betona starosti 28 dana ispitane su sledeće karakteristike:

- Zapreminska masa očvrslog betona (gustina)
- Čvrstoća na pritisak
- Čvrstoća na zatezanje cijepanjem
- Čvrstoća na savijanje i određivanje žilavosti (duktilnosti) metodom četiri karakteristične tačke

Kada je riječ o deformacionim svojstvima mikroarmiranog betona izvršeno je ispitivanje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti takođe je izvršeno ispitivanje udarne – dinamičke otpornosti ploča metodom udarne mase tega.

Nakon formiranja preglednih, karakterističnih vrijednosti rezultata sprovedenih istraživanja, isti su upotrijebljeni za samostalno programiranje (upotreba laboratorijski dobijenog radnog σ - ϵ dijagrama mikroarmiranog betona) za proračun tunelske konstrukcije.

Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih istraživanja u narednoj tabeli slijedi pregled prednosti i nedostataka mikroarmiranih betona u poređenju sa klasičnim betonom, tabela 5.1.

Tabela 5.1. Poređenje mikroarmiranog i klasičnog betona na osnovu sprovedenih istraživanja

Mjerene karakteristike projektovanih mješavina	Klasičan beton		Mikroarmirani beton	
	Prednosti	Nedostaci	Prednosti	Nedostaci
Stepen teškoće ugradljivosti mješavine	+			+
Konzistencija mješavine	+			+
Poroznost	+			+
Pojava prve prsline		+	+	
Širenje prslina		+	+	
Čvrstoća na pritisak		+	+	
Čvrstoća na savijanje		+	+	
Čvrstoća na zatezanje (cijepanjem)		+	+	
Duktilnost mješavine		+	+	
Otpornost na dinamičko-udarno opterećenje		+	+	

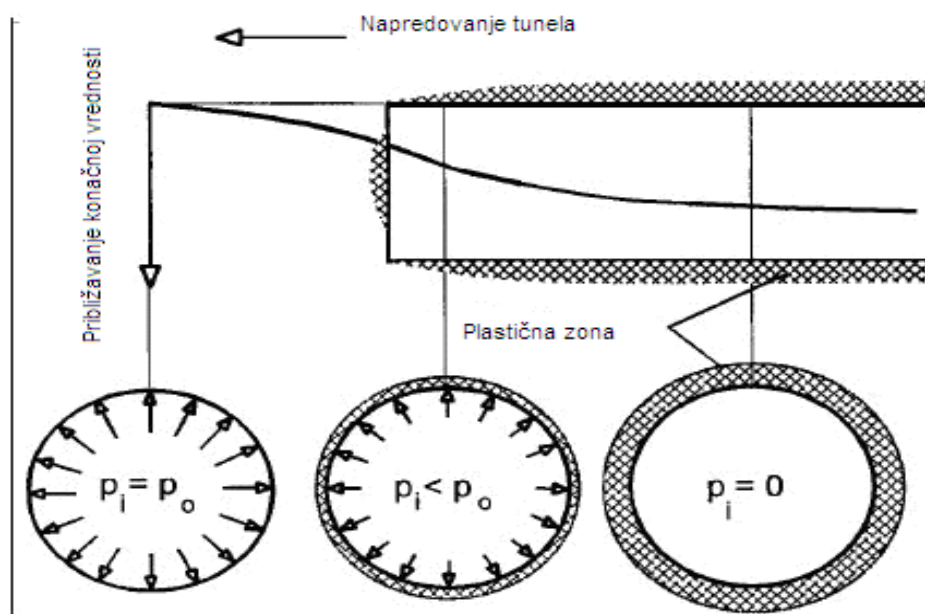
Komponentalni sastav betonskih mješavina analiziranih u ovom istraživanju kao i učešće različitih oblika i količine čelične mikroarmature u matrici betona je učestvovao u kreiranju konačnih vrijednosti fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranih betona. Iz prethodnih tabela koje su formirane na osnovu sprovedenih eksperimenata jasno je vidljivo da su prednosti mikroarmiranog betona značajne u poređenju sa klasičnim betonom. Takođe, veoma važna

zapažanje u formiranju konačnih rezultata fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranih betona leži u činjenici da bi tehnologiji spravljanja ovog betona trebalo posvetiti posebnu pažnju.

6. PRIMJENA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIH LABORATORIJSKIH REZULTATA U PRORAČUNU TUNELSKJE KONSTRUKCIJE

6.1. STATIČKI PRORAČUN - Osnovne postavke i ideje proračuna primarne obloge tunelske konstrukcije

Raspored napona oko radnog čela tunela je trodimenzionalan. Na dijelu stijenske mase, koji se nalazi na razdaljini od 2,5 prečnika tunela od čela tunela, stanje napona je nepromijenjeno i jednako je primarnom (prirodnom) stanju napona u terenu. Na čelu tunela, stijenska masa stvara pritisak na mjestu buduće konture iskopa koji iznosi 20-30 % prirodnog napona u dotičnom terenu. Odgovarajući pritisak u zoni čela dozvoljava iskopanim dionicama da stoje dovoljno dugo dok se ne postavi podgrada. Ovaj uticaj se postepeno smanjuje do nule na razdaljini od 4,5 prečnika tunela od radnog čela.



Slika 6.1. Potporni pritisak p_i za različite slučajeve u korak sa napredovanjem tunelskog profila

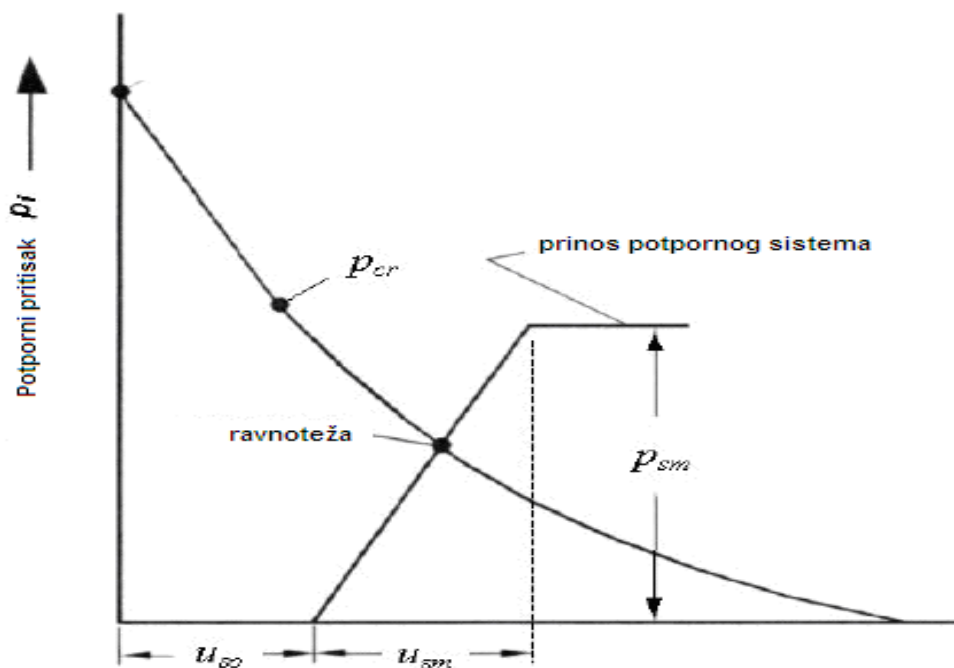
Zbog trodimenzionalnog rasporeda napona na radnom čelu tunela, primjena dvodimenzionalnih numeričkih analiza interakcije sistema podgrade tunela i okolne stijenske mase mora biti veoma

pažljiva. Većina dvodimenzionalnih numeričkih formulacija za analize iskopa pretpostavlja ravanske uslove deformacija. Međutim, ovi uslovi su primjenjivi samo na dijelove tunela daleko od radnog čela. U numeričkoj simulaciji građenja tunela, ako je tunel prvo iskopan a potom postavljen pasivni sistem podgrade, podgradni sistem neće nositi opterećenje. To je zato što bi se sve deformacije desile prije nego što je postavljena podgrada. Sa druge strane, ukoliko je podgrada postavljena u modelu prije nego što je tunel iskopan, podgradni sistem će biti izložen cjelokupnom prirodnom opterećenju, a to je scenario koji se može desiti samo ukoliko se podgrada postavi prije nego što nastanu bilo koje deformacije u granicama iskopavanja. To bi vodilo ka konzervativnom rješenju, pošto se u stvarnosti događa izvijestan stepen relaksacije napona, jer je već izvršena određena deformacija tunelske konture u vrijeme kada je postavljana podgrada. Prema tome, da bi upotrijebili dvodimenzionalna numerička sredstva za realistično projektovanje podgrade tunela, moramo procijeniti pomjeranja granice iskopa koja se dešavaju prije postavljanja podgrade. Korišćenjem dvodimenzionalnog modela primjenom metode konačnih elemenata (primjenjen je postupak rješavanja opisanog problema koji se zasniva na "metodi karakterističnih linija"), ali sa nešto opštijom formulacijom i određenim modifikacijama. Sukcesivnim rješavanjem naponsko-deformacionog problema, za različite pretpostavke o vrijednosti otpora podgrade, dobija se niz pokazatelja karakterističnih stanja podzemne prostorije. Preciznije rečeno, za svaku pretpostavljenu vrijednost o kontaktnom naponu na konturi podzemne prostorije u trenutku uspostavljanja ravnog stanja deformacije (varirajući od početne vrijednosti do nule), rješavanjem naponsko deformacionog problema, dobijaju se vrijednosti pomjeranja na konturi u funkciji otpora podgrade. Proračun je zasnovan na ekvivalentnom omekšavajućem ponašanju materijala tokom iskopavanja. Uticaj trodimenzionalne raspodjele napona na čelu tunela može da se zamijeni postupnim omekšavanjem materijala koji se modelira kao zona za iskopavanje u dvodimenzionalnom modelu.

Da bi se dalo objašnjenje analiziran je posmatrani profil koji je reprezent za dvodimenzionalni model prije i poslije iskopavanja. Kada je posmatrani profil na takvoj razdaljini od radnog čela tunela da je stanje napona neporemećeno (prirodno), materijal koji će biti iskopan u tom profilu je nedeformisan i može se smatrati da ima krutost prirodnog terena. Kako radno čelo napreduje

prema posmatranom profilu tako dolazi do deformisanja koje se može posmatrati i kao posljedica postupnog omekšavanja materijala koji će biti iskopan u tom profilu.

Hoeck (1999.) je definisao empirijske preporuke koristeći i analize rezultata ispitivanja. Prema ovim preporukama radijalno pomjeranje: počinje na oko 2.5 prečnika tunela ispred radnog čela, dostiže oko 1/3 svoje konačne vrijednosti na mjestu radnog čela tunela i dostiže svoju konačnu vrijednost na oko 4.5 prečnika iza radnog čela.



Unutrašnja radijalna pomjeranja U_t

Slika 6.2 Uticaj potpornog sistema pomjeranja tunelskog zida kao posljedica uvođenja ravnoteže

Prividan otpor podgrade jednak je prirodnom naponu na određenoj udaljenosti (2,5 prečnika tunela) unutar stijenske mase ispred radnog čela, jednak oko $\frac{1}{4}$ prirodnog napona na mjestu radnog čela i postepeno se svodi na nulu. Zbog toga je potrebno izvršiti naponsko-deformacijsku analizu stijenske mase u zoni iskopa. Primjenom osno-simetrične analize deformacija na tunelu

odgovarajućeg kružnog presjeka mogu se, sa prihvatljivim nivoom aproksimacije, dobiti pomjeranja u funkciji napredovanja radnog čela i odrediti trenutak postavljanja podgrade, odnosno procijeniti deformacije konture tunelskog iskopa koje se dešavaju prije njenog postavljanja. Trenutak postavljanja podgrade definiše se na osnovu uslova stabilnosti nepodgrađene stijenske mase i tehnološkog ograničenja deformacija konture tunelskog iskopa prije postavljanja podgrade a u funkciji primijenjenog načina gradnje na posmatranoj dionici.

Ravnoteža se uspostavlja ako karakteristična kriva podgrade siječe karakterističnu krivu stijenske mase. Ako se podgrada ugradi prekasno, možda je već nastupila deformacija stijenske mase u tolikoj mjeri da se ne može spriječiti slabljenje ispucalog materijala. Sa druge strane, ako nosivost podgrade nije odgovarajuća, podgrada može da dostigne svoju granicu izdržljivosti prije presijecanja karakteristične krive stijenske mase. U bilo kojem od ova dva slučaja podgradni sistem neće imati efekta, jer neće biti uspostavljeno ravnotežno stanje. Treba imati u vidu da plastični lom stijenske mase oko tunela ne mora da znači rušenje tunela. Na osnovu naprijed navedenog vidi se da, vrstu podgrade i trenutak njenog ugrađivanja treba pažljivo izabrati imajući u vidu geo-mehaničke karakteristike stijenske mase, stabilnost nepodgrađene konture iskopa i tehnološke mogućnosti i ograničenja.

Opis primijenjenog sistema rješenja tunelske konstrukcije

Numeričke metode, posebno MKE predstavljaju vrijedan doprinos za mnogo tačniju ocjenu napona i pomjeranja u tunelima i okolnoj stijenskoj masi. Ali, proračun je koristan samo ako je primijenjen numerički metod koji korektno opisuje prirodno ponašanje stijenske mase.

Model koji je potreban za objašnjenje fenomena koji se susreću na gradilištu treba da bude što više razrađen i što je moguće bliži stvarnosti. On ne može da prikaže prirodu onakvu kakva je, ali ipak, opisuje stvaran proces iskopa tunela i u najvećem broju slučajeva je na strani sigurnosti. Svaki projekat tunela počinje izborom i crtežima najkritičnijih poprečnih presjeka za gradnju tunela. To može biti u funkciji od iskopne površine, udaljenosti od drugih tunela, visini nadsloja, uticaja objekata na površini i geoloških uslova. Iskop tunela i primjena sistema osiguranja predstavlja 3D modele, a naročito u sklopu sa kompleksnim međudejstvom između brzine

iskopa, geoloških pomjeranja u tlu i vremena od koga zavise promjene osobina betona ili mikroarmiranog betona, predstavlja još uvijek suviše komplikovane postupke za standardne proračune tunela. Stoga, 2D naponsko stanje uz ravno stanje deformacija igra glavnu ulogu, osim u slučaju ukrštanja tunela kada 3D analize dobijaju na odlučujućem značaju.

Numeričko modeliranje, uopšte, može da se podijeli na modeliranje materijala i opterećenja. Modeliranje ovih problema može da se definiše odvojeno, ali djeluje ujedno u modelu.

Modeliranje materijala

Izgradnja tunela predstavlja sistem unutar tla u kome se izvodi iskop i sistem podgrade (osiguranja-sidra i čelične remenate) kao i obloge. Priprema mreže, kao prvog dijela numeričkog modela, treba da uklopi sve važne faktore koji definišu geometriju problema. Ti faktori nisu samo vezani za geometriju tunela s obzirom na faze iskopa, već i za geološke uslove kao što su različiti materijali i nivoi podzemne vode, definisanje obloga kao što su privremene i stalne obloge ili položaji sidara, i veličina mreže. Spoljna mreža, koja modelira okolno tlo, mora biti dovoljno velika tako da uticaj tunelskog iskopa na konturi bude zanemarljiv. Ako se na konturi mreže *KE* koristi elastična kontura ili konturni elementi (tzv. ali nepravilno: beskonačni elementi), mreža može biti manja, jer su elastične deformacije sa konture od mreže *KE* do beskonačnosti uključene u proračun. Svaka komponenta modela *KE* je ovdje razmotrena sa posebnim osvrtom na numerički model *PHASE 2* razvijen od strane *Rock Engineering group of the Department of Civil Engineering, University of Toronto*.

Modeliranje tla

Iz velike biblioteke *2D KE* sa ravnim stanjem deformacija može da se bira specifičan *KE* koji opisuje kontinuum. Elastično ponašanje tla je definisano paramterima elastičnosti kao što je modul elastičnosti i Poasonov broj za pretpostavku o izotropnom kontinuumu ili matricom elastičnosti za anizotropno ponašanje materijala. Plastične karakteristike tla su definisane kao funkcija tečenja i ponašanje poslije početka tečenja (narušavanja uslova plastičnosti). Korištena funkcija tečenja je vezana za tip i postojeće parametre tla. Najviše korištene funkcije ponašnja su *Kulon-Mor-ova* i *Druker-Prager-ova*. Ponašanje poslije početka tečenja najbolje je definisano zakonom napon-deformacija. Specijalna pažnja pri izboru parametara tla trebalo bi da se posveti

ako je iskop tunela u vlažnom i vodom zasićenom tlu. Za tlo sklono bubrenju, ili hemijski indiciranom kao anhidriti ili fizički indiciranom kao što su glinci, funkcija bubrenja predstavljena opitom treba da bude uključena u model. Samo numerički metod može da pruži odgovor ako je potencijal bubrenja moguć da uzrokuje kolaps tunela.

Modeliranje stijenske mase

Stijenska masa je sistem koji je sačinjen od intaktnog stijenskog materijala i diskontinuiteta. Diskontinuiteti, kao izdvojeni lomovi u intaktnoj stijenskoj masi zajedno sa njihovim intenzitetom i rastojanjem imaju veliki uticaj na osobine stijenske mase. Ako je razmak diskontinuiteta u proporcijama sa dominantnom dimenzijom koja opisuje spoljnu geometriju posebnog problema, diskontinuiteti bi trebalo, kao specijalni elementi sa svojim osobinama, da budu unijeti u model.

Opterećenja

Tokom različitih faza gradnje i eksploatacije, obloga tunela primaće različita opterećenja, koja bi trebalo da se uključe u numerički model.

Primarno naponsko stanje

Izraz primarno stanje napona označava uslove naprezanja u tlu za neporemećeno stanje prije iskopa tunela. Ako nisu ostvarena posebna mjerenja početnog naponskog stanja i ne postoje posebni geološki uslovi, vertikalni napon može da se pretpostavi kao težina nadsloja. Horizontalni napon se tada pretpostavlja da je dio vertikalnog napona za elastično rješenje.

Opterećenja slobodne konture kao objekti i saobraćaj

Opterećenja površine kao težina objekata i saobraćaja mogu da se modeliraju kao realne sile sa svojim položajem i veličinom na površini. Saobraćajno opterećenje se uzima u obzir kao

statičko. Površinska opterećenja igraju veliku ulogu u polju totalnih napona ako je tunel u blizini površine.

ISKOP TUNELA

Opis modela i ulazni podaci

Formiran je dvodimenzionalni model konačnih elemenata za određivanje polja pomjeranja, naponskih stanja i plastičnih zona nepodgrađenog i podgrađenog iskopa, kao i uticaja u tunelskoj oblozi. Model obuhvata teren u okolini tunela koji je dovoljan da bi se uticaj graničnih uslova na rezultate proračuna u zoni tunela sveli na minimum. U primjeru koji slijedi koristiće se granični uslovi - nepokretni oslonci na svim stranama. Za modeliranje su korišćeni tročvorni konačni elementi.

Početno stanje napona

Primarno stanje napona označava uslove naprezanja u tlu za neporemećeno stanje prije iskopa tunela. Ako nisu ostvarena posebna mjerenja početnog naponskog stanja i ne postoje posebni geološki uslovi, vertikalni napon može da se pretpostavi kao težina nadsloja. Horizontalni napon se tada pretpostavlja da je dio vertikalnog napona za elastično rješenje. Odnos horizontalnog i vertikalnog napona, pri određivanju primarnog naponskog stanja definisan je putem Poasonovog koeficijenta ν u obliku $\sigma_h / \sigma_v = \nu / 1 - \nu$.

Sekundarno stanje napona

Tokom iskopa tunela mijenja se primarno stanje napona. Ova promjena nije fiksna vrijednost nego funkcija parametara tla, krutosti i jačine obloge i vremena ugradnje iste. Iskop se simulira postupkom eliminacije korak-po-korak KE koji definišu tlo (grupa elemenata od elementa m do elementa n). Naponi u eliminisanim elementima se potom integrišu i nanose kao spoljno opterećenje.

Naponi u okolnim materijalima, prouzrokovani naponskom redistribucijom tokom iskopa, mogu da prekorače nivo maksimalno dopuštenih napona. U tom slučaju nastaje plastična deformacija.

Razlika između dopuštenog nivoa napona i stvarnih napona prouzrokuje dodatnu redistribuciju u okolnom materijalu ili ugrađenoj oblozi.

Ulazni podaci

Prikaz modela gradnje tunela

Birajući model tunelske konstrukcije, poštuju se kvalitet stijenske mase, stepen promjenljivosti i kvalitet duž tunela. Tehnologija gradnje, visina nadsloja imaju takođe uticaj na ovaj izbor. Poprečni presjek je složena figura u obliku potkovice koja se sastoji od kalote sa radijusom iskopne figure 5,85 m, štroca visine 2,00 m i podnožnog svoda koji zatvara cijelu konturu. Ovaj tip tunela se proteže kroz geotehničku sredinu A tunela sa karakteristikama koje su date u okviru tabele koja slijedi:

Tabela 6.1. Karakteristike geotehničke sredine

<i>Fizičko - mehanička svojstva</i>	<i>Geotehničke sredine</i>			
	<i>A: Dijabaz rožna formacija- rožnaci</i>	<i>B: Dijabaz rožna formacija- glinci</i>	<i>C: Deluvijalno- eluvijal. pokrivač</i>	<i>D: Krečnjaci- zona površinske izmjene</i>
<i>vp (km/s)</i>	1,80-2,37	3,78	0,60	2,40
<i>vs (km/s)</i>	1 150	1,75		1 300
<i>γ (kN/m³)</i>	25	24		24
<i>μ</i>	0,35	0,34		0,35
<i>Edyn (Mpa)</i>	5 200	22 600		5 800
<i>G (Mpa)</i>	3 300	9 000		3 700
<i>K (Mpa)</i>	9 500	21 000		10 500
<i>Est (Mpa)</i>	1 600 - 2 200	4 800 – 6 300		2 000 - 2 900
<i>D (Mpa)</i>	400 - 700	1 300 – 2 2 0		600 - 1 100

-Coulumb-Mohr-ov uslov loma

Model B

Za Coulomb-Mohr-a:

Geotehnički podaci

Dijabaz rožna formacija-pretežno rožnaci

Klasa tunela	Model B
γ (kN/m ³)	25
φ (°)	25
E (MPa)	2000
ν (-)	0.28
c (MPa)	0.20
D (MPa)	120

6.2. NUMERIČKI MODELI OSIGURANJA ISKOPA

- **PRIMJENOM ARMIRANOG BETONA (AB)**
- **PRIMJENOM MIKROARMIRANOG BETONA (MAB)**

Uvodne napomene za numerički model

Za numeričko ispitivanje poređenja ponašanja osiguranja iskopa usvojen je model saobraćajnog tunela. U doktorskoj disertaciji je prikazano poređenje ponašanje osiguranja iskopne konture pri iskopu i to:

- primjenom klasičnog betona klase 30 armiranog dvoslojnom čeličnom mrežom
- primjenom mikroarmiranog betona klase 38,7 armiranog čeličnim vlaknima sa zakrivljenim krajevima i faktorom oblika: $L/D=50/0,75$ i količinom prisutnih vlakana 2% u odnosu na ukupnu mješavinu betona.

Cilj ove numeričke analize je bio da se pokaže ponašanje stijenske mase oko iskopa za slučaj primjene mikroarmiranog betona karakteristika $L/D=50/0,75$ sa naglaskom na znatno povećanu žilavost ovog betona i pri svim ostalim parametrima istim za oba slučaja: geotehničke karakteristike stijenske mase, opterećenja pri faznom iskopu i čvrstoće na pritisak osnovnog materijala AB. Pasivna sidra nisu instalirana jer nisu od inetresa za ovu studiju.

Obloga od armiranog betona se tretira kao gredni element jer je armiranjem osposobljena da prima normalne sile, transverzalne sile i momente savijanja, pa se dopušteni naponi usvajaju kako slijedi a prema Pravilniku (koji je još uvijek važeći):

- klasa (marka) betona MB30 tj. 30 MPa
- dopušteni ivični napon pri savijanju 12 Mpa (koef.sigurnosti 2.50)
- dopušteni ivični napon zatezanja bez pojave prslina 1.5 Mpa (koef.sigurnosti 20)

Kao polazna osnova poređenja dvije obloge upotrijebljen je princip rada programskog paketa *PHASE2* za proračun tunelskih konstrukcija. Isti zahtijeva vršne i rezidualne vrijednosti kao ulazne podatke kako za stijenu tako i za oblogu od AB što je uobičajeno pri primeni Teorije loma.

Stoga, uzimajući u obzir minimalni koeficijent sigurnosti od 1.50 za napone pritiska i 10 za napone zatezanja za granične napone za ispitivanje i poređenje nosivosti obloge od AB I MAB usvajaju se sledeći podaci za oblogu od AB:

- vršni napon pri pritisku 30 Mpa
- rezidualni napon pri pritisku 5 Mpa

- vršni napon pri zatezanju 5 Mpa
- rezidualni napon pri zatezanju 1 Mpa

Do sada ni jedan softver nije mogao da prima definisane radne σ - ϵ radne dijagrame betona u digitalizovanom obliku kao ulazni podatak za dalju obradu ponašanja konstrukcija, *a to je ključno u slučaju mikroarmiranog betona (MAB) zbog drastično izražene žilavosti poslije dostizanja vršne vrijednosti čvrstoće.*

Jedan od značajnih doprinosa u okviru predmetne doktorske disertacije jeste upotreba laboratorijski dobijenog radnog σ - ϵ digitalizovanog oblika dijagrama mikroarmiranog betona za proračun tunelske obloge. Predstavljeni način modeliranja MAB jeste jedini način da se upoređuje model AB i MAB. Poređenje predložene dvije obloge je omogućeno zahvaljujući povećanoj čvrstoći na zatezanje mikroarmiranog betona, u ovom slučaju čeličnim vlaknima.

Zahvaljujući sprovedenim laboratorijskim istraživanjima čvrstoća na pritisak vlaknima armiranog betona je uvećana za cca 5,0% u odnosu na tzv. etalonske uzorke (bez vlakana), dok je čvrstoća na zatezanje do 50%. Ova laboratorijska ispitivanja vrijede za vremenski period starosti betona od 28 dana, poslije čega počinje da se zapaža manje opadanje obje čvrstoće.

Napominje se da u ovom radu nisu obrađeni rezultati dugotrajnog praćenja promjene čvrstoća na pritisak i zatezanje (duže od 28 dana) što može da bude od velikog značaja za slučaj npr obustave radova. U ovom slučaju se prvensveno misli na podzemne radove u dužem vremenskom periodu (nedostatak finansijskih sredstava ili napuštanje objekta od strane izvođača iz nepredviđenih razloga).

Za ovu studiju se stoga usvajaju ulazni podaci za MAB kako slijedi:

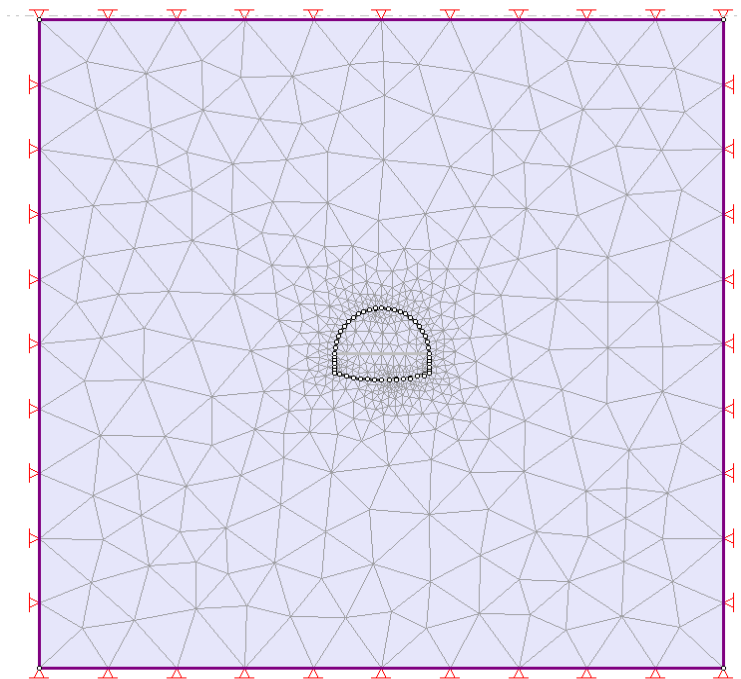
- vršni napon pri pritisku 38,7 Mpa
- rezidualni napon pri pritisku 6.5 Mpa
- vršni napon pri zatezanju 7.5 Mpa
- rezidualni napon pri zatezanju 1.5 Mpa

Model sa AB i model sa MAB imaju identičnu geometriju, okolnu modelsku mrežu, geotehničke karakteristike sredine odnosno stijenske mase usvojene prema podlogama za građenje tunela.

Za oba modela se formiraju grafički prikazi rezultata tako da se mogu upoređivati:

1. OSNOVNI MODEL

Osnovni numerički model iskopa sa fazama iskopa, bez osiguranja, je kao na slici:



Geotehničke karakteristike okolne stijenske mase su:

Material Properties

Material: Material 1

Initial element loading field stress & body force

Unit weight 0.025 MN/m³

Elastic type isotropic

Young's modulus 2000 MPa

Poisson's ratio 0.28

Failure criterion Mohr-Coulomb

Tensile strength 0 MPa

Peak friction angle 25 degrees

Peak cohesion 0.2 MPa

Material type Plastic

Dilation Angle 0 degrees

Residual Friction Angle 25 degrees

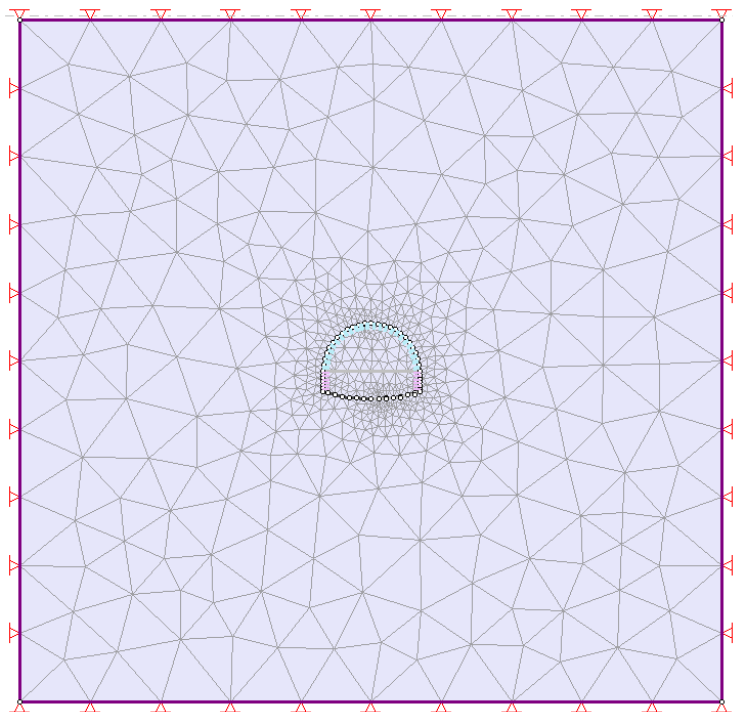
Residual Cohesion 0.2 MPa

Piezo to use None

Ru value

2. MODEL SA OSIGURANJEM ARMIRANIM BETONOM (AB)

Numerički model sa unijetim osiguranjem betonom debljine 25 cm klase 30 armiranim sa dva sloja armaturne mreže Q131 je kao na slici:



Karakteristike osiguranja betonom u modelu su:

Liner Properties

Liner: Liner 1

Liner Type Standard Beam

Formulation Timoshenko

Thickness 0.25 m

Elastic Properties

Young's modulus 30000 MPa

Poisson's ratio 0.2

Liner: Liner 2

Liner Type Standard Beam

Formulation Timoshenko

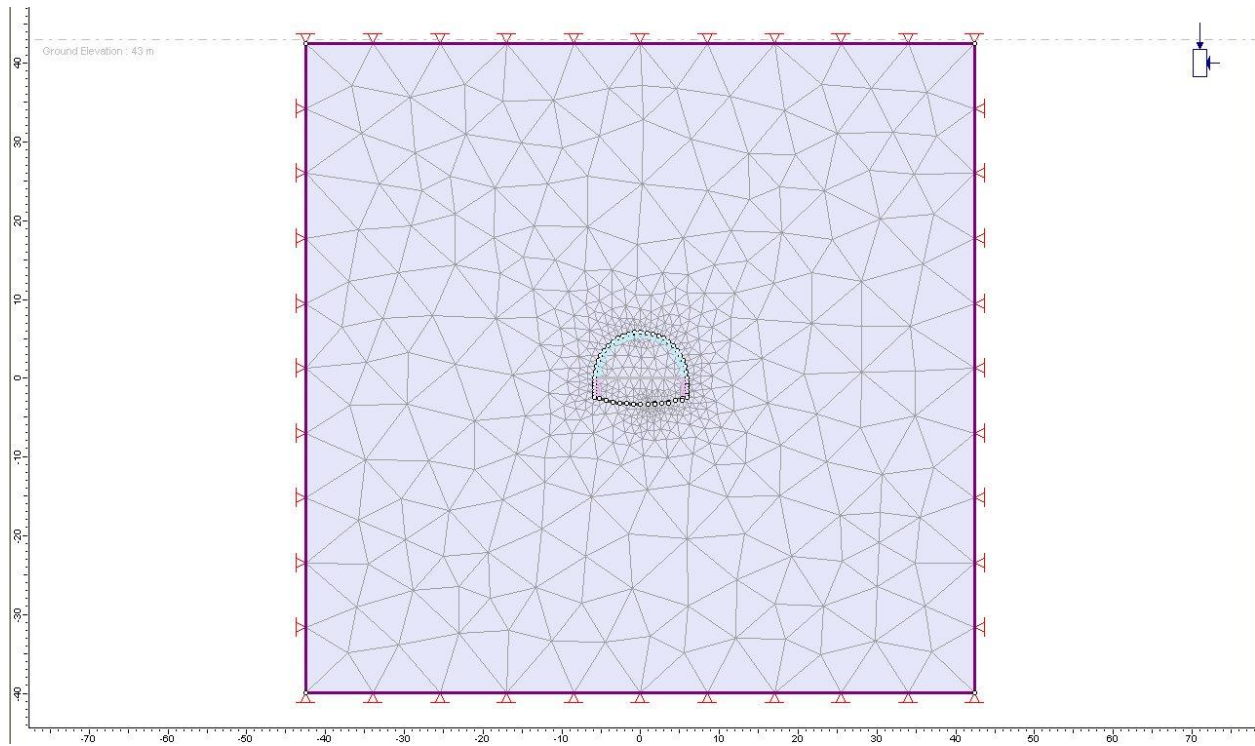
Thickness 0.25 m

Elastic Properties

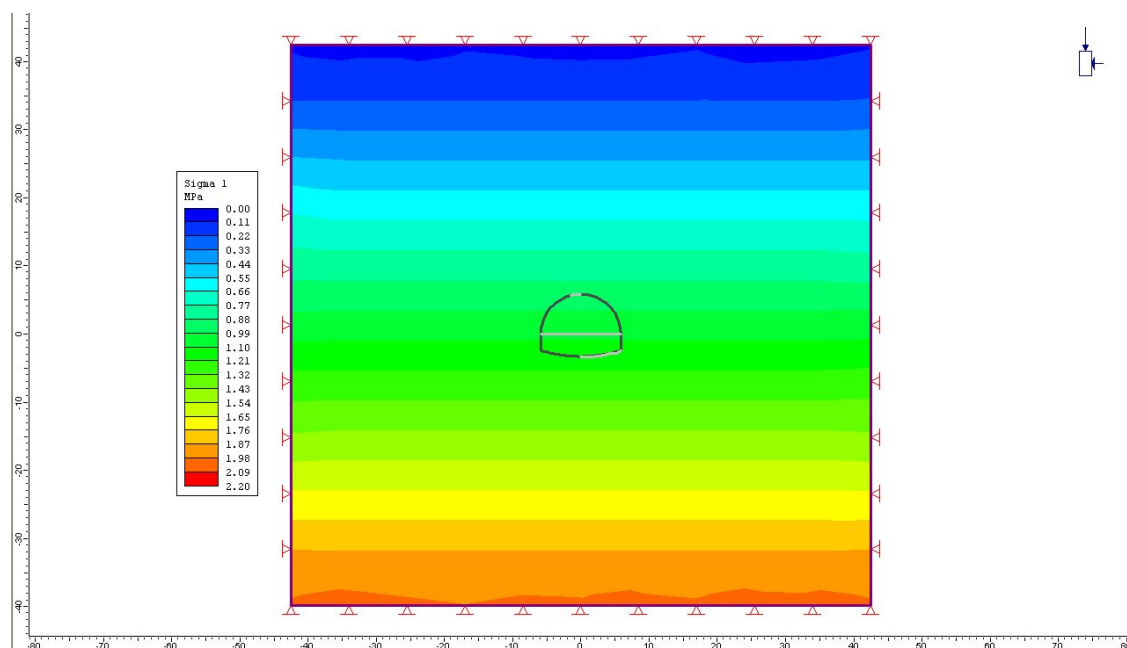
Young's modulus 30000 MPa

Poisson's ratio 0.2

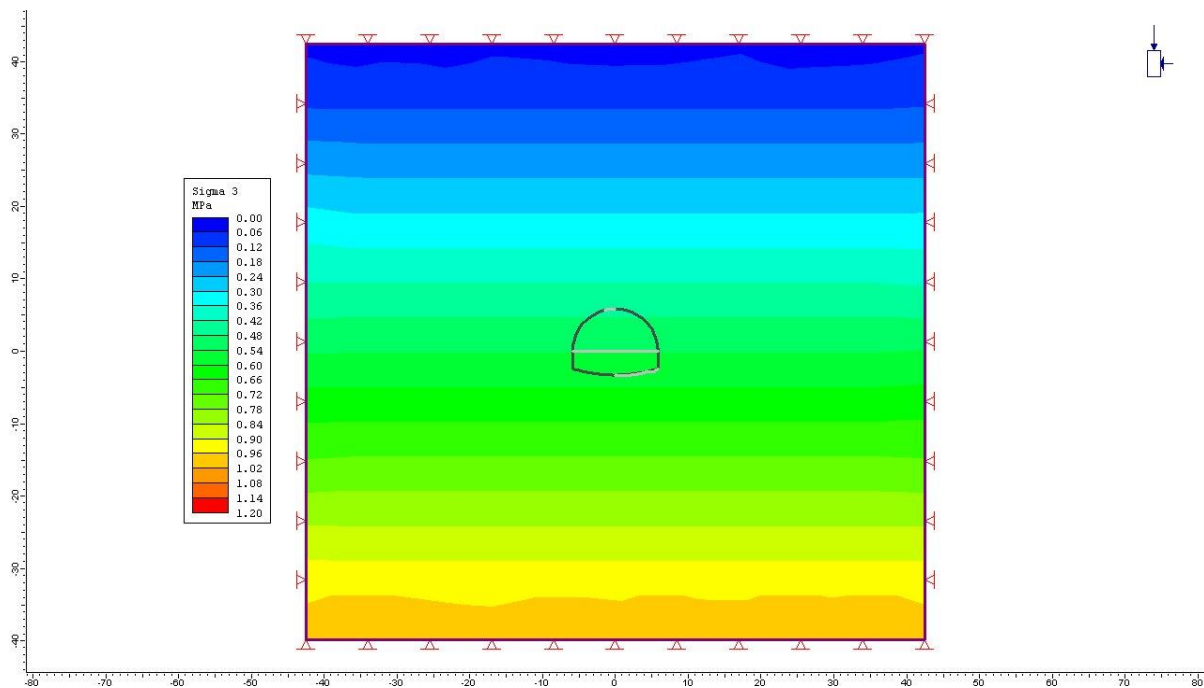
2.1. FAZA 0 – BEZ ISKOPA



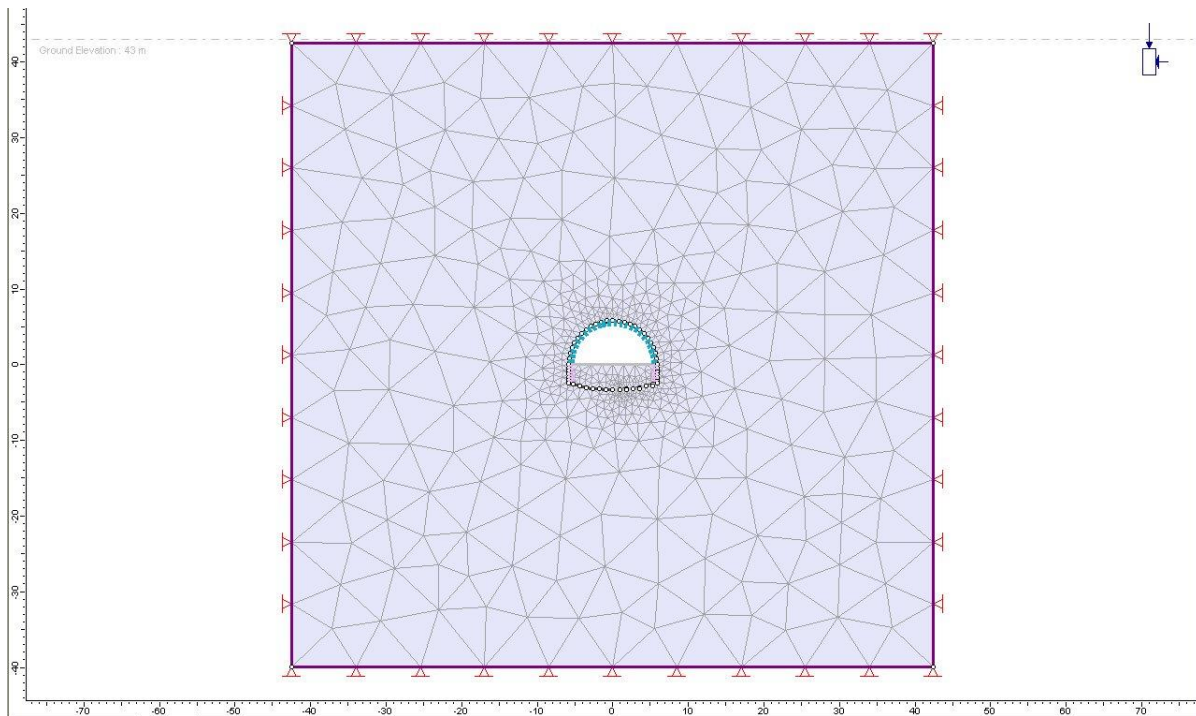
NAPONI SIGMA1



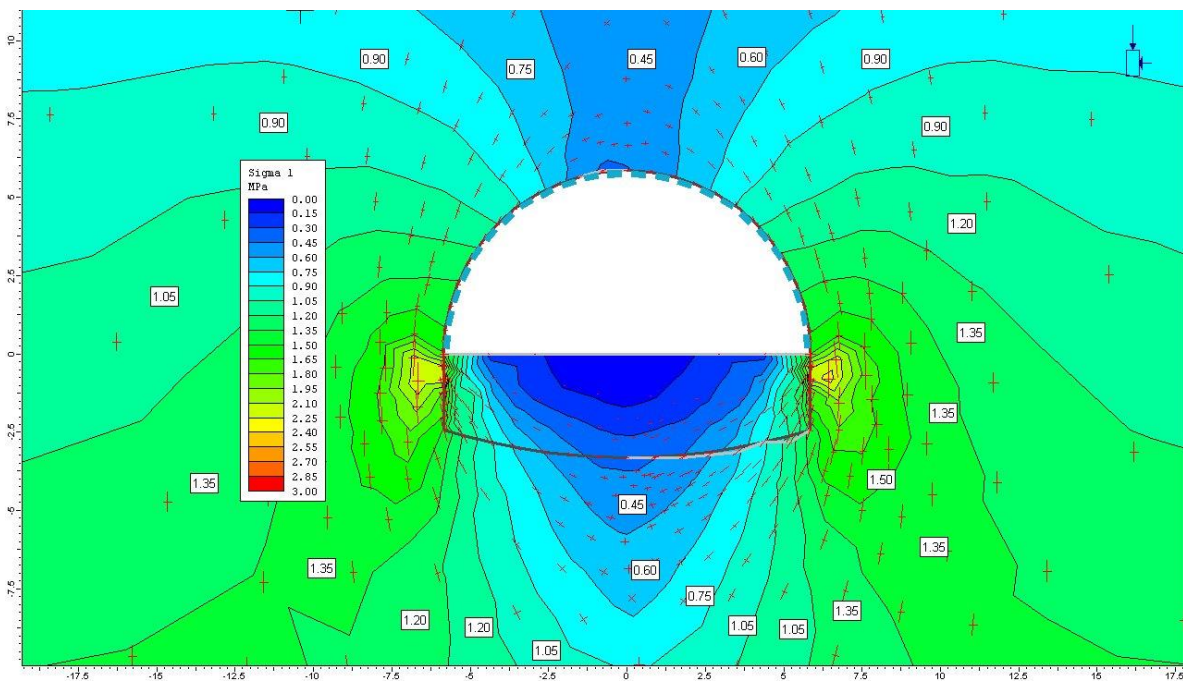
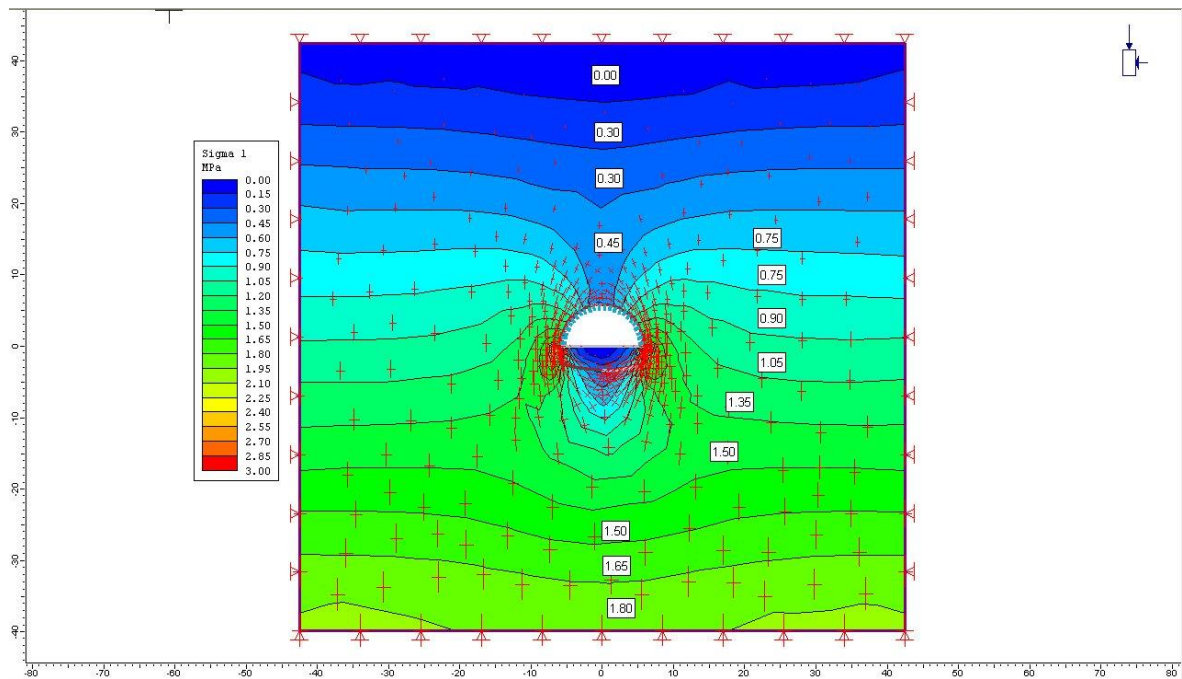
NAPONI SIGMA3



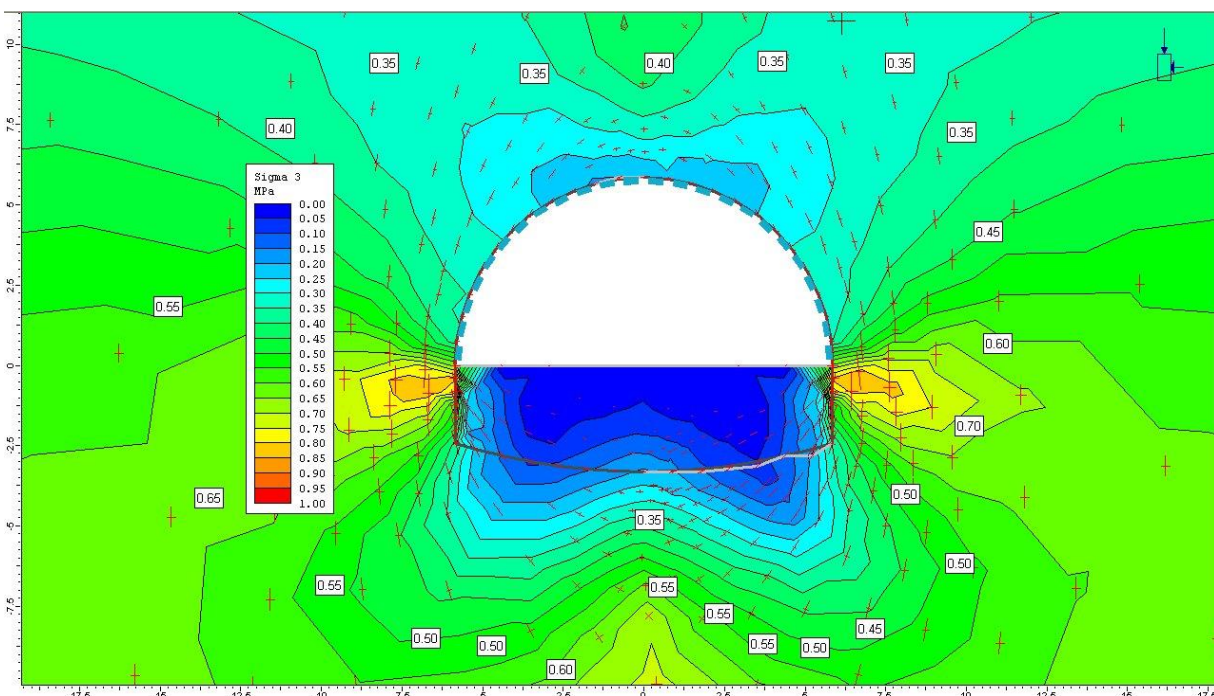
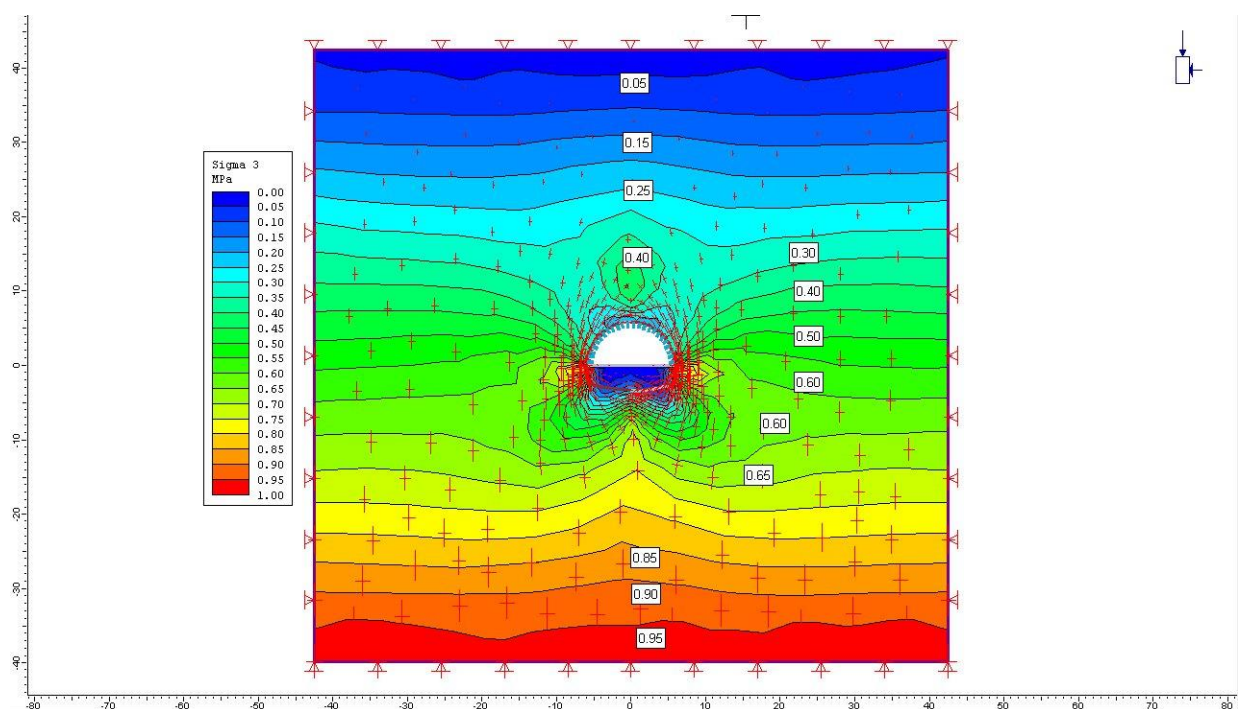
2.2. FAZA 1 – ISKOP 1. FAZE



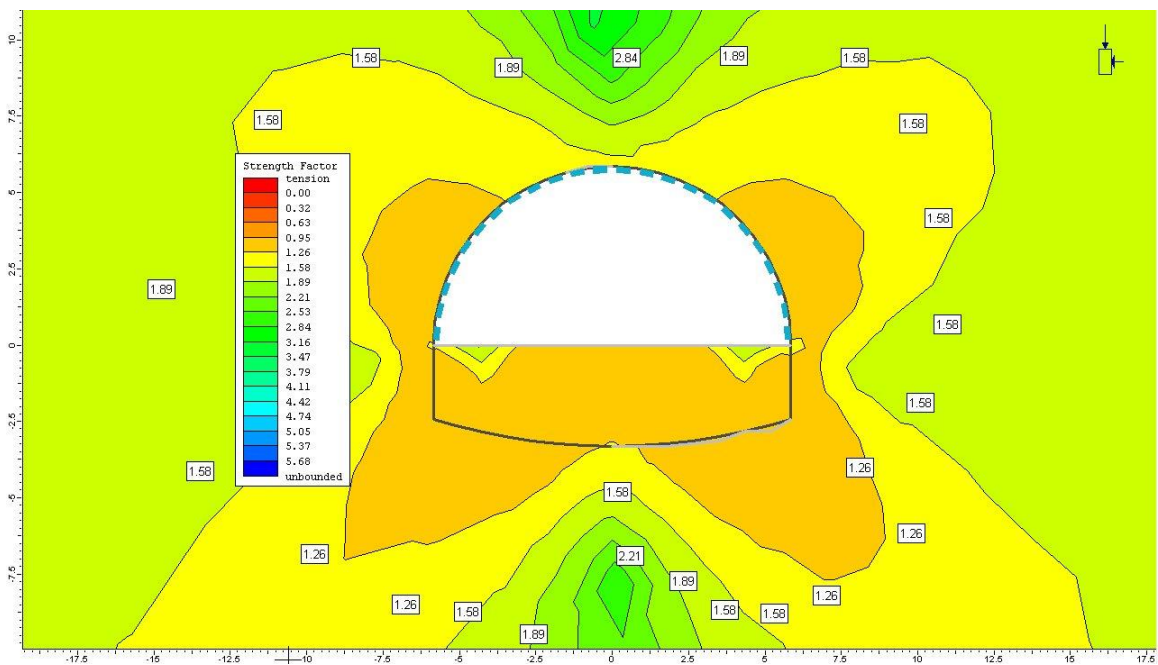
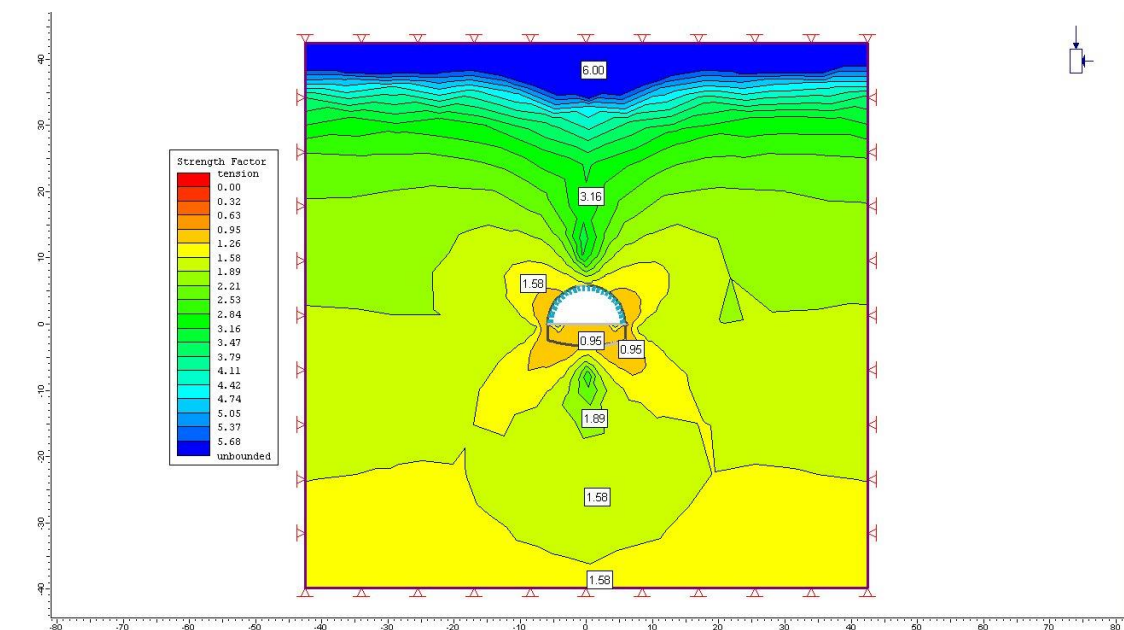
NAPONI SIGMA1



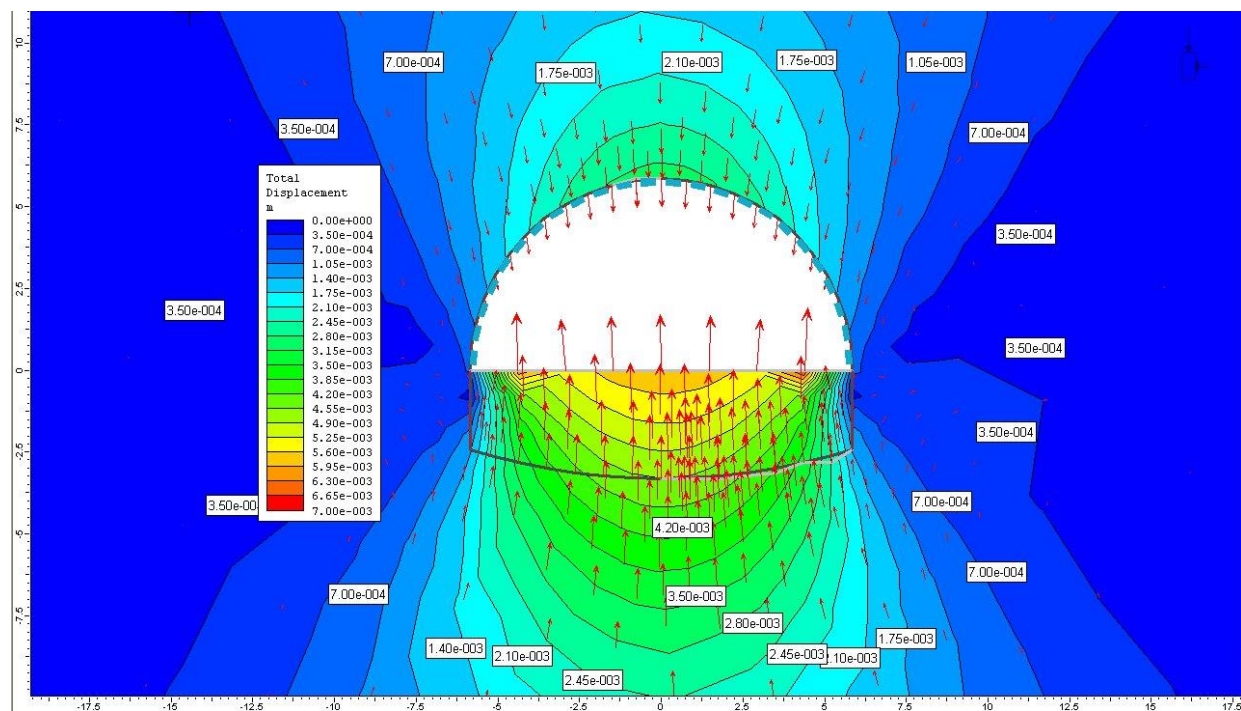
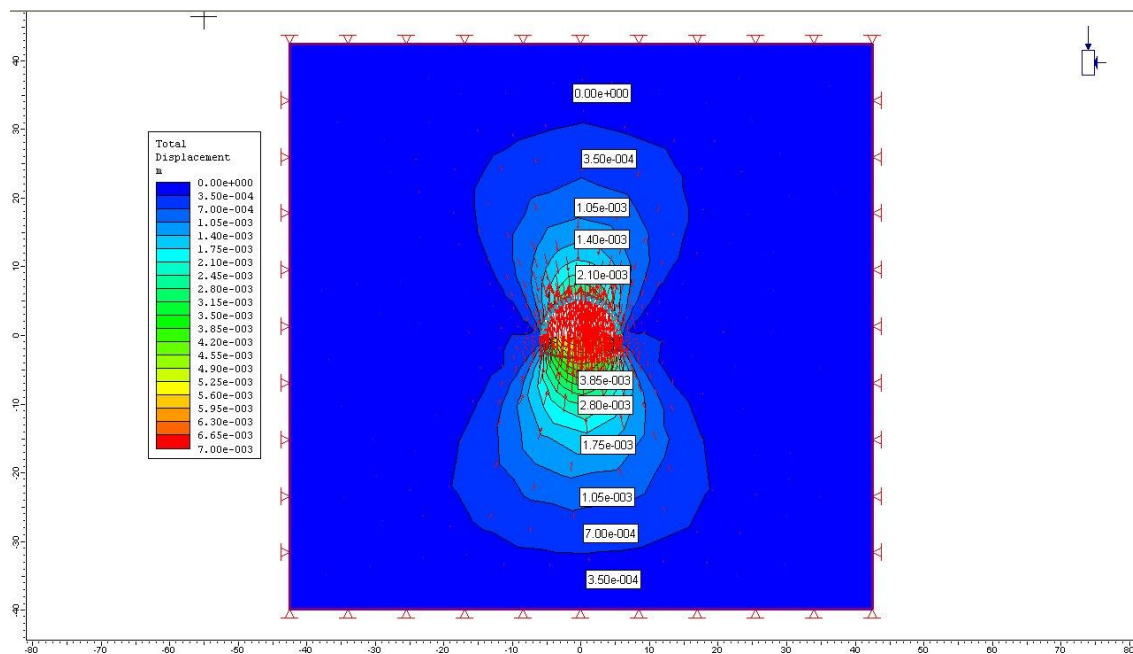
NAPONI SIGMA3



KOEFICIJENTI SIGURNOSTI



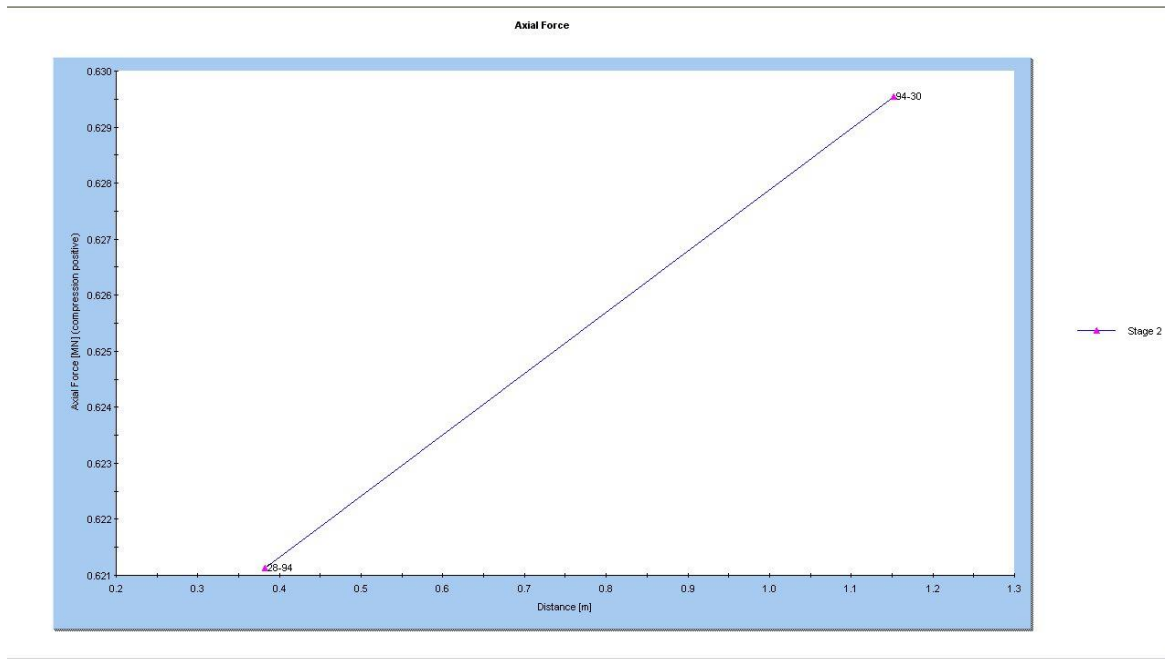
TOTALNA POMJERANJA



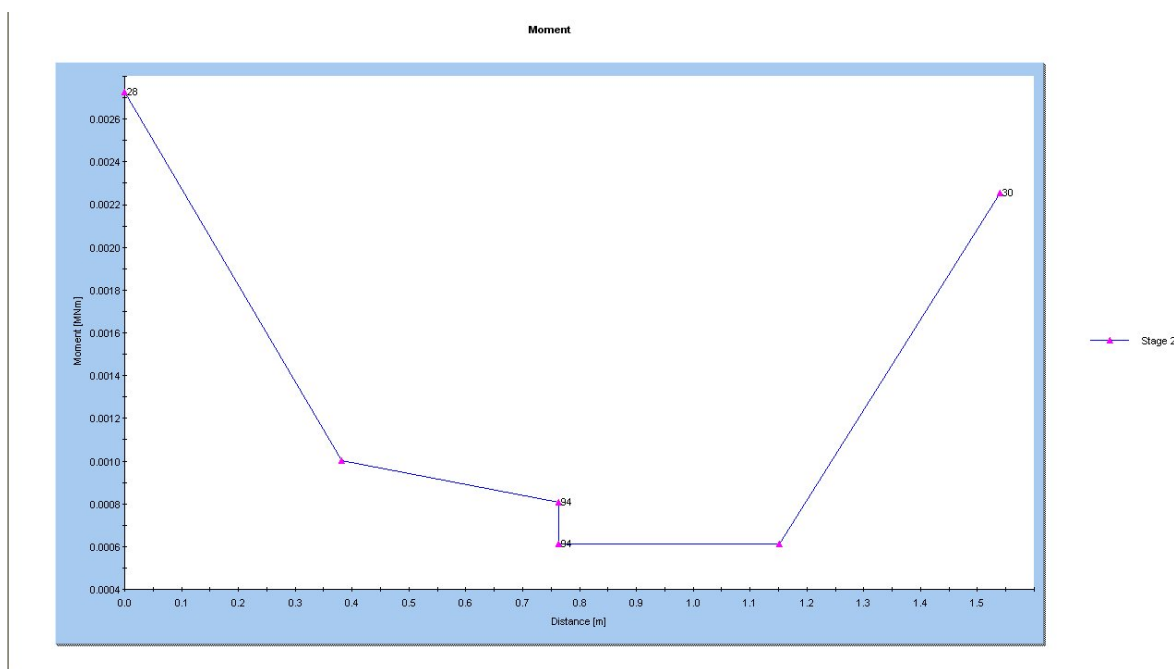
PRESJEČNE SILE U OBLOZI

1.FAZA ISKOPA

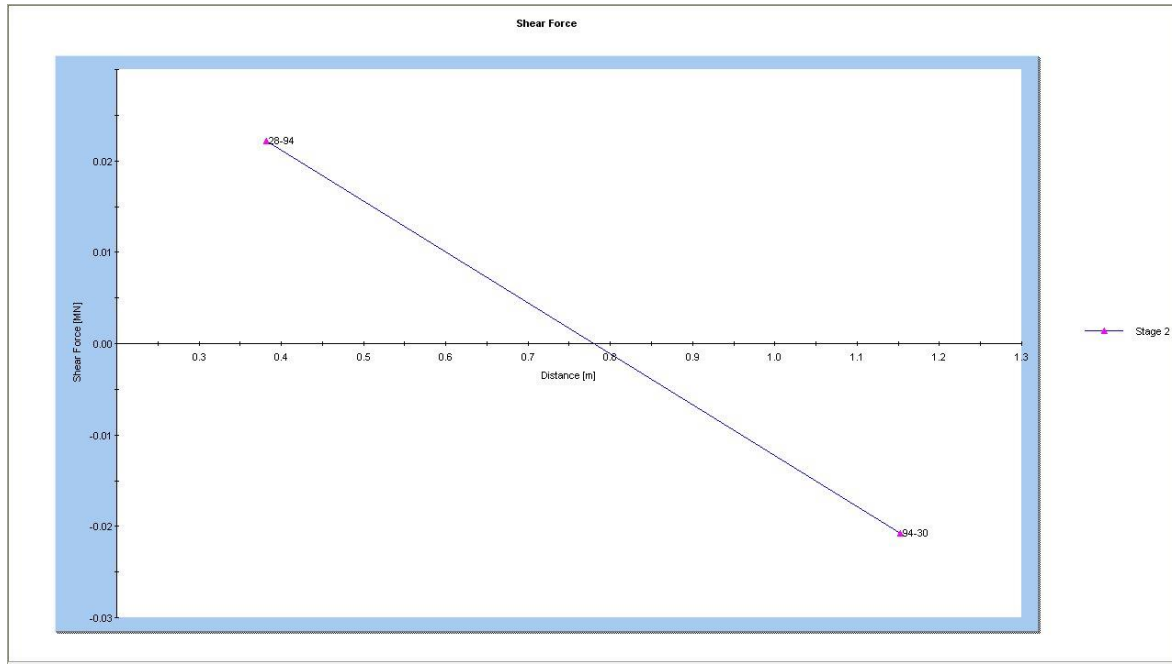
NORMALNE SILE



MOMENTI SAVIJANJA

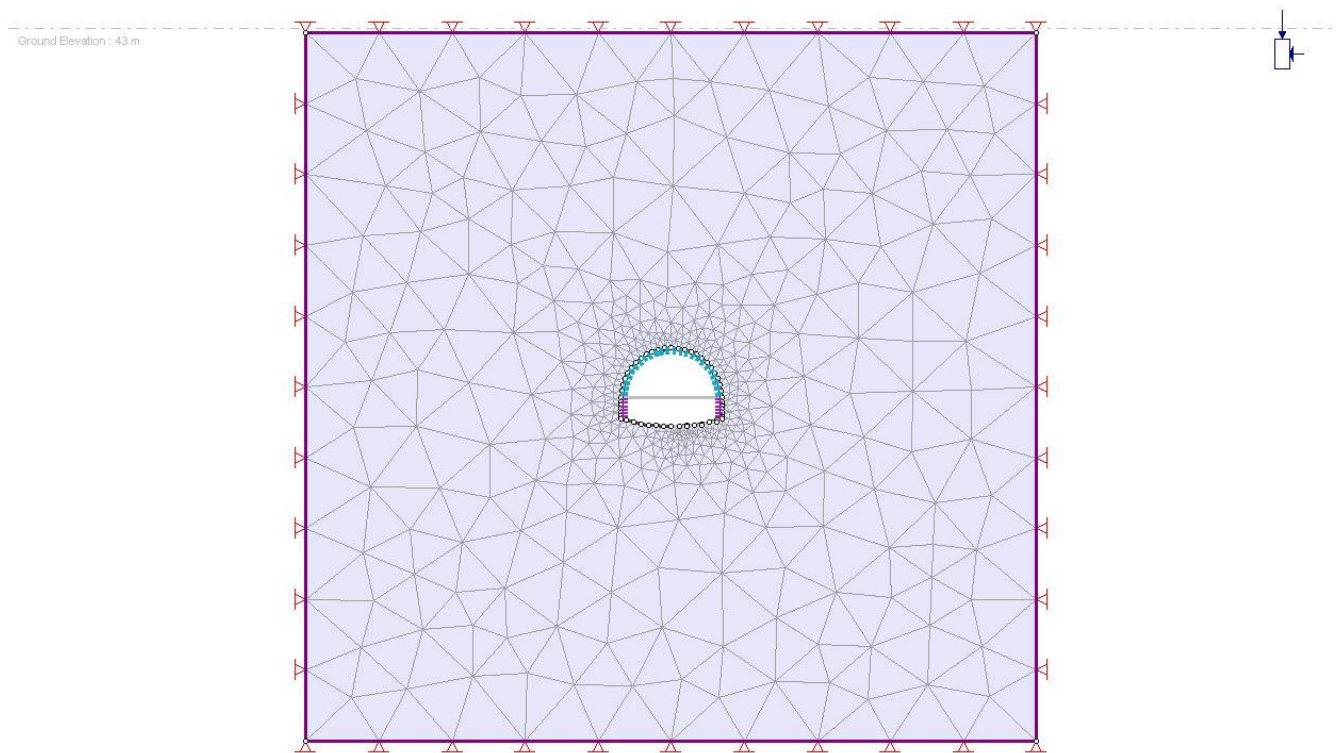


TRANSVERZALNE SILE

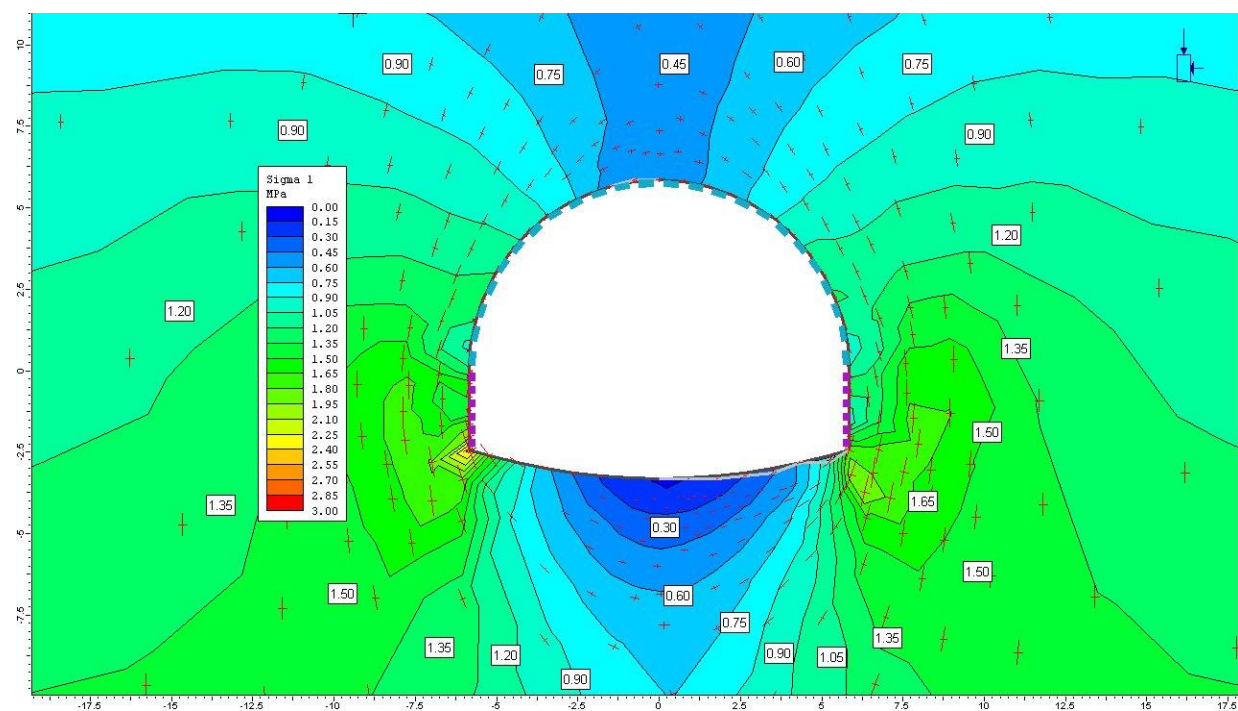
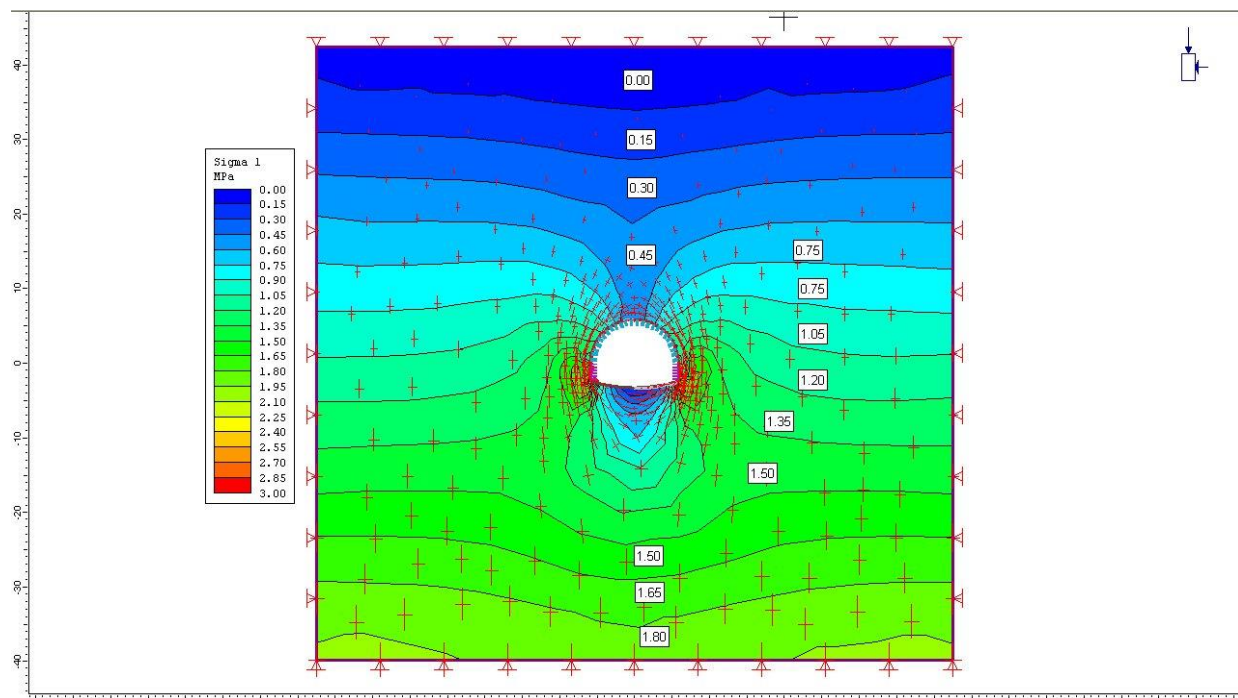


2.3. FAZA 2 – ISKOP 2. FAZE

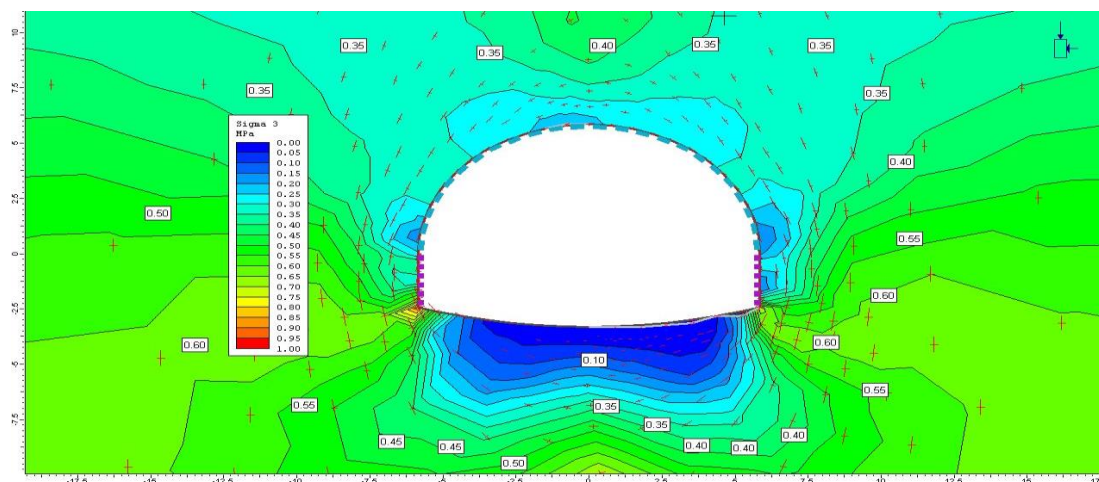
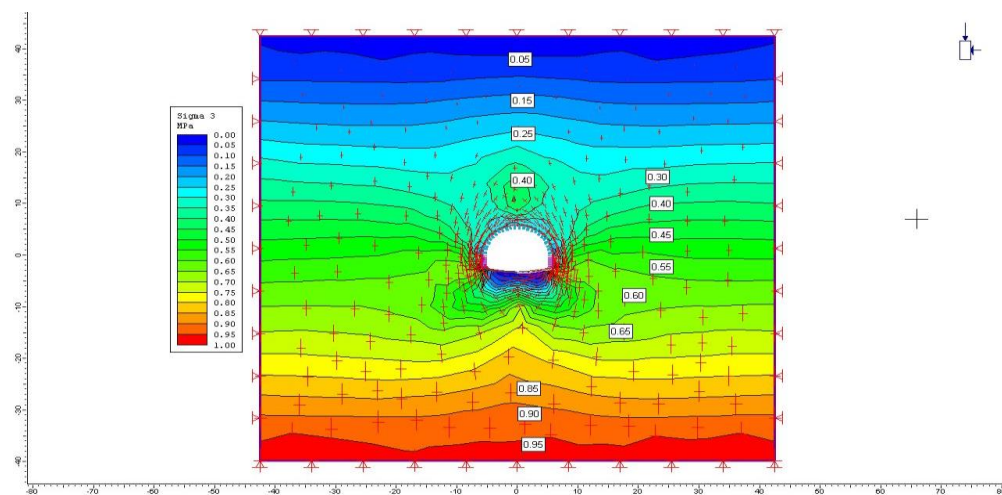
MODEL



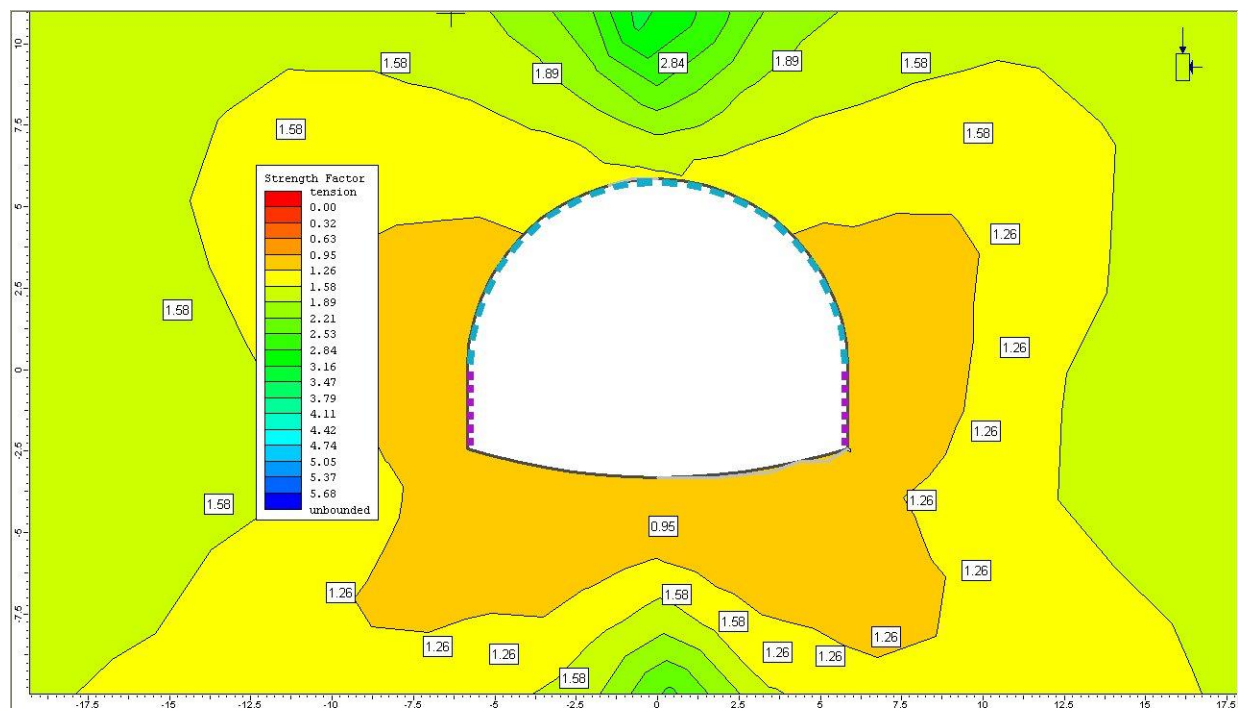
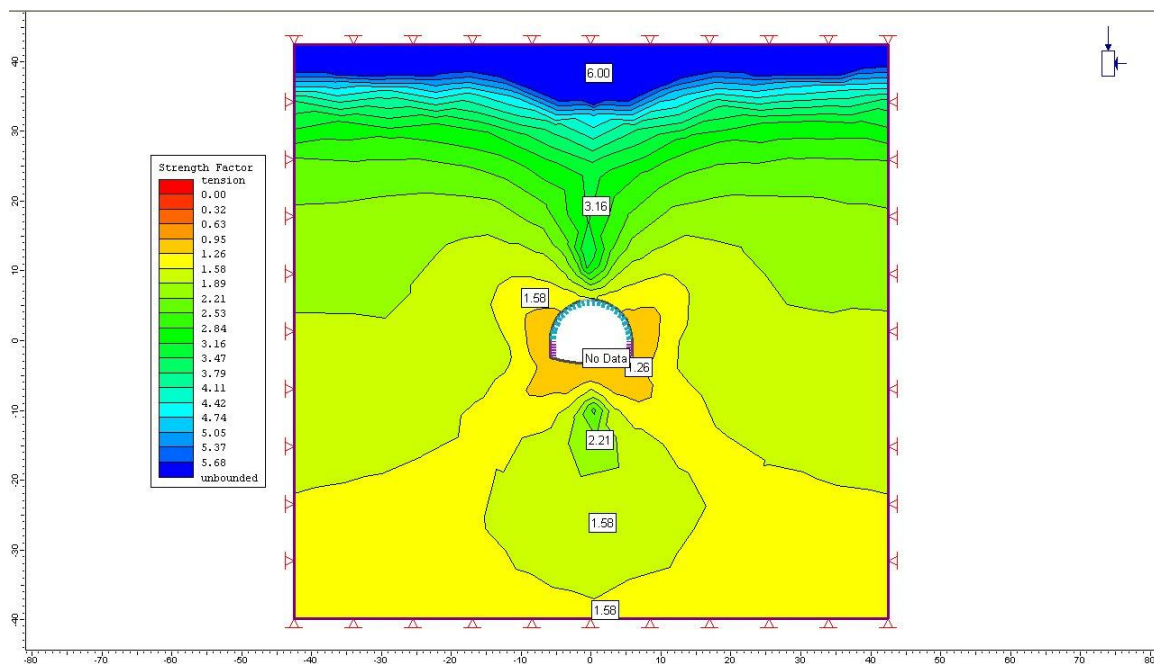
NAPONI SIGMA1



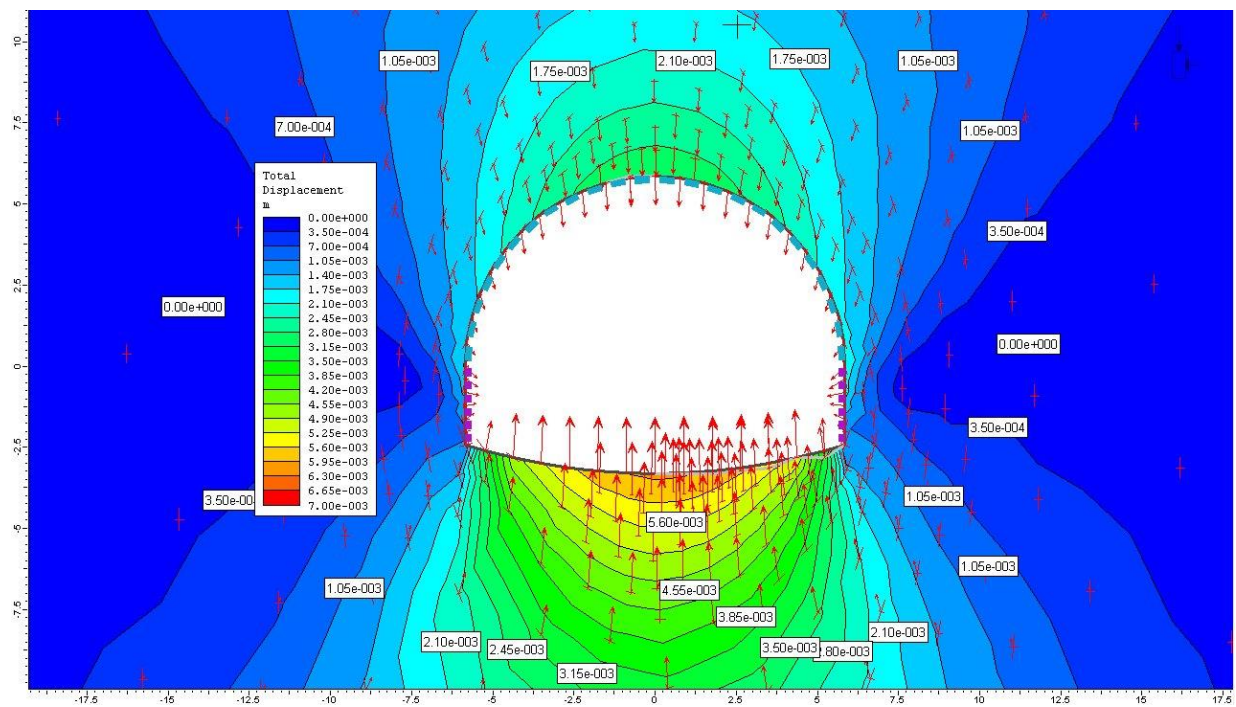
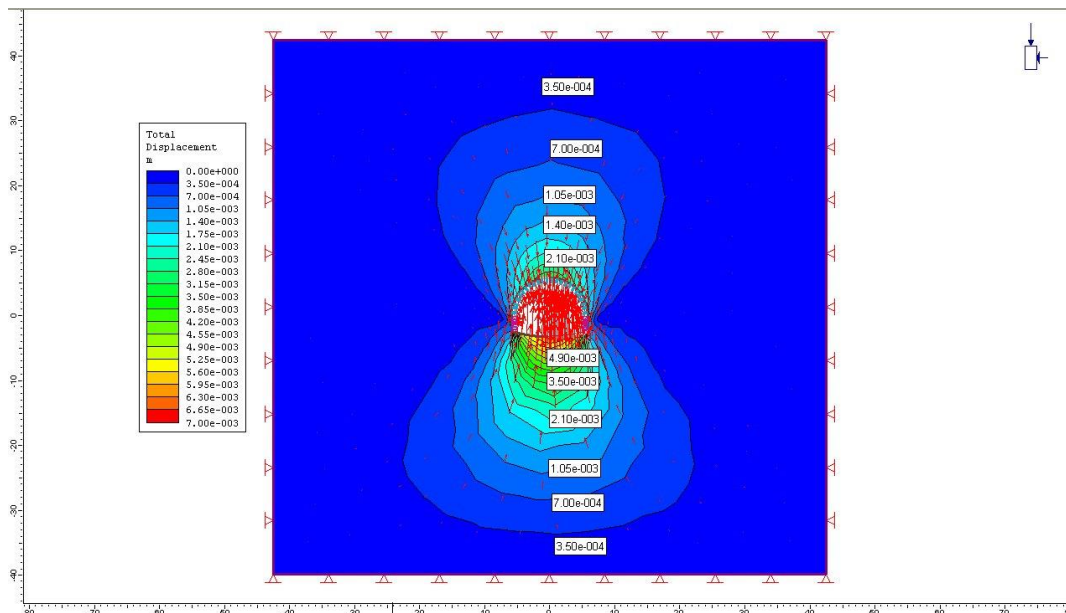
NAPONI SIGMA3



KOEFICIJENTI SIGURNOSTI



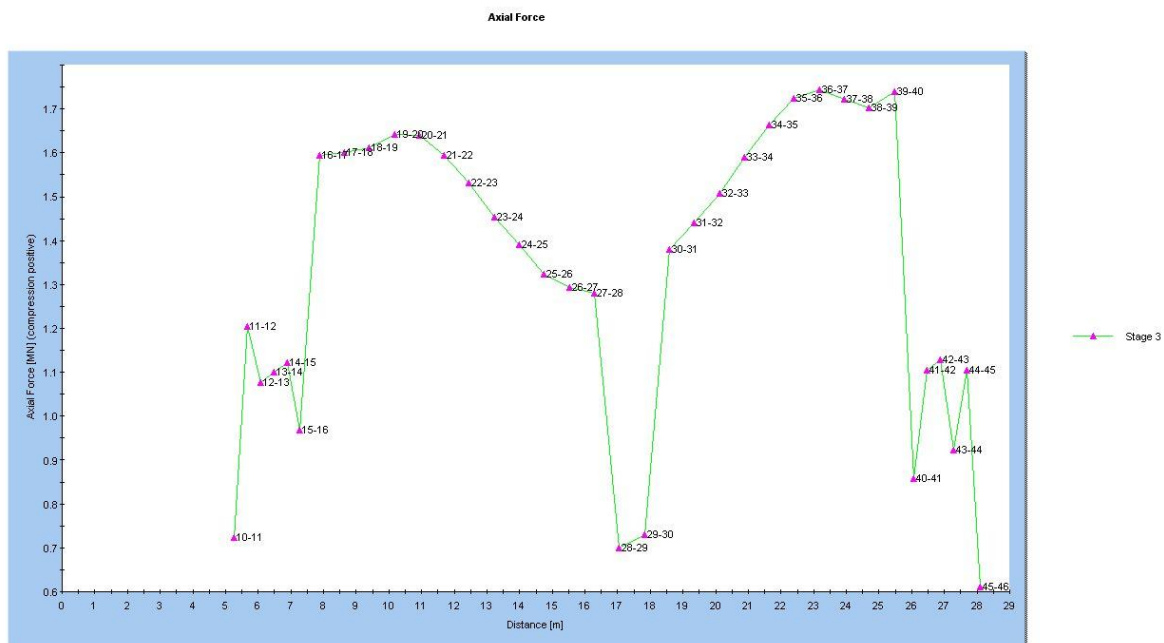
TOTALNA POMJERANJA



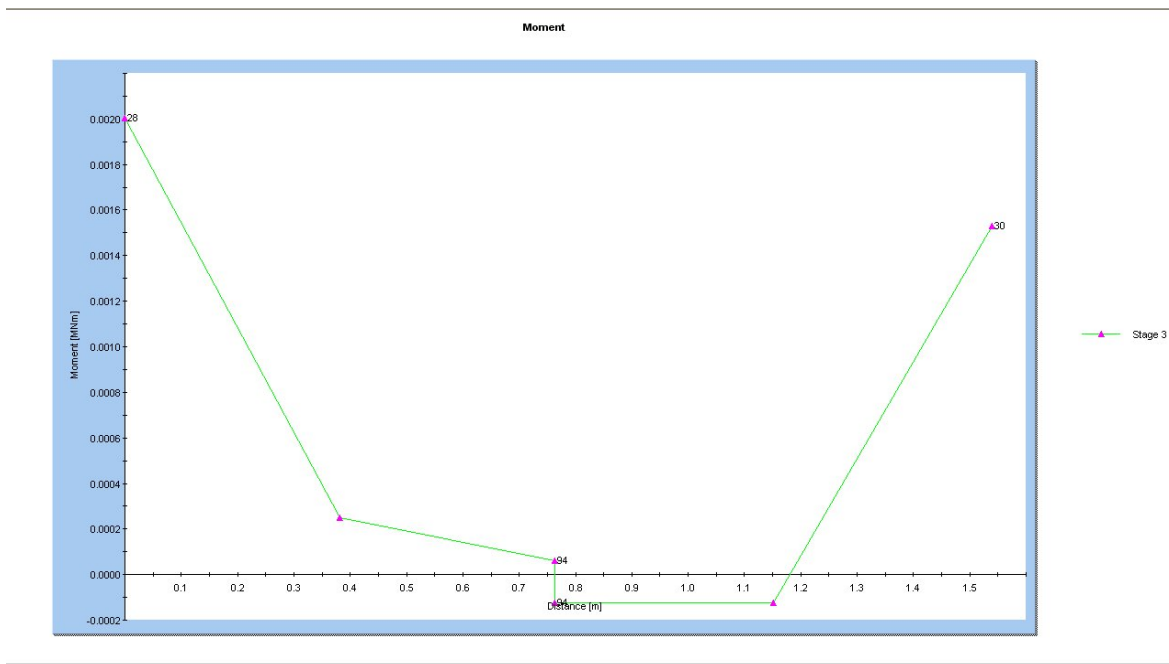
PRESJEČNE SILE U OBLOZI

2.FAZA ISKOPA

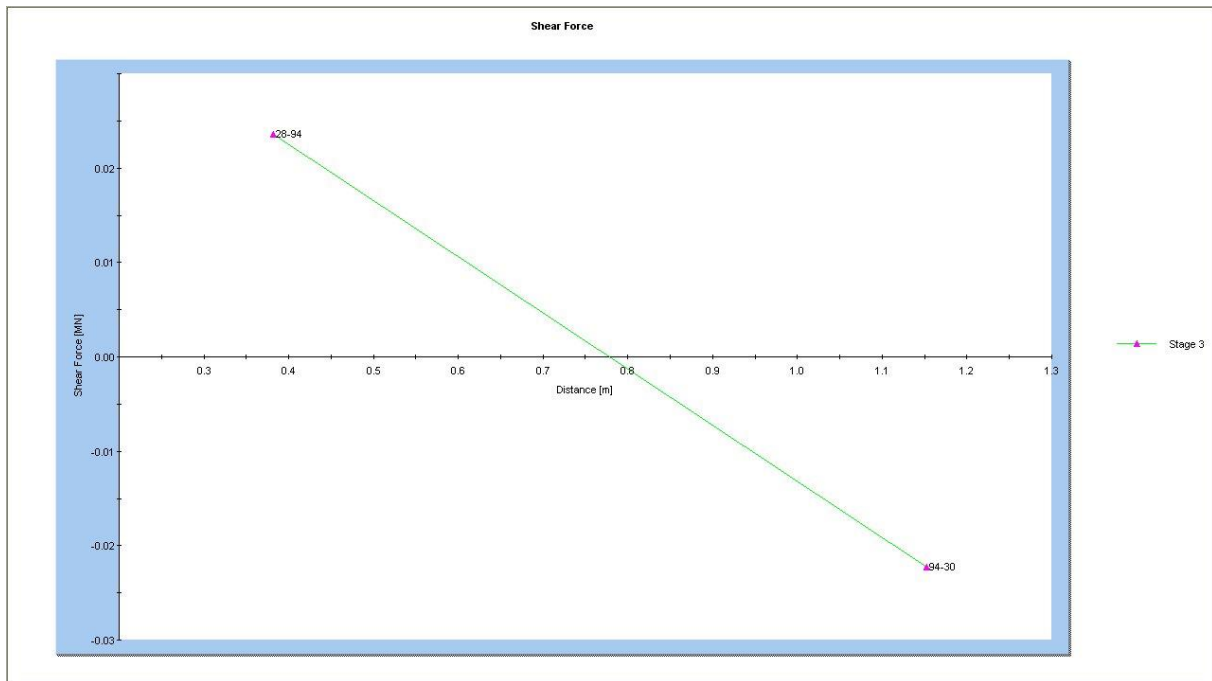
NORMALNE SILE



MOMENTI SAVIJANJA

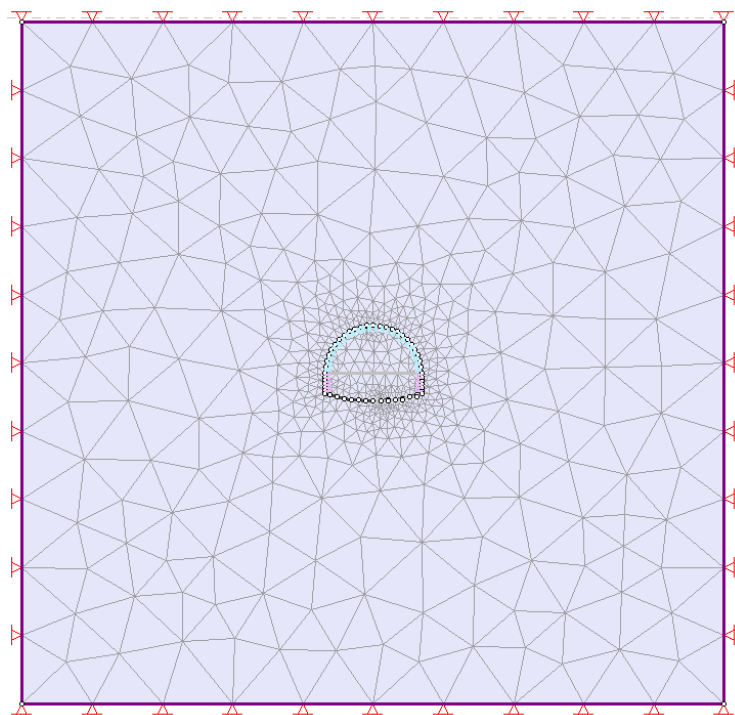


TRANSVERZALNE SILE



2. MODEL SA OSIGURANJEM MIKROARMIRANIM BETONOM (MAB), $L/D=50/0,75$, 2% ČELIČNIH VLAKANA

Numerički model sa unijetim osiguranjem od mikroarmiranog betona debljine 25 cm klase 37,8:

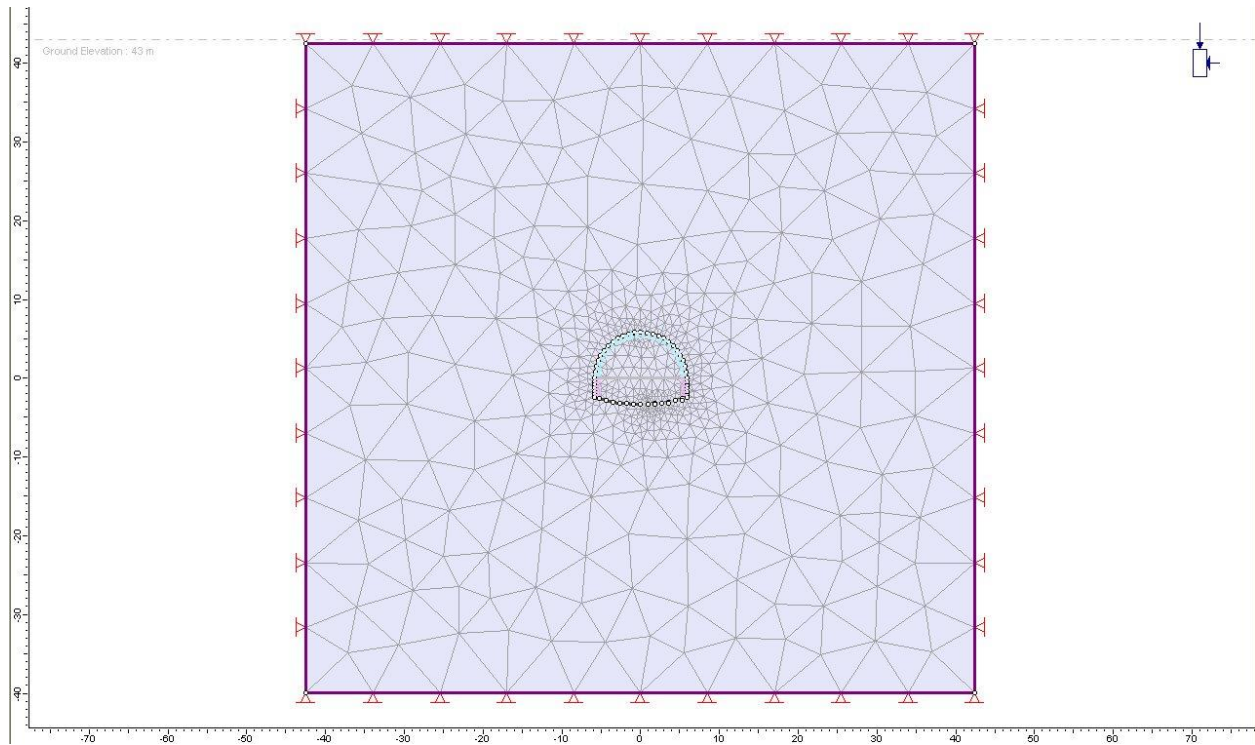


Karakteristike osiguranja prskanim betonom u modelu su kako je zaključeno u uvodnom dijelu:

- vršni napon pri pritisku	38,7 Mpa
- rezidualni napon pri pritisku	6.5 Mpa
- vršni napon pri zatezanju	7.5 Mpa
- rezidualni napon pri zatezanju	1.5 Mpa

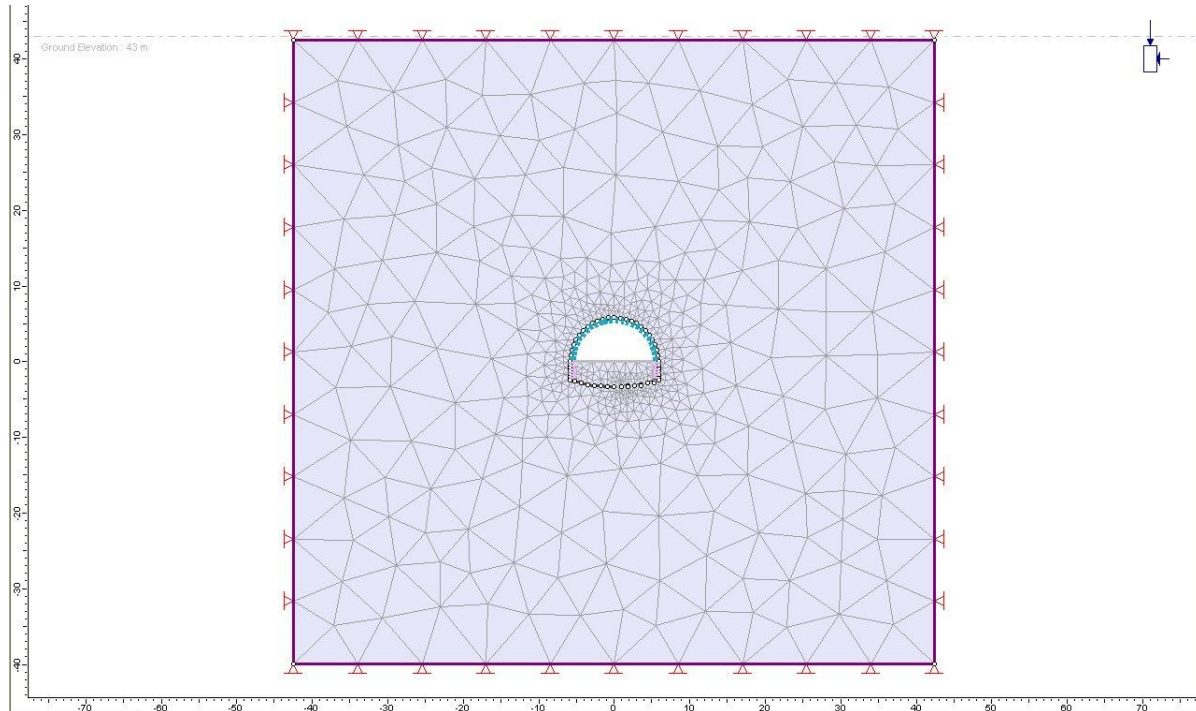
3.1. FAZA 0 – BEZ ISKOPA

MODEL

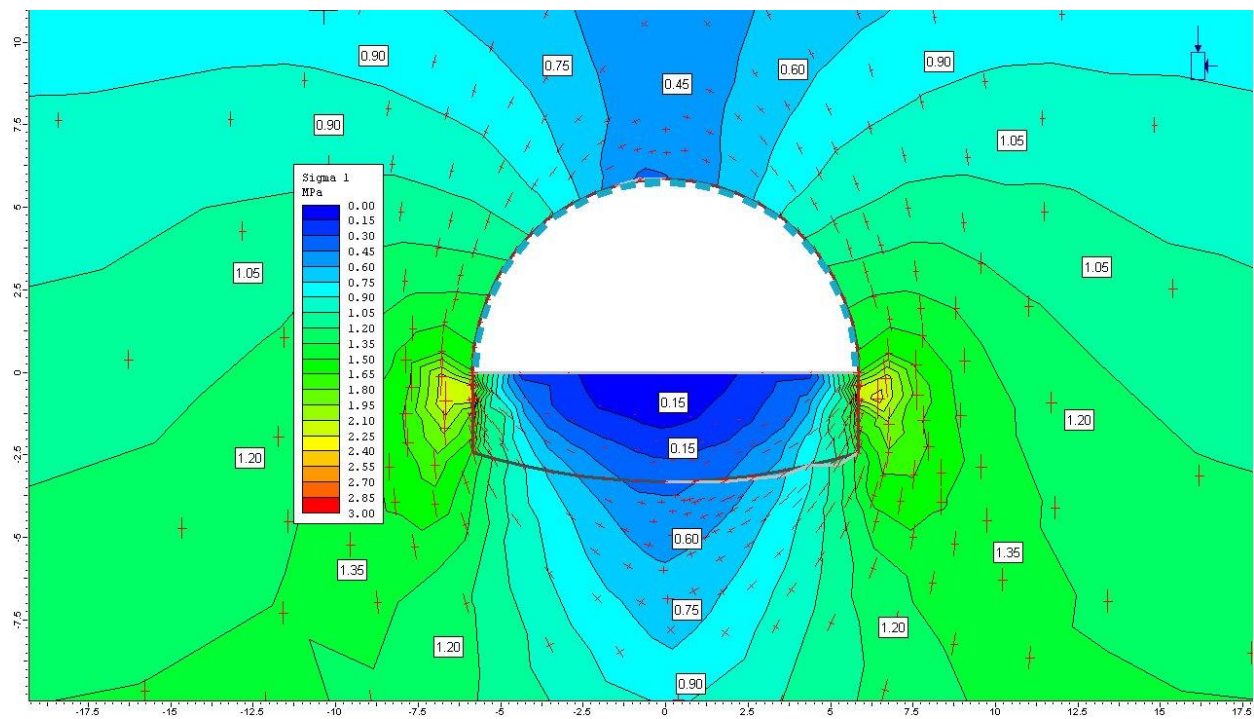
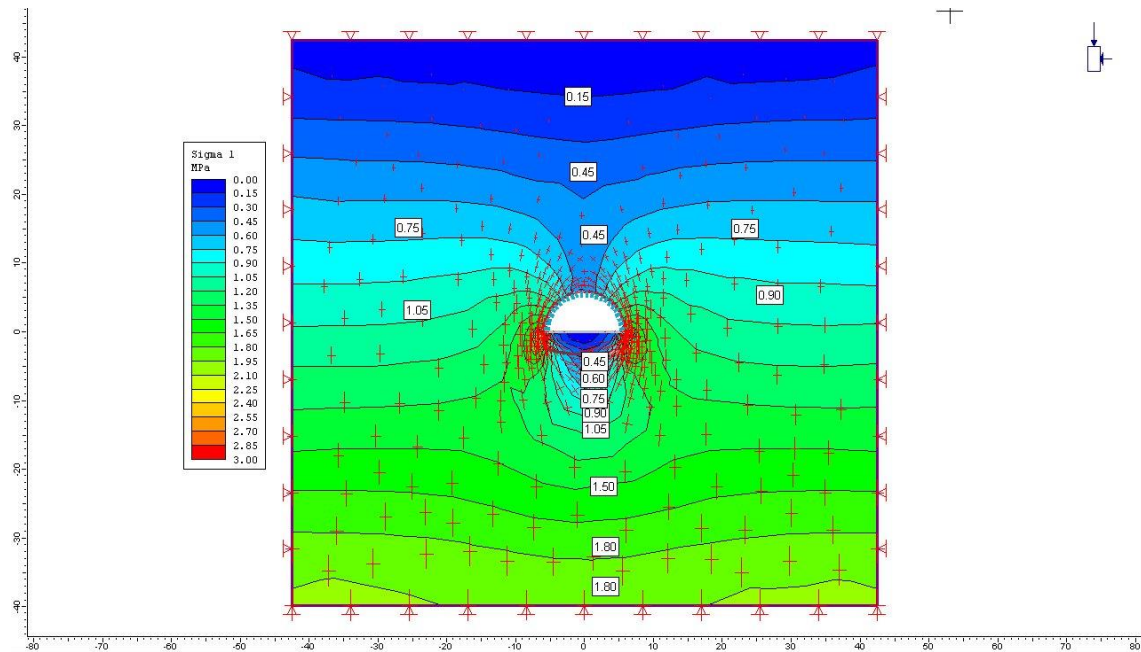


3.2. FAZA 1 – ISKOP 1.FAZE

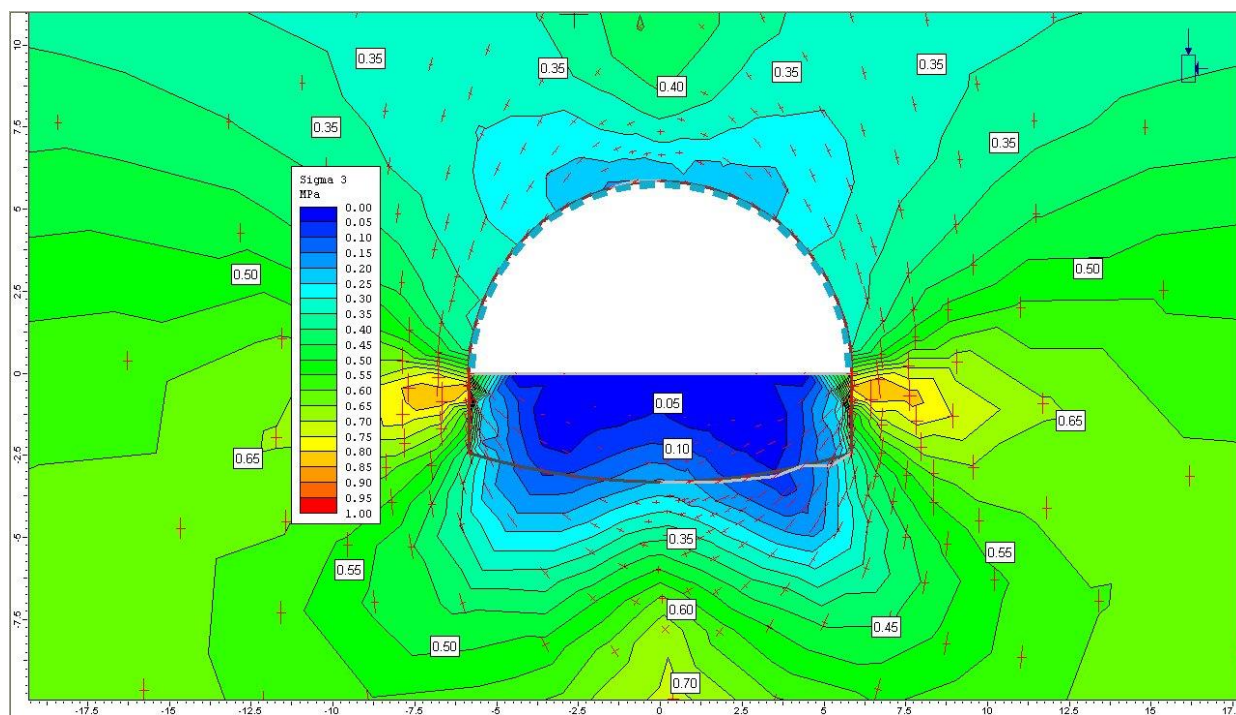
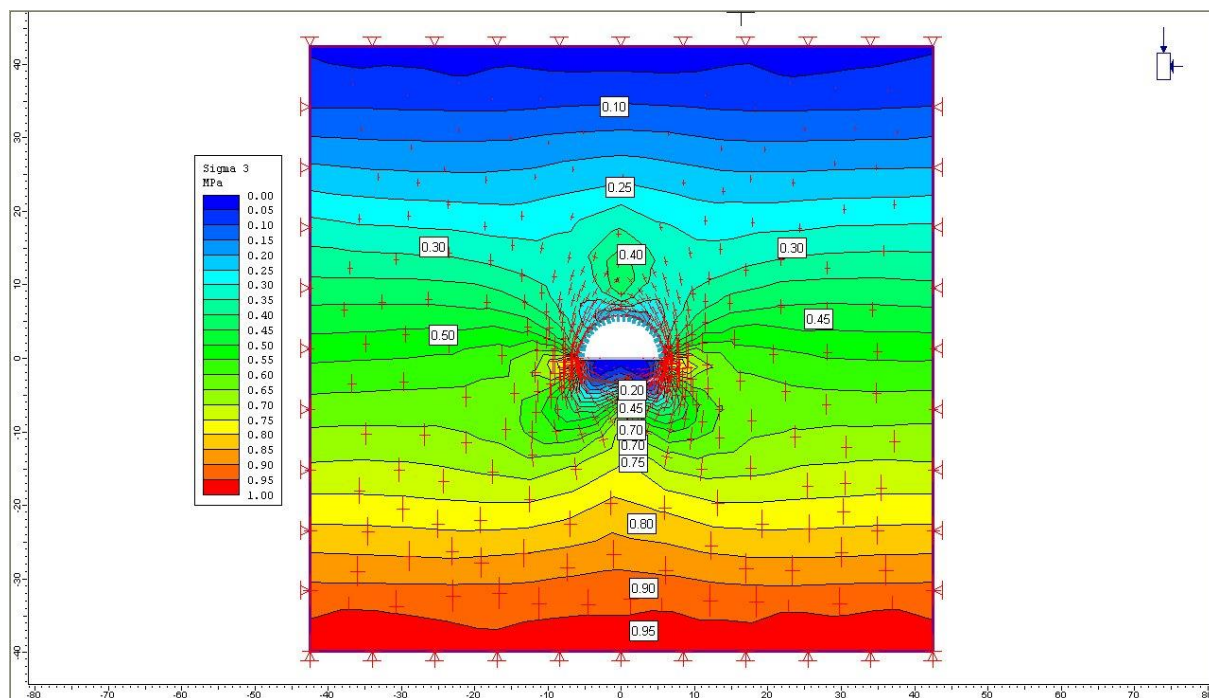
MODEL



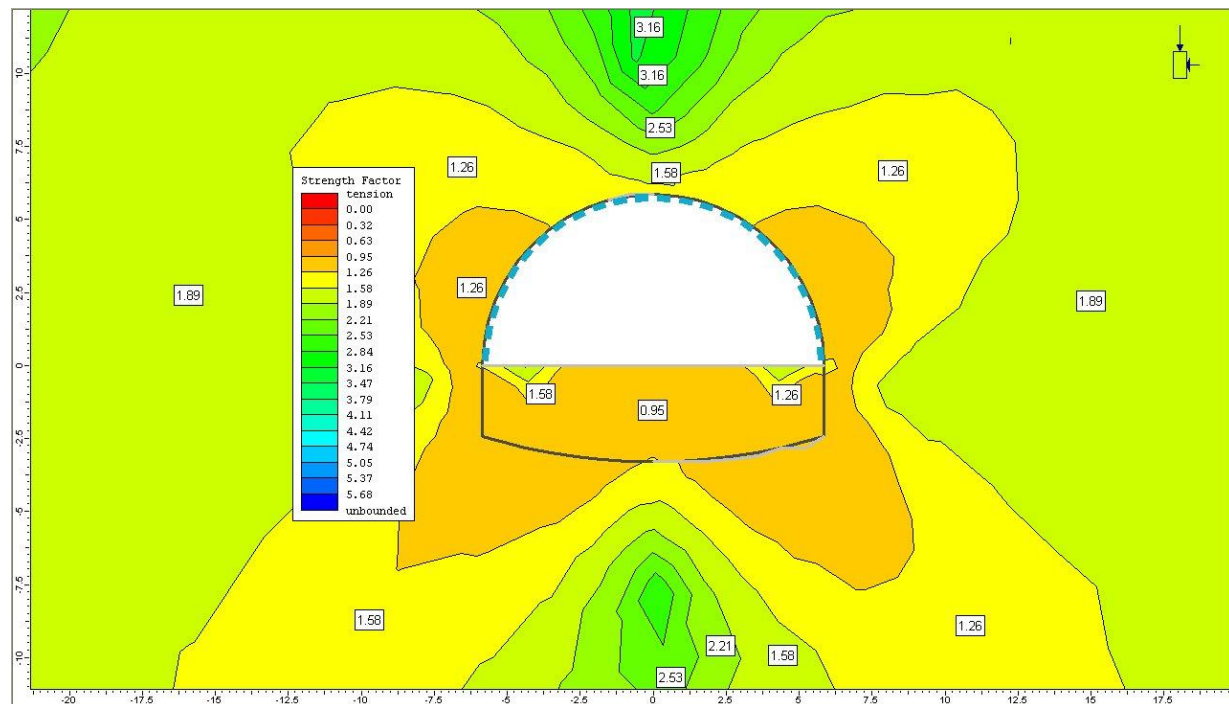
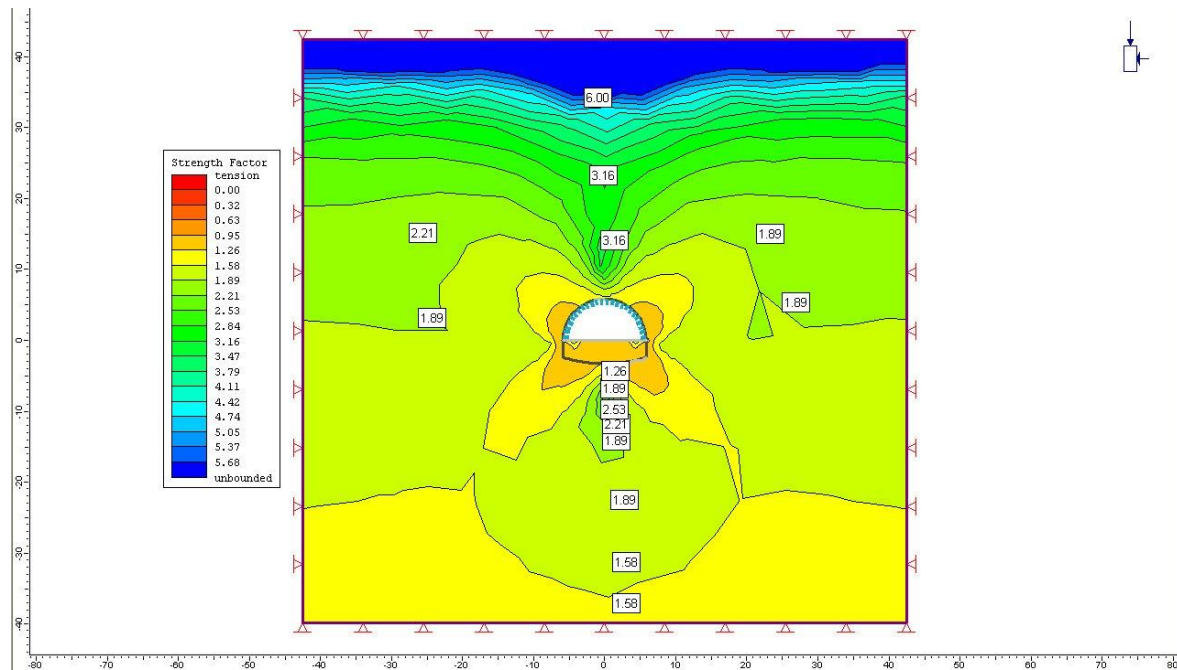
NAPONI SIGMA1



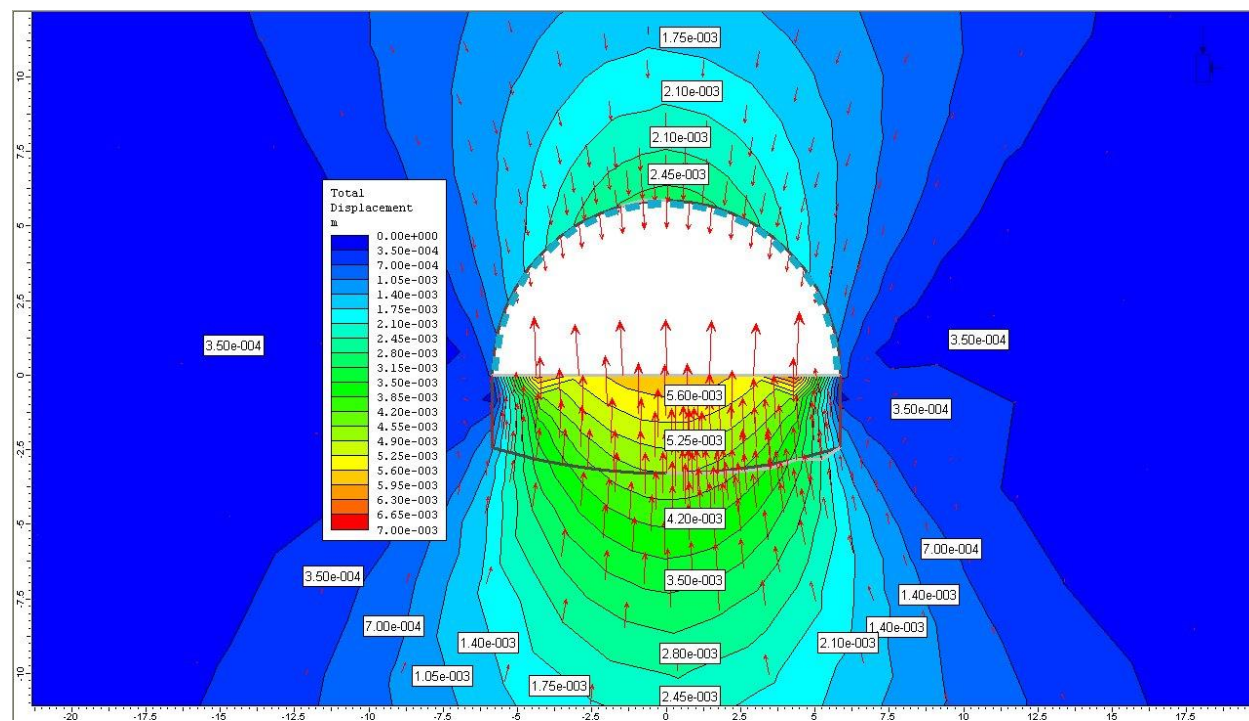
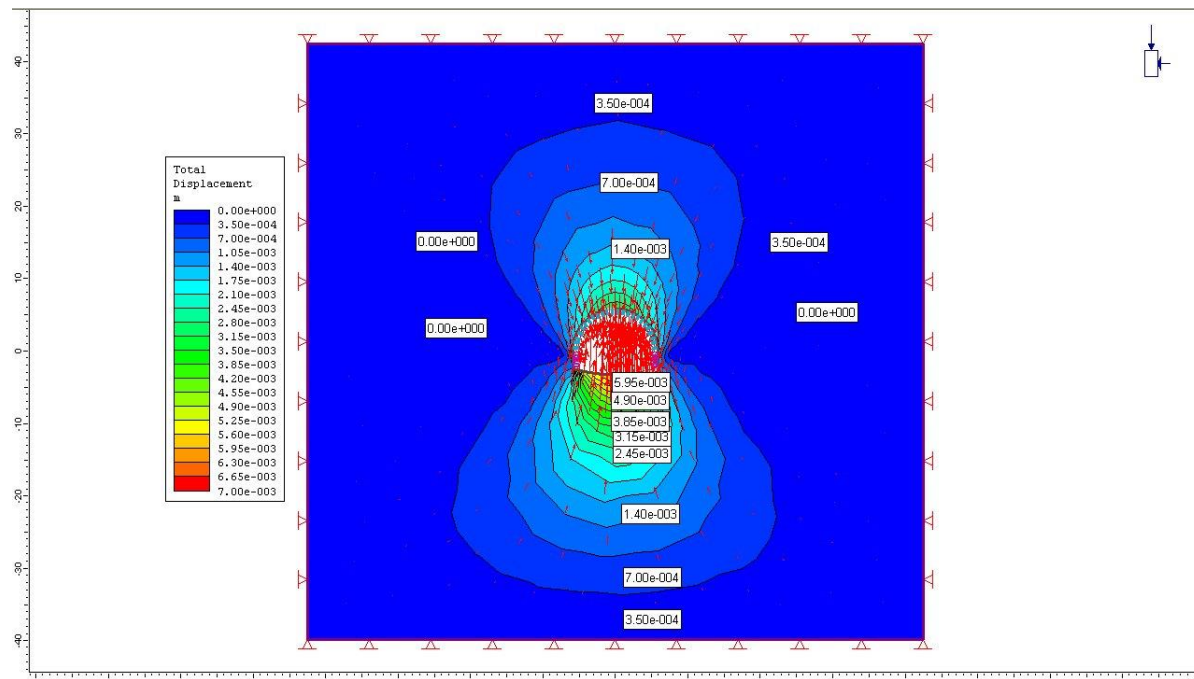
NAPONI SIGMA3



KOEFICIJENTI SIGURNOSTI



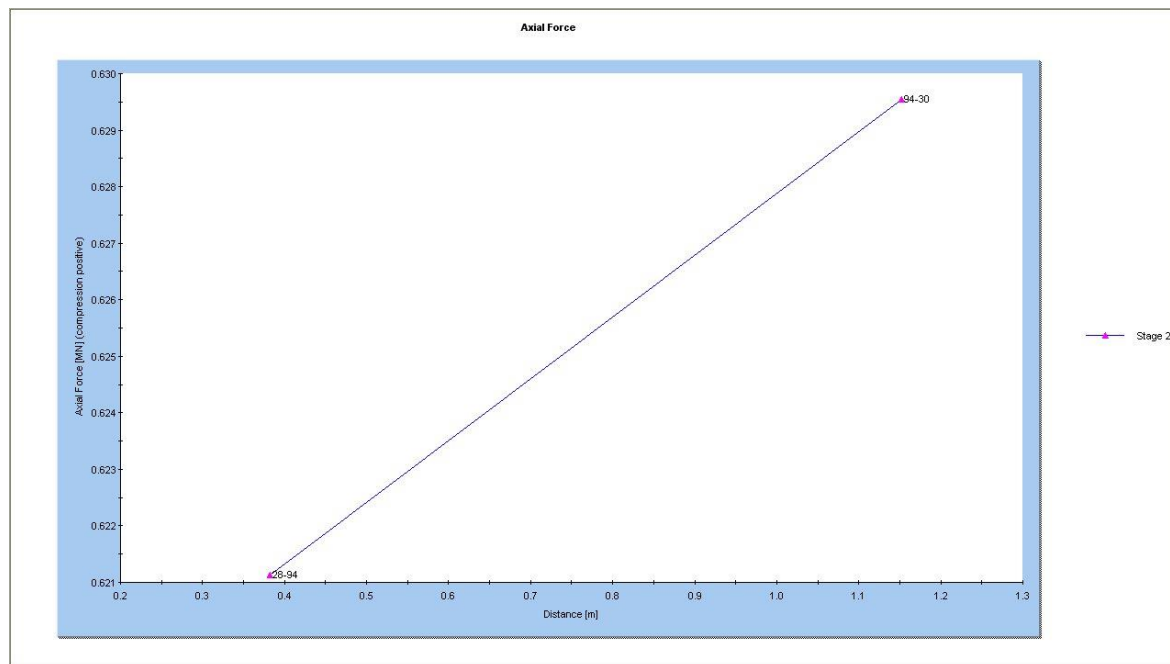
TOTALNA POMJERANJA



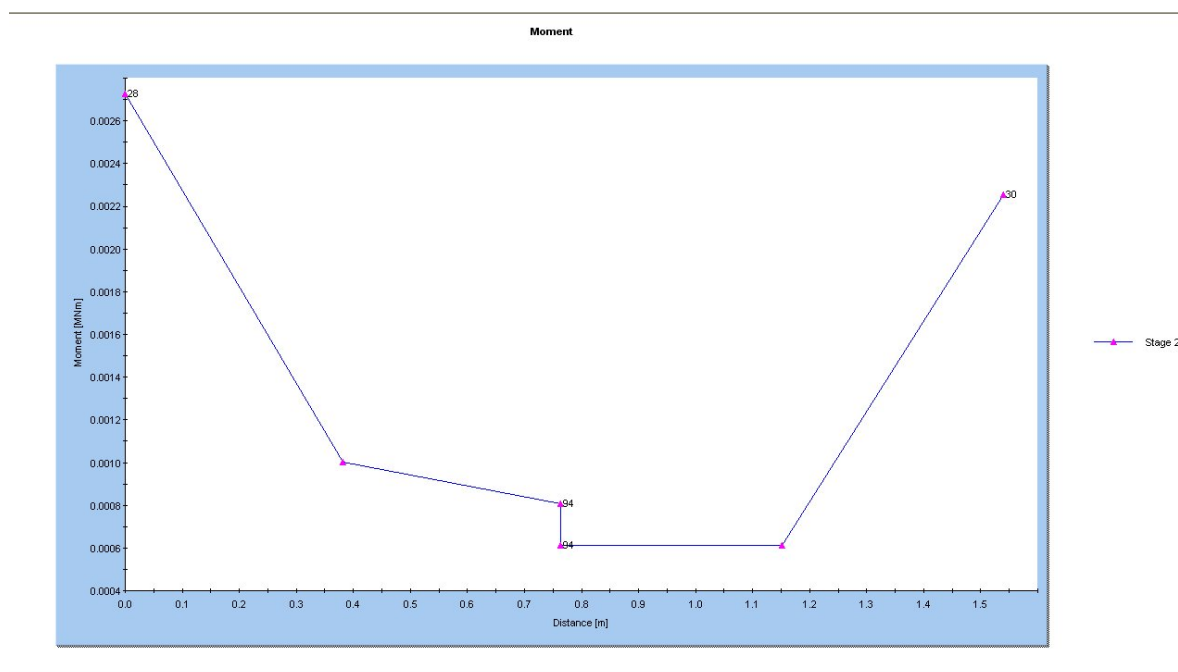
PRESJEČNE SILE U OBLOZI

1.FAZA ISKOPA

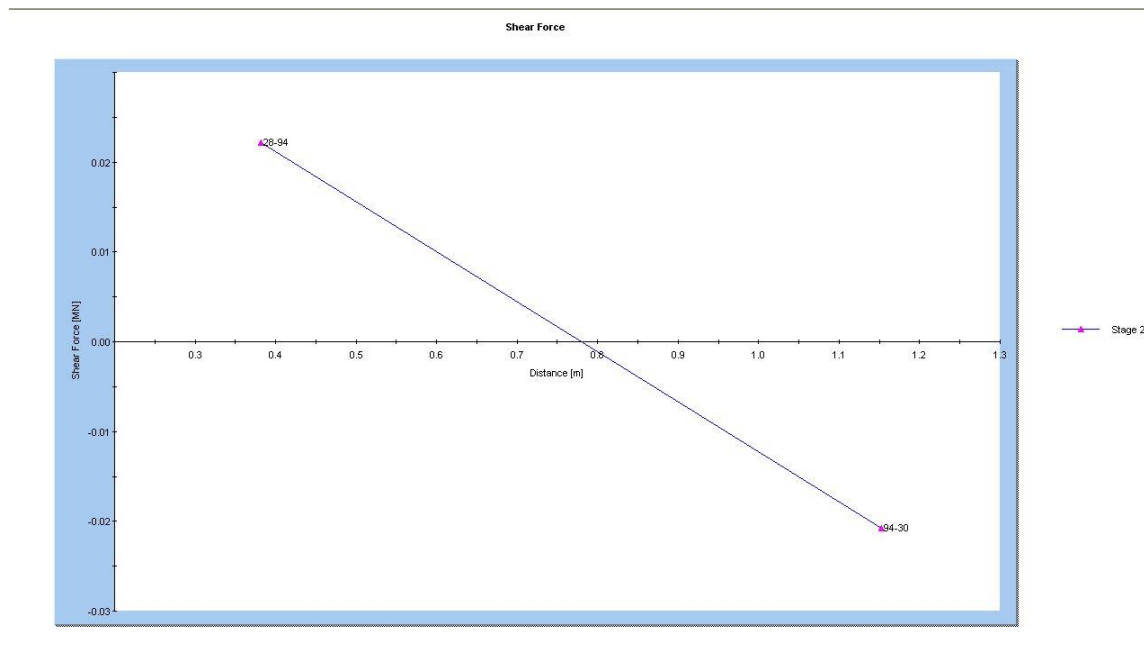
NORMALNE SILE



MOMENTI SAVIJANJA

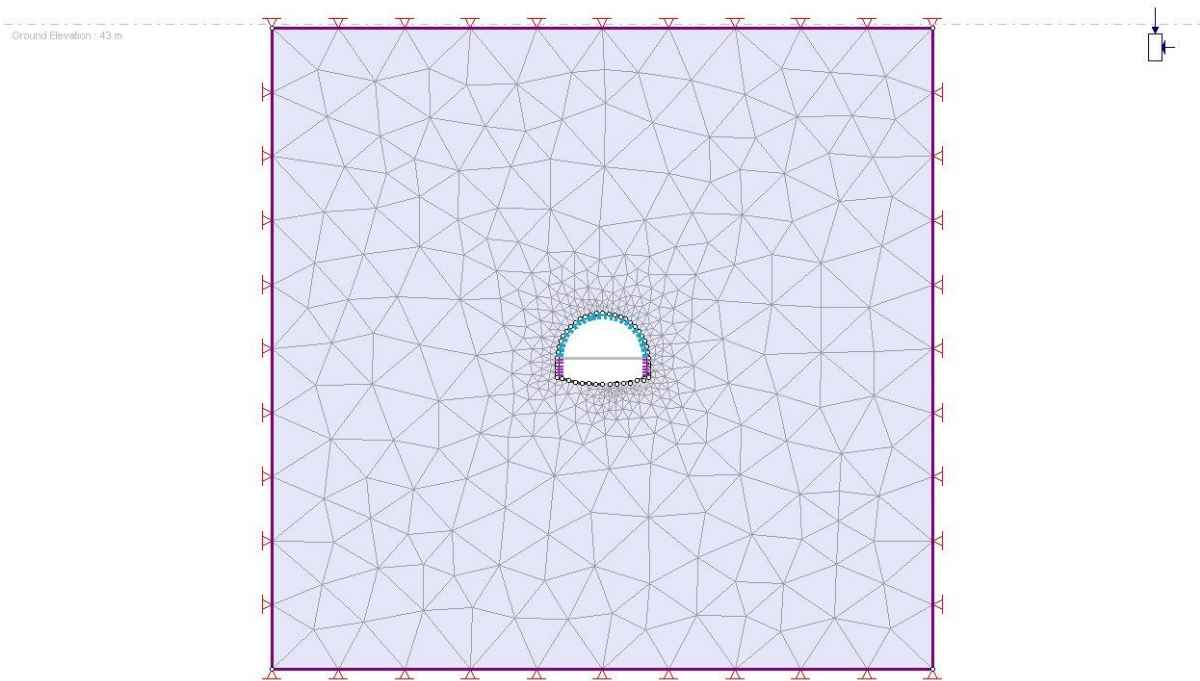


TRANSVERZALNE SILE

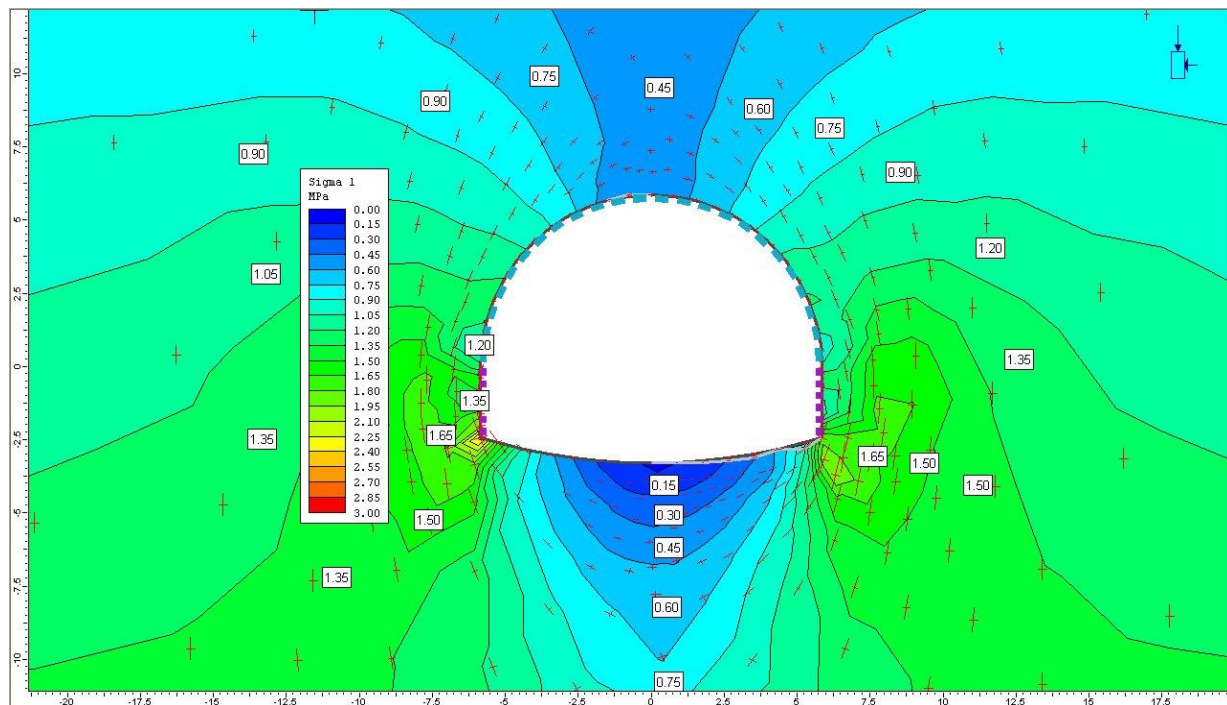
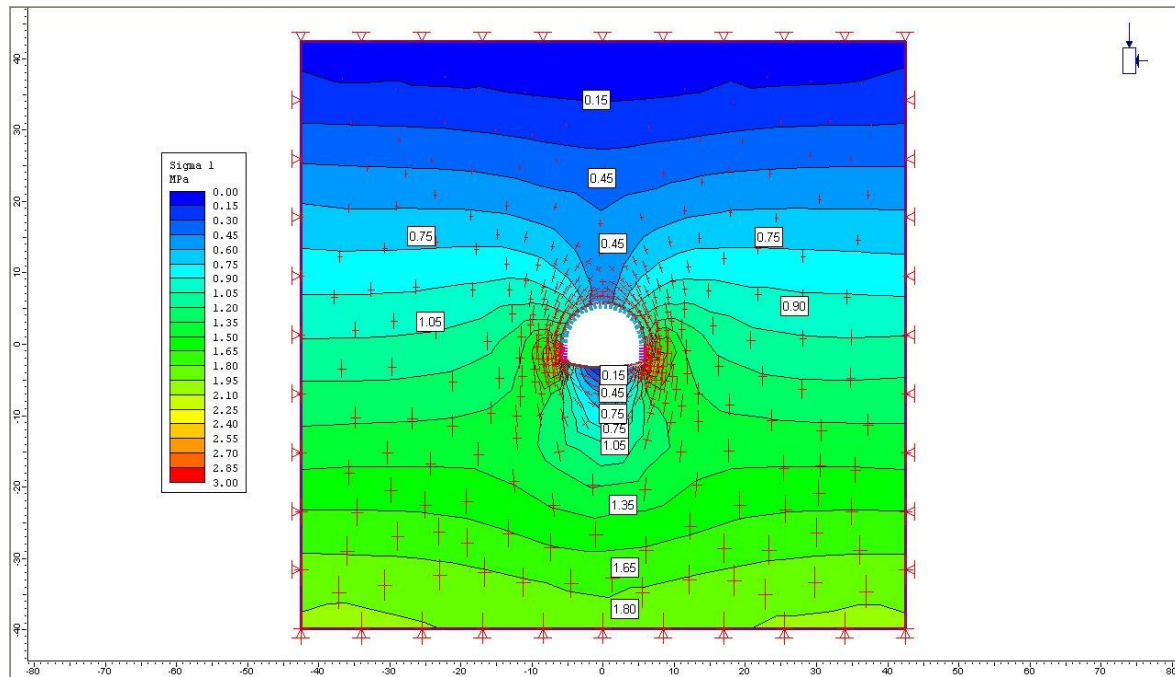


3.2. FAZA 2 – ISKOP 2.FAZE

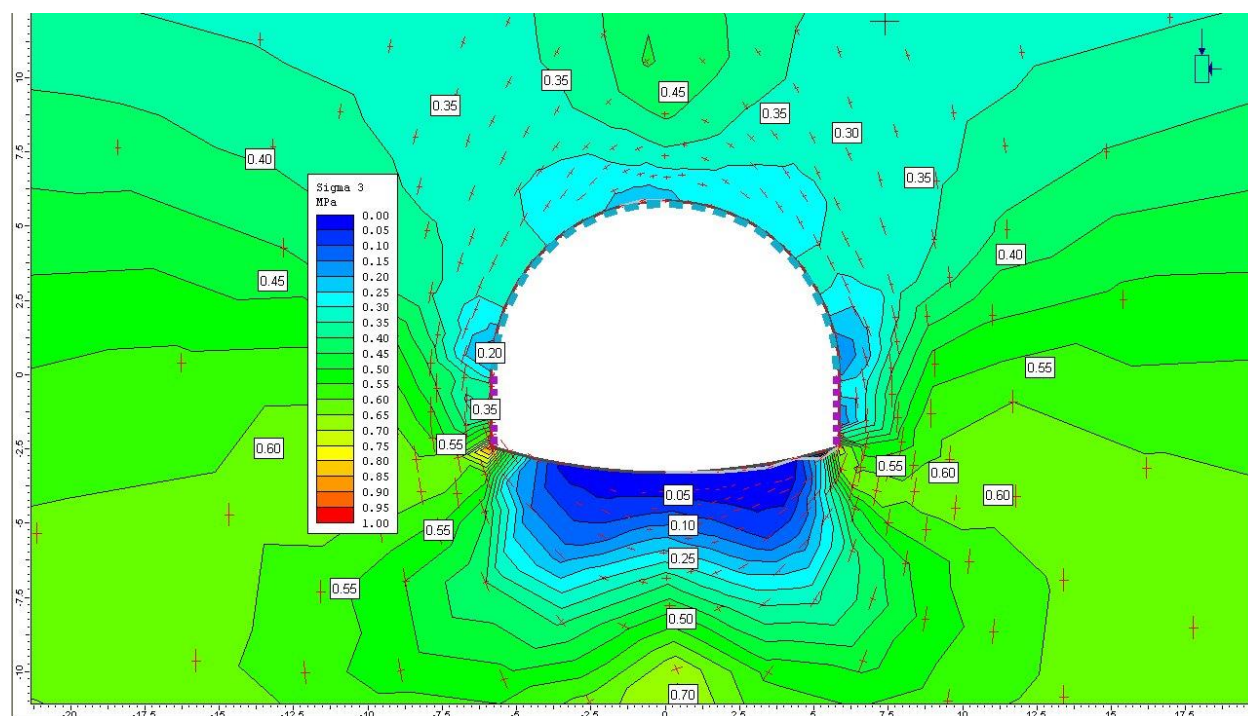
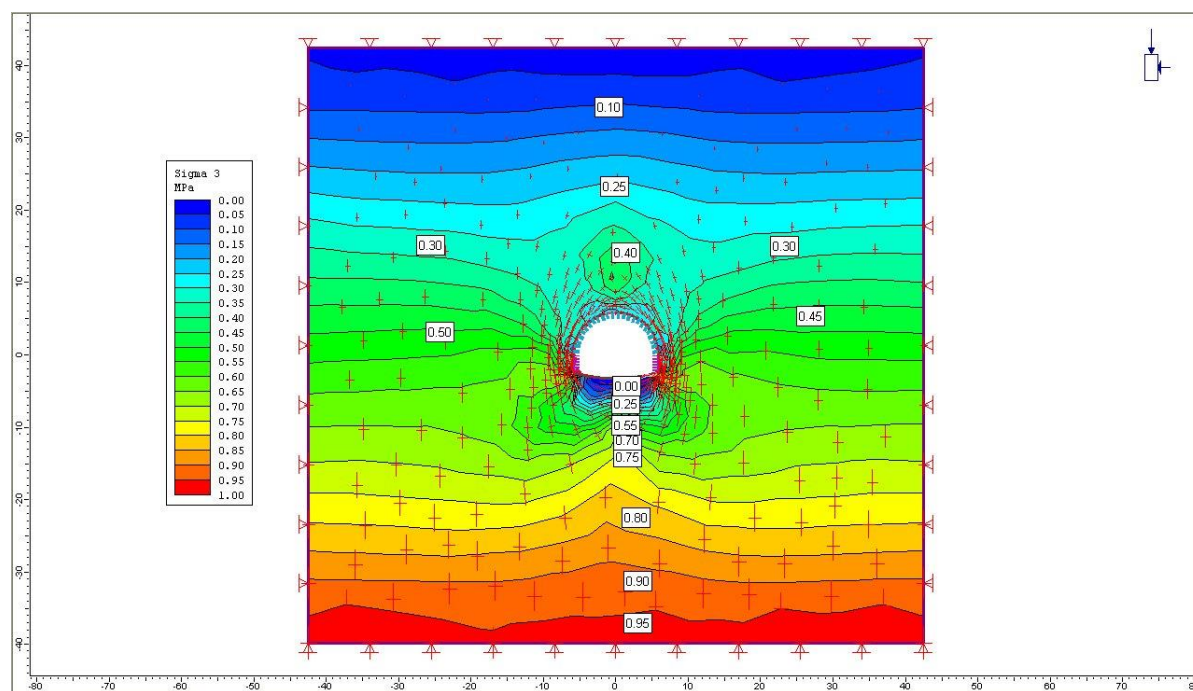
MODEL



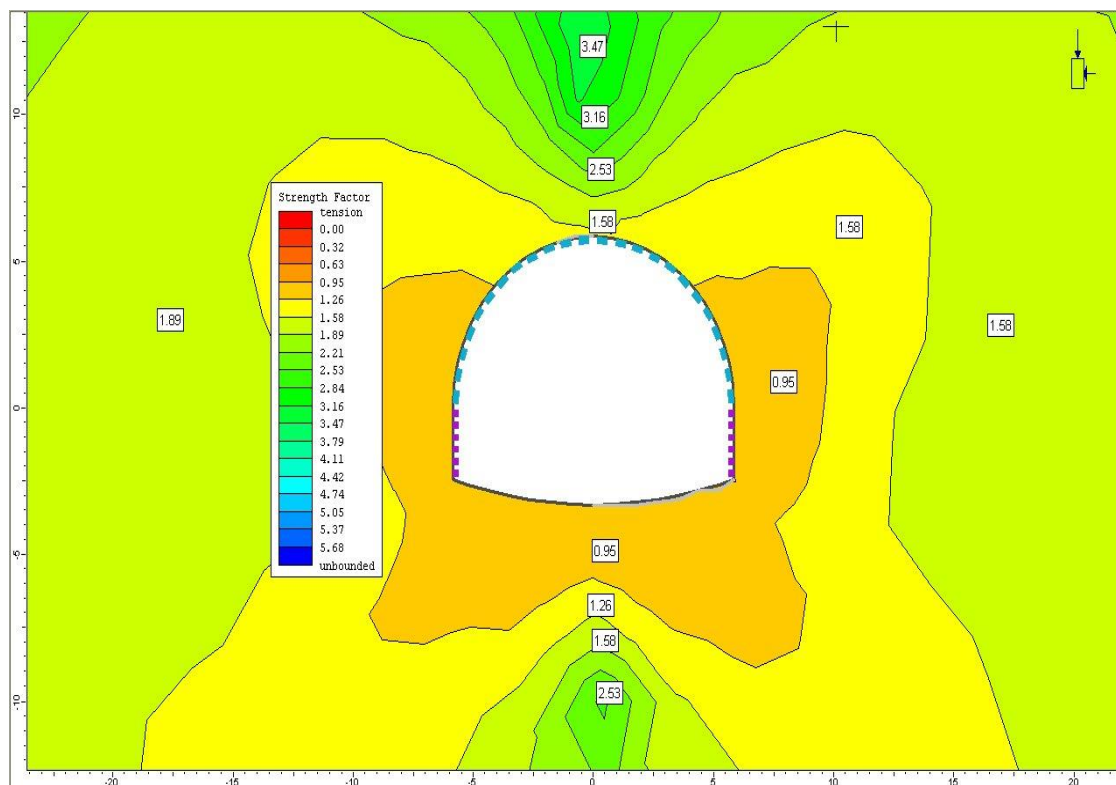
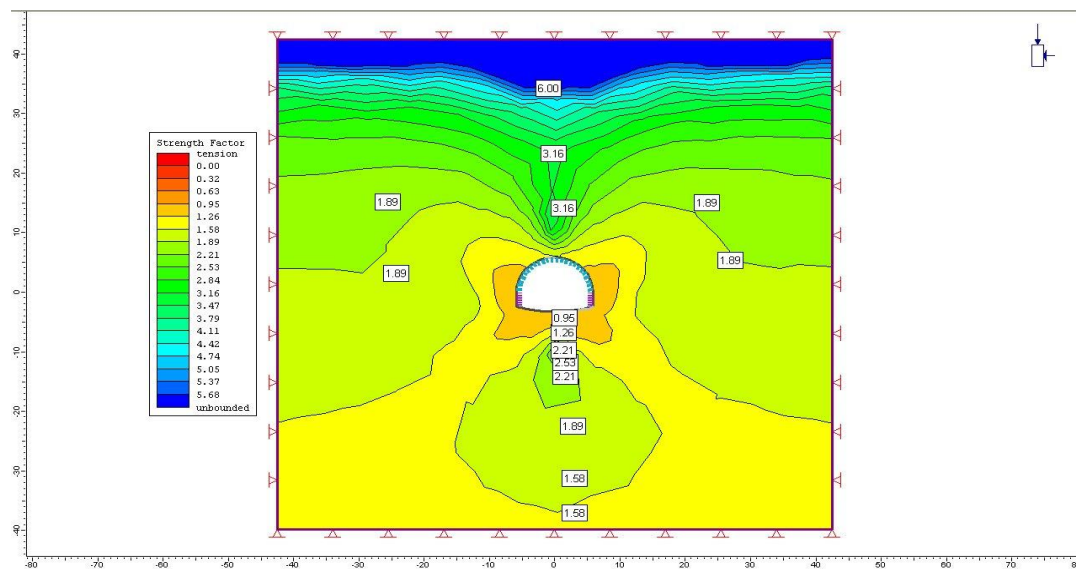
NAPONI SIGMA1



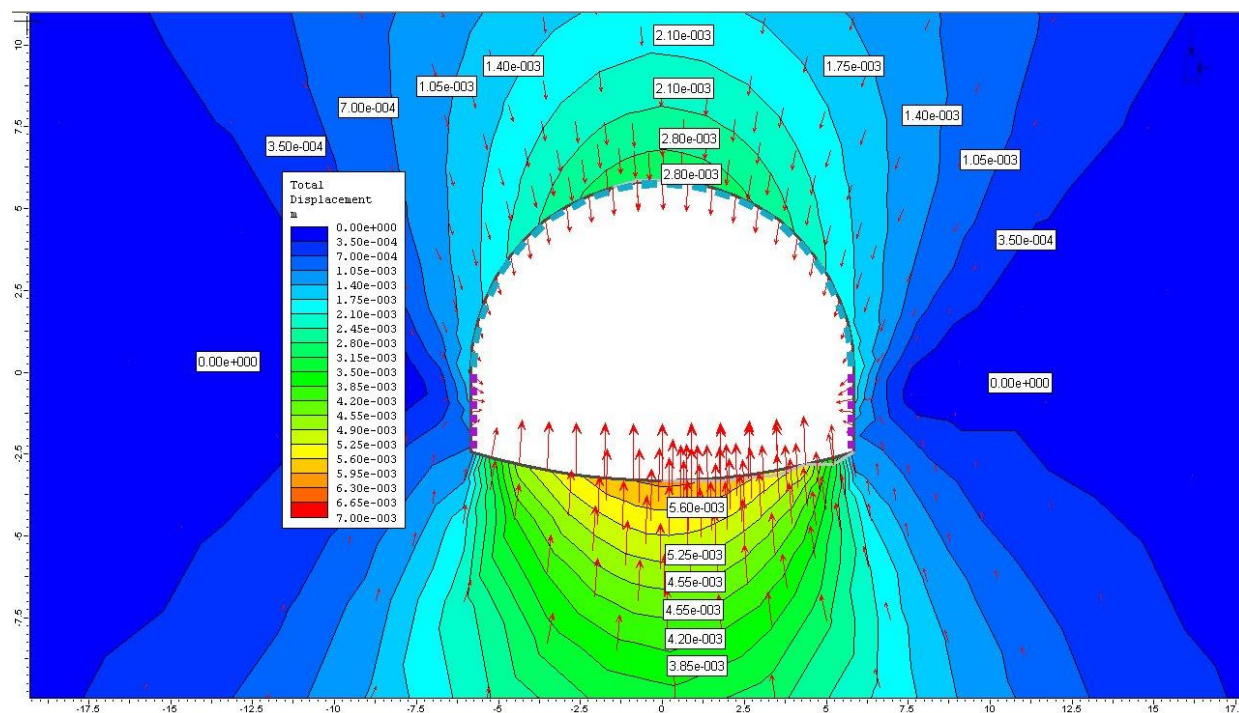
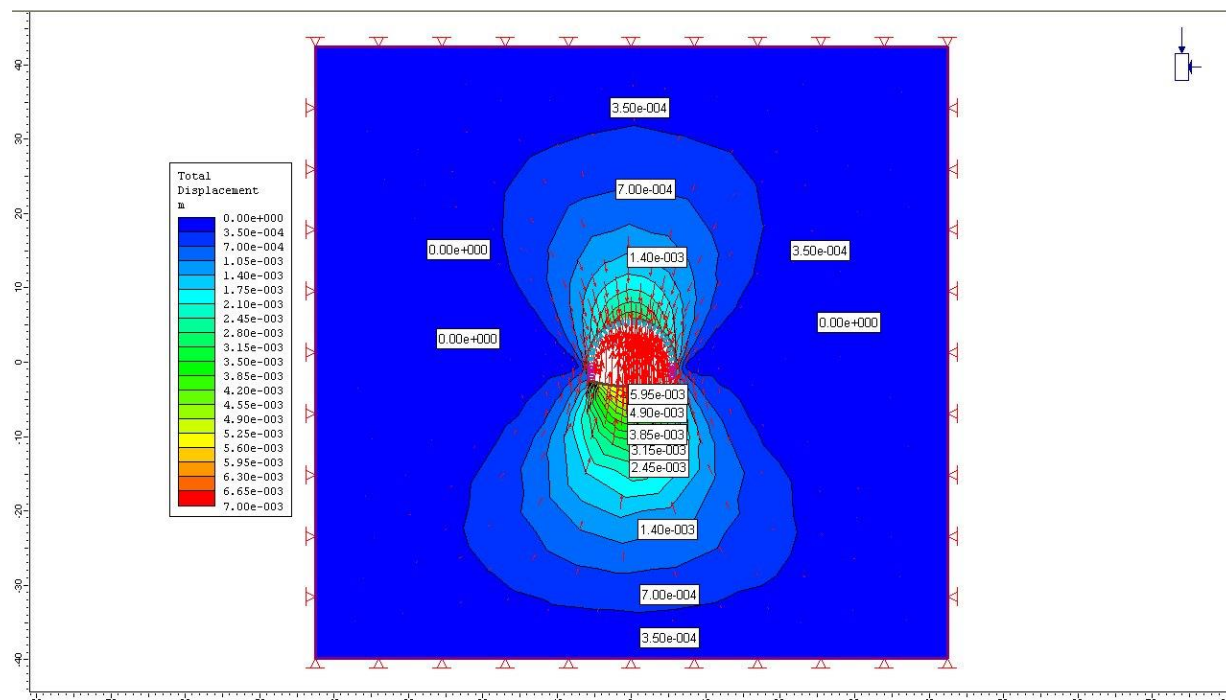
NAPONI SIGMA3



KOEFICIJENTI SIGURNOSTI



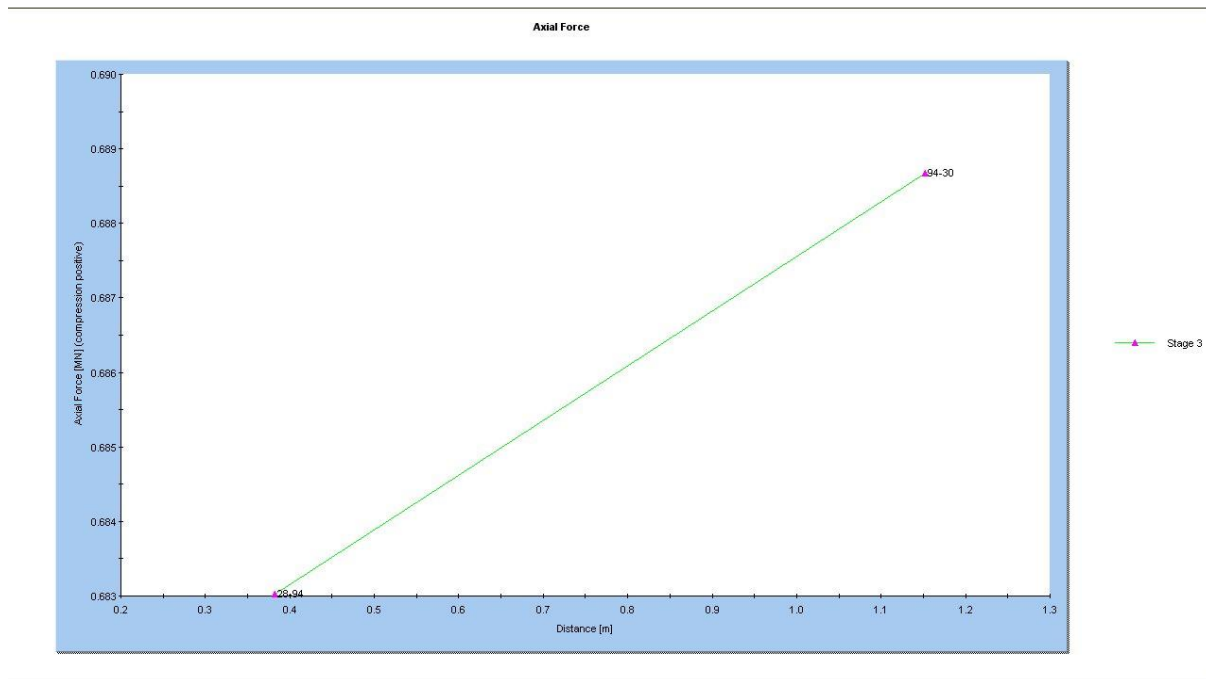
TOTALNA POMJERANJA



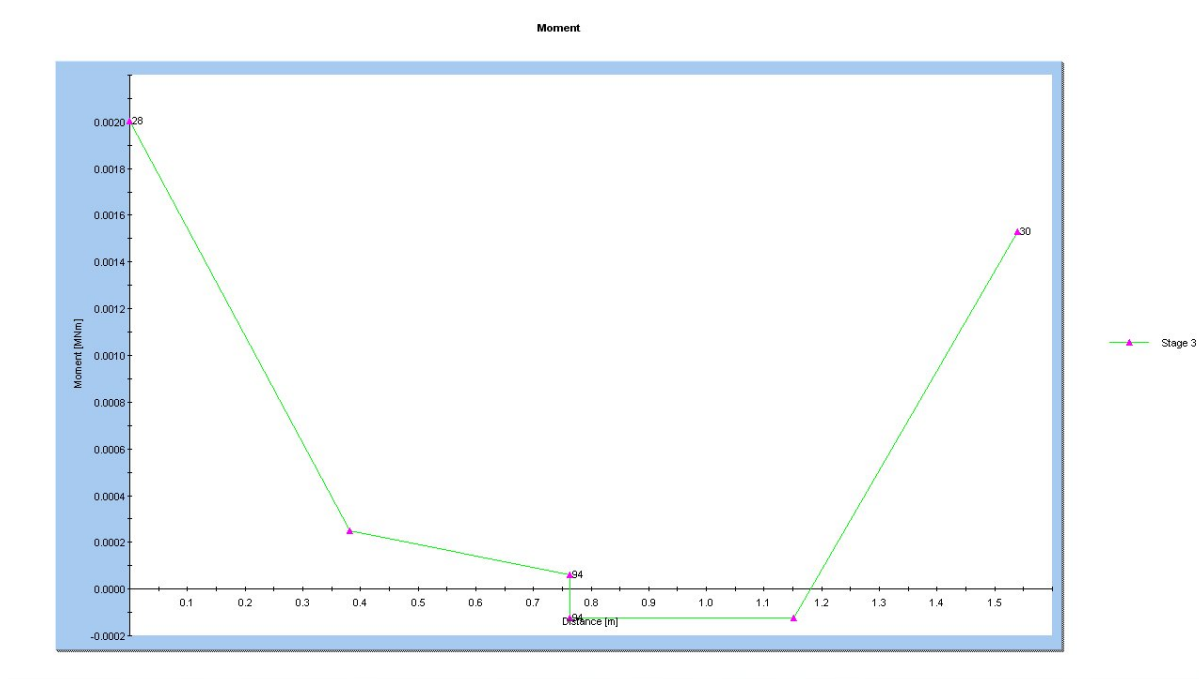
PRESJEČNE SILE U OBLOZI

2.FAZA ISKOPA

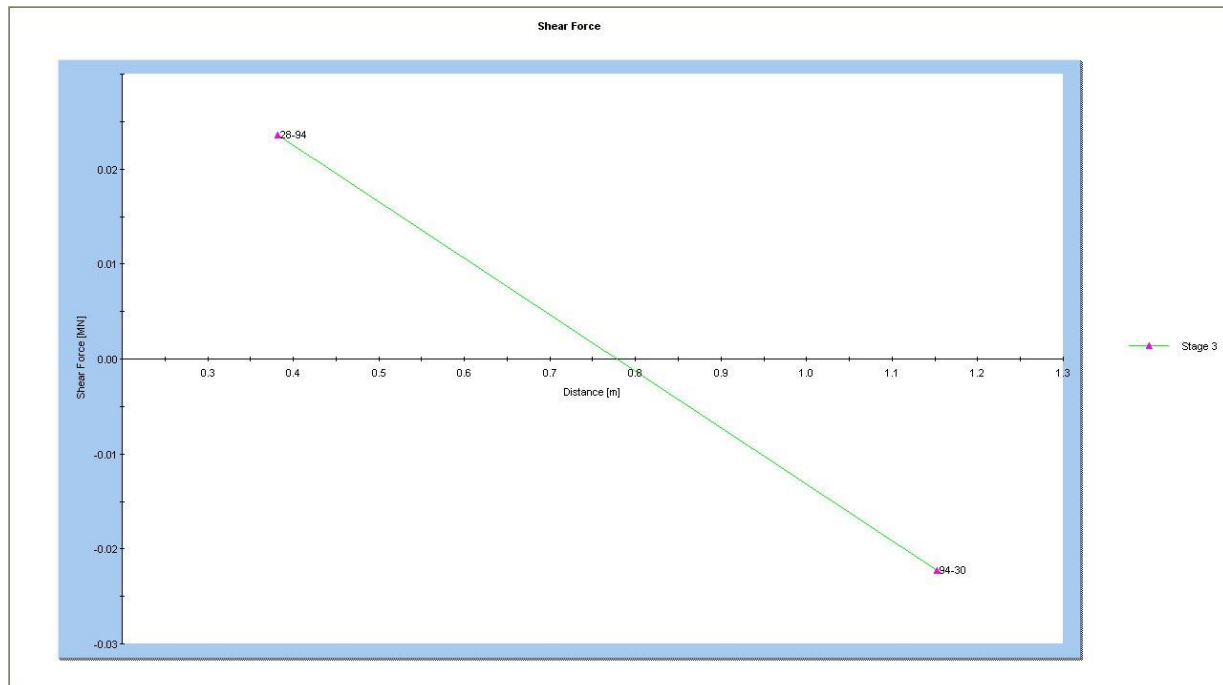
NORMALNE SILE



MOMENTI SAVIJANJA



TRANSVERZALNE SILE



6.2.1. DOPUNSKA ANALIZA

FORMIRANJE INPUT FAJLOVA

Input fajlovi su finalni fajlovi za doktorsku disertaciju odnosno fajl koji odgovara analiziranom tipu saobraćajnog tunela koji je očišćen od sidara i dati su isti podaci za oblogu kako za AB tako i za MAB:

- za oblogu bez vlakana

- vršni napon pri pritisku 30 Mpa
- rezidualni napon pri pritisku 5 Mpa
- vršni napon pri zatezanju 5 Mpa
- rezidualni napon pri zatezanju 1 Mpa

- za oblogu sa vlaknima

- vršni napon pri pritisku 38,7 Mpa
- rezidualni napon pri pritisku 6.5 Mpa
- vršni napon pri zatezanju 7.5 Mpa
- rezidualni napon pri zatezanju 1.5 Mpa

Debljina obloge se mijenja od 25cm preko 20cm do 15cm, u zavisnosti od karakteristike stijenske mase koja se javlja duž razmatrane dionice.

U predmetnoj disertaciji priloženi su dijagrami za U_{tot} (totalna pomjeranja) za dvije faze iskopa. Cilj ove dopunske analize je bio da se uporede pomjeranja za jedan i drugi slučaj, odnosno za armirani beton (AB) i mikroarmirani beton (MAB) po fazama iskopa kao i da se ukaže na veličinu pomjeranja za jedan i drugi slučaj. Ovome u prilog idu bolje mehaničke performanse

MAB a posebno izražena žilavost pa samim tim vlaknima ojačani prskani beton može duže da plastificira.

Input falovi za PHASE2V6 nose oznake:

Za AB:

B_modelA2_AB_15_PH2v6

B_modelA2_AB_20_PH2v6

B_modelA2_AB_25_PH2v6

I slično, za MAB:

B_modelA2_MAB_15_PH2v6

B_modelA2_MAB_20_PH2v6

B_modelA2_MAB_25_PH2v6

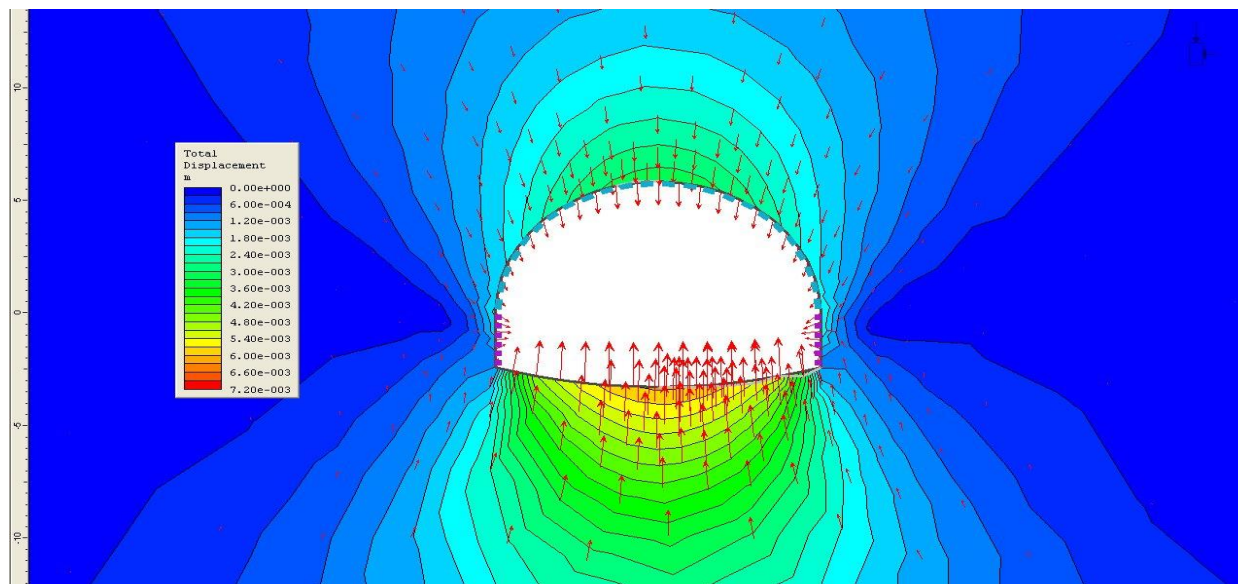
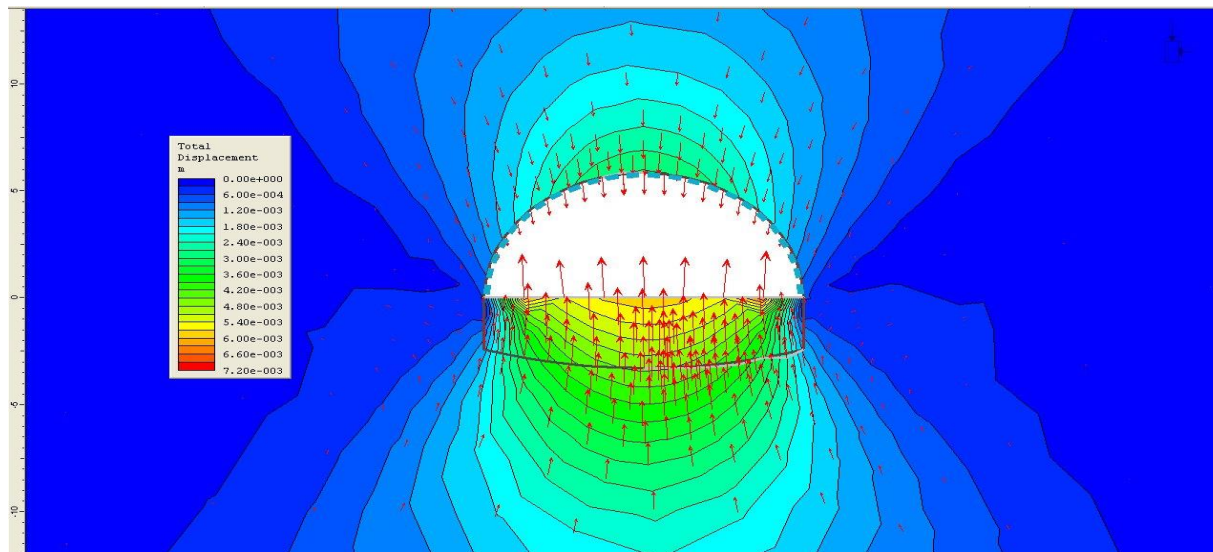
PODACI za maxUtot (maksimalna pomjeranja) za modele obrađene u PHASE2v6:

D	maxUtot	
	1.faza	2.faza
AB		
15	0.00661257	0.00607221
20	0.00661257	0.00605811
25	0.00667319	0.00604121
MAB		
15	0.00654235	0.00608391
20	0.00661257	0.00605811
25	0.00667319	0.00604121

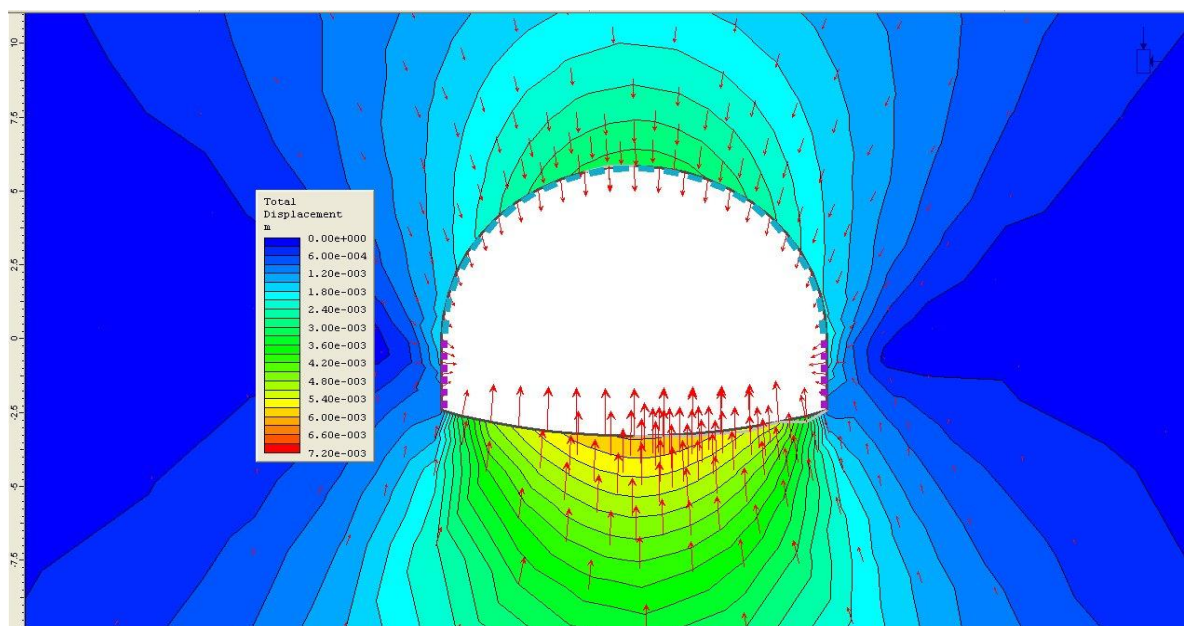
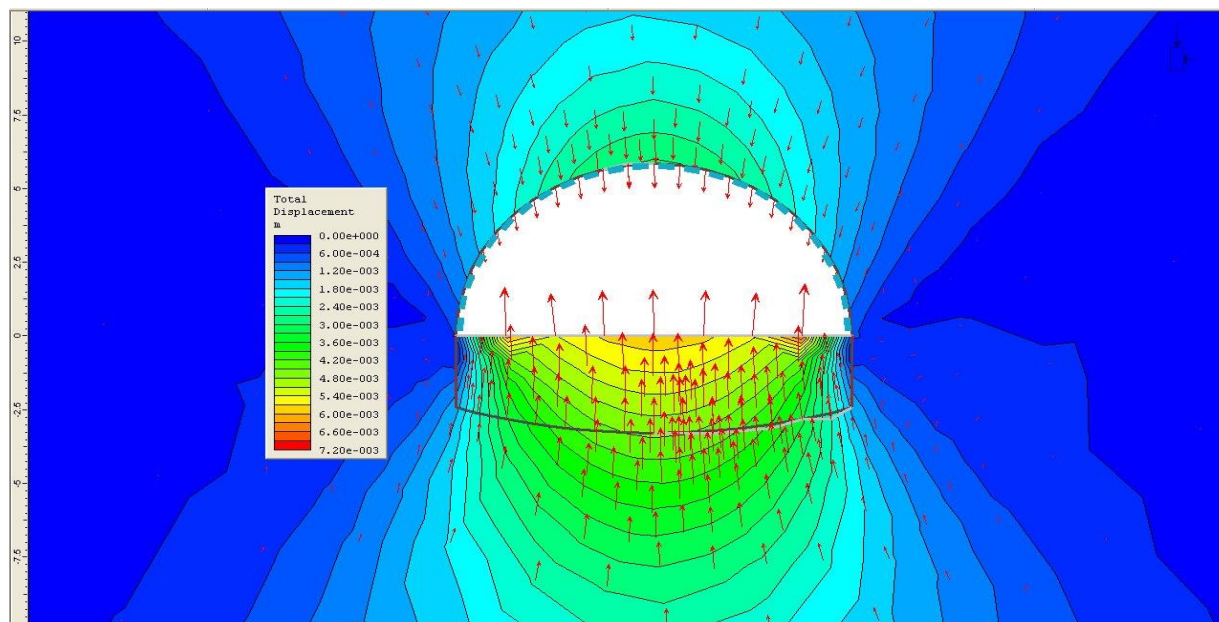
Na osnovu predstavljene analize i dopunske analize tunelske konstrukcije, može se sa sigurnošću zaključiti da su razlike između dvije poredene obloge u domenu računske greške. Nosivosti obloga su bliske a ušteda se ogleda u isključenju pozicije montažne armature.

PRILOZI za AB (ARMIRANI BETON)

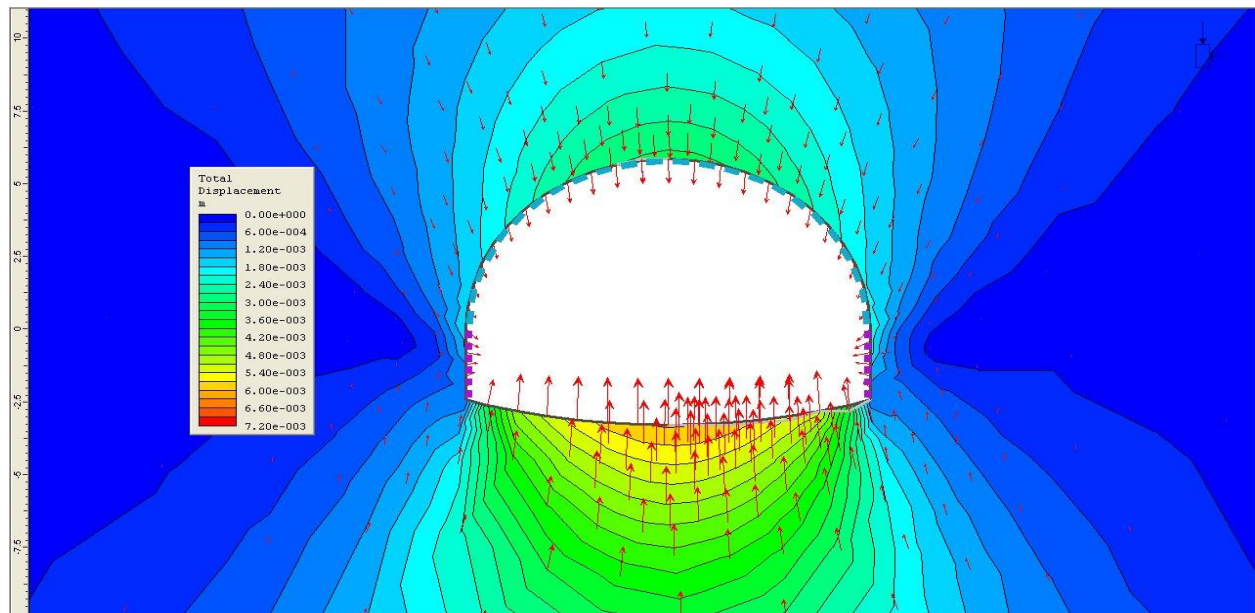
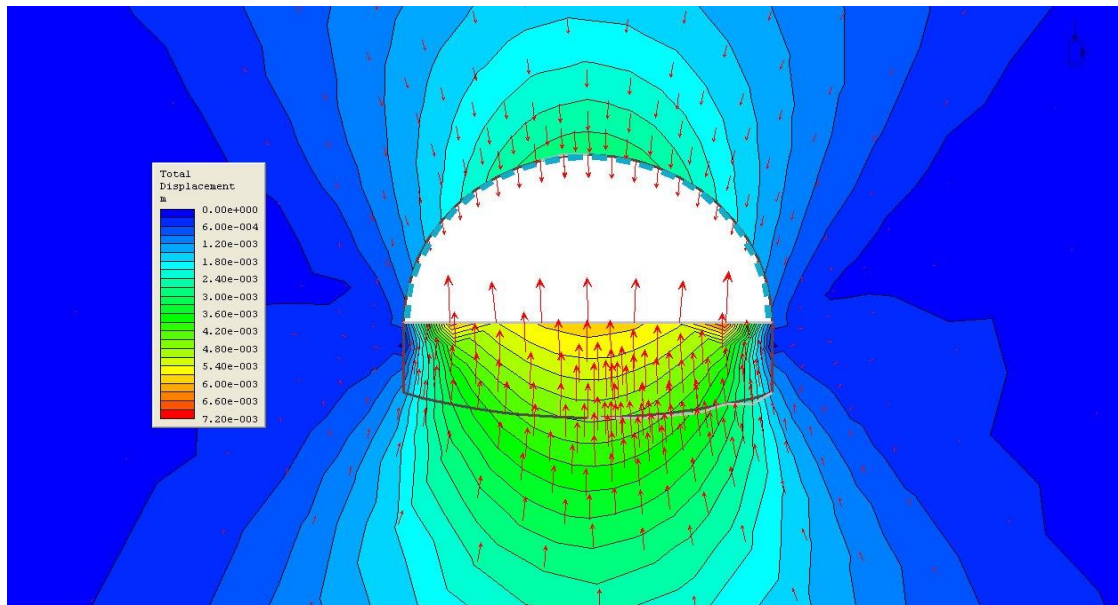
Model sa oblogom debljine 15 cm



Model sa oblogom debljine 20 cm

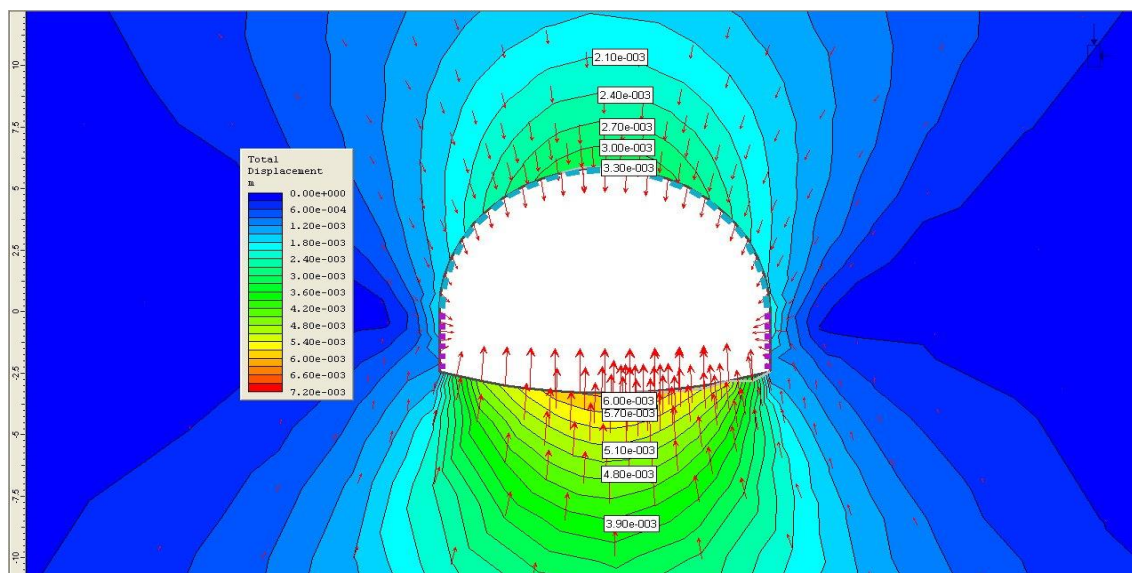
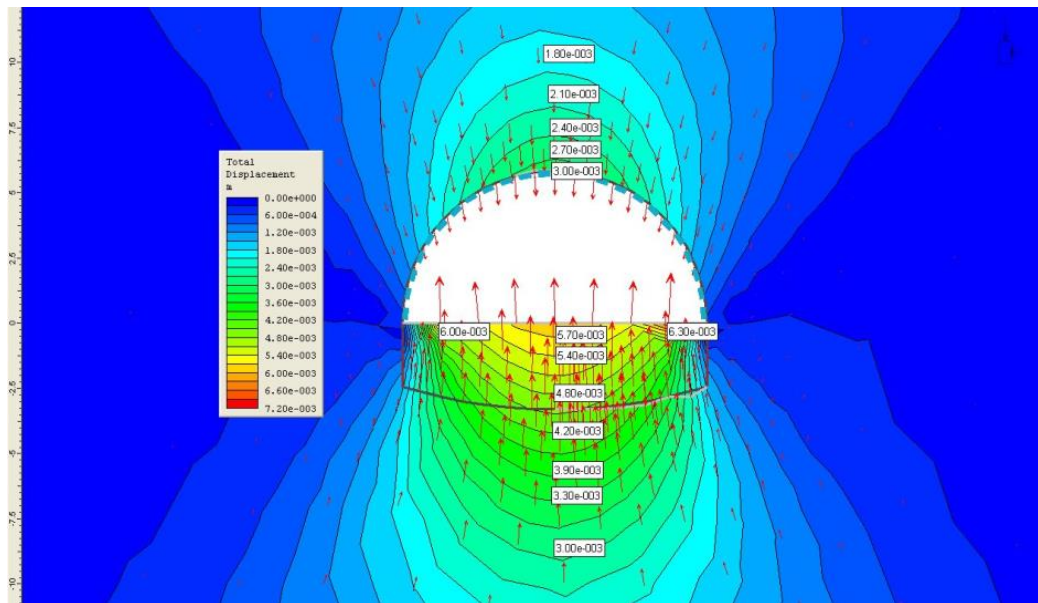


Model sa oblogom debljine 25 cm

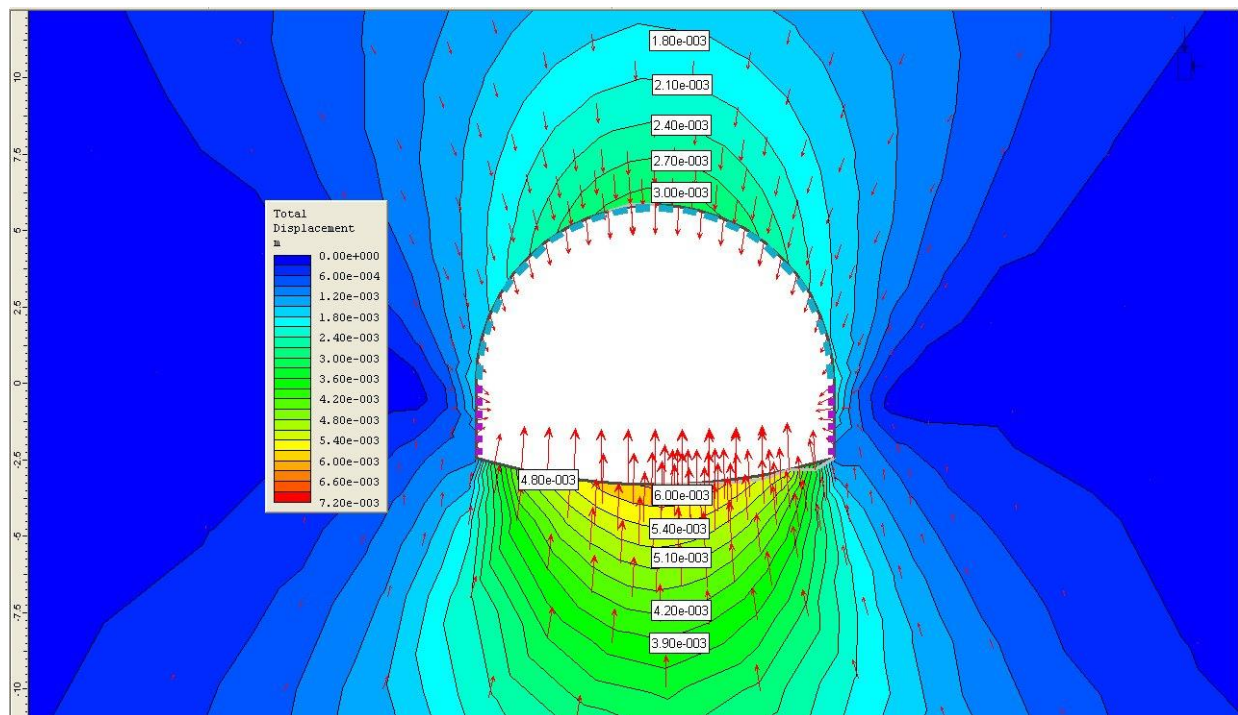
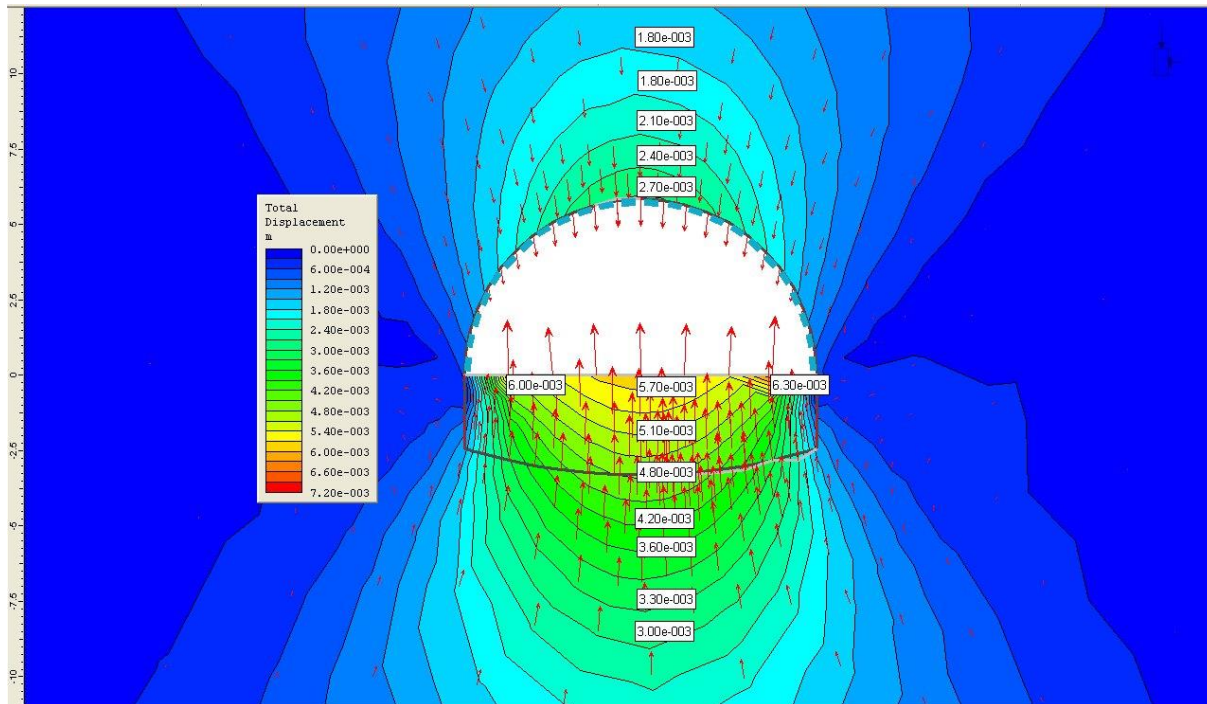


PRILOZI za MAB (MIKROARMIRANI BETON)

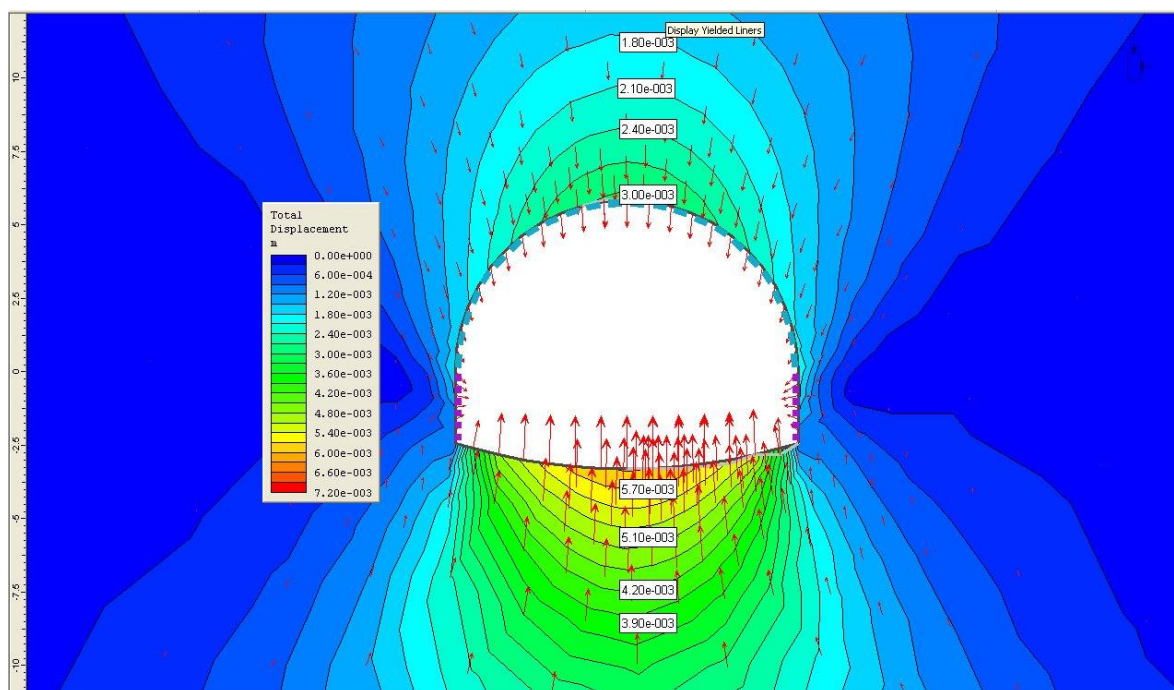
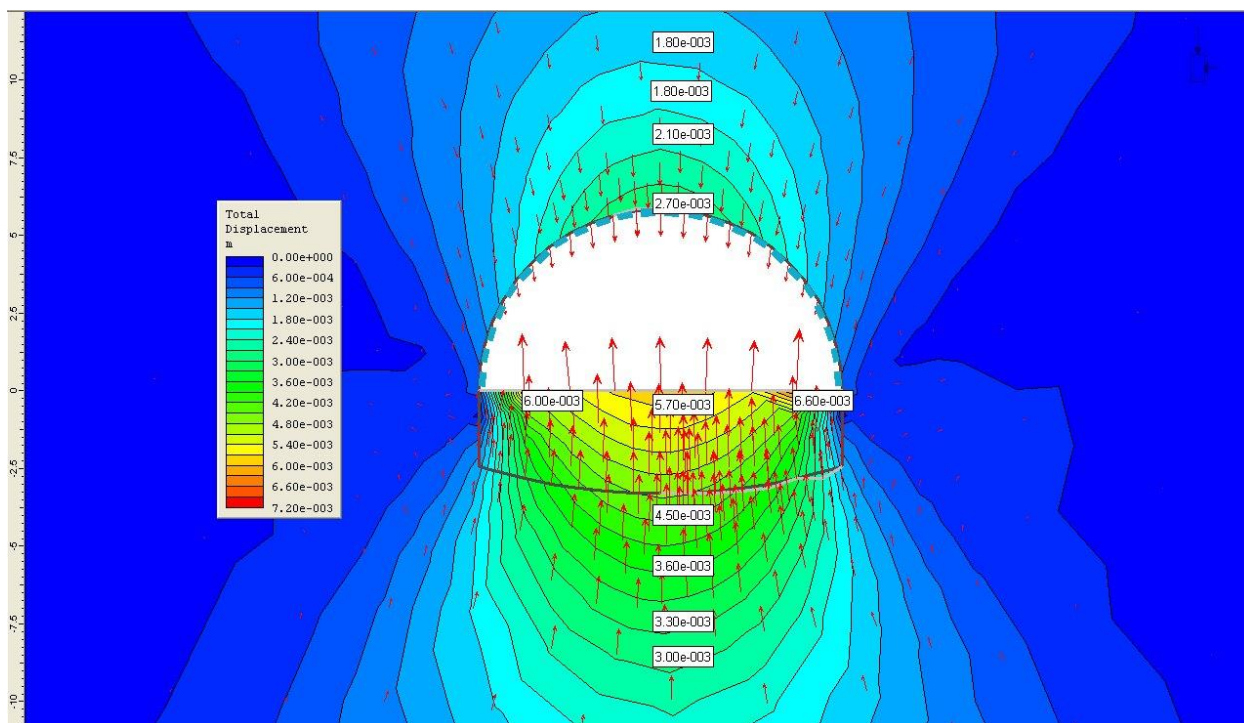
Model sa oblogom debljine 15 cm



Model sa oblogom debljine 20 cm



Model sa oblogom debljine 25 cm

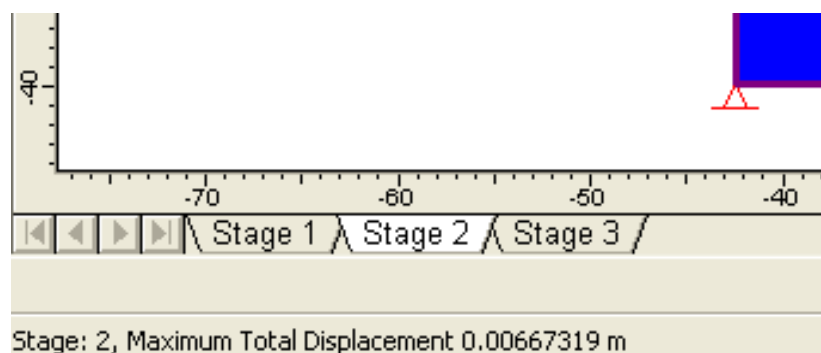


PREGLED VRIJEDNOSTI $maxU_{tot}$ (maksimalnih pomjeranja)

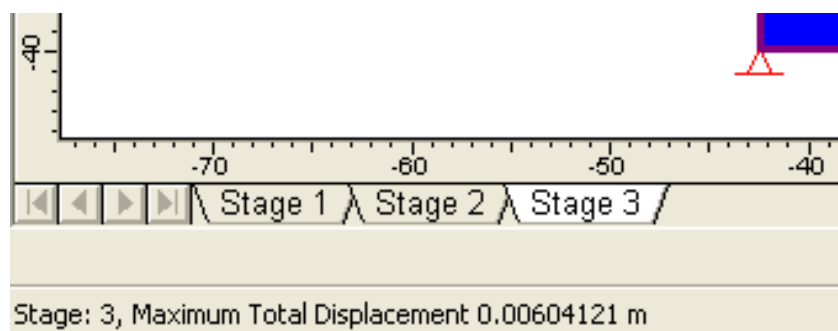
Prilikom obrade podataka u programskom paketu PHASE2V7 kada se prikazuju $maxU_{tot}$ na dnu ekrana javlja se podatak o maksimalnom pomjeranju za obrađivanu fazu iskopa.

Primjer: za slučaj debljine obloge od 25 cm dobija se:

Za 1.fazu iskopa:



Za 2.fazu iskopa:



Napominje se da je (Stage 1 nulta faza).

PODACI za maxUt_{tot} za modele obradjene sa PHASE2v6:

D(cm)	maxUt _{tot}	
	1.faza	2.faza
AB		
15cm	0.00661257	0.00607221
20cm	0.00661257	0.00605811
25cm	0.00667319	0.00604121
MAB		
15cm	0.00654235	0.00608391
20cm	0.00661257	0.00605811
25cm	0.00667319	0.00604121

PODACI za maxUt_{tot} za modele obradjene sa PHASE2v7:

AB		
25cm	0.00667319	0.00604081
MAB		
25cm	0.00667319	0.00604081

Na osnovu predstavljene analize i dopunske analize tunelske konstrukcije, može se sa sigurnošću zaključiti da su razlike između dvije poređene obloge u domenu računske greške. Nosivosti obloga su bliske a ušteda se ogleda u isključenju pozicije montažne armature, svakako u slučaju ekonomske opravdanosti upotrebe mikroarmirane tunelske obloge.

7. ZAKLJUČNA SAZNANJA I MOGUĆNOST DALJIH ISTRAŽIVANJA

Kao što je istaknuto u uvodnom dijelu doktorske disertacije kvalitet i trajnost betonskih, građevinskih objekata, izloženih različitim vrstama opterećenja u najvećoj mjeri zavise od fizičko-mehaničkih karakteristika betona koji je izložen takvim uticajima. Zahvaljujući sprovedenim istraživanjima oštećenja koja nastaju kontinuiranim uklanjanjem materijala na građevinskim konstrukcijama usljed dinamičkih udara ili kroz slabljenje athezije između betona i armature uspješno se mogu prevazići upotrebom čelične mikroarmature u masi betona. S tim u vezi zaključeno je da se pojava prve pukotine u betonu ili habanje betona odlaže za izvjestan vremenski period u zavisnosti od vrste i stepena opterećenja. Dakle, dodatak mikroarmature betonu u velikoj mjeri rješava pomenute nedostatke u betonskim konstrukcijama.

Kako je glavni cilj predmetne disertacije bilo istraživanje i analiza modeliranja mikroarmiranih betona sa poboljšanim fizičko-mehaničkim karakteristikama u poređenju sa etalonima i koji bi istovremeno imali veću otpornost na udarno - dinamičko opterećenje, sa sigurnošću se može reći da je predviđena receptura i učešće izabranih čeličnih vlakana u masi betona opravdalo postavljene pretpostavke na početku disertacije.

Pored glavnog cilja, modeliranja fizičko-mehaničkih karakteristika mikroarmiranog betona, izlažu se i ostali, veoma bitni sprovedeni ciljevi, predmetnog istraživanja:

- sprovođenje sopstvenih eksperimentalnih istraživanja klasičnog i mikroarmiranog betona
- parametarska analiza uticaja pojedinih fizičko- mehaničkih karakteristika na otpornost klasičnog betona i mikroarmiranog betona na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja i nakon njihove obrade
- poređenje rezultata proračuna tunelske konstrukcije od armiranog i mikroarmiranog betona pri čemu su u proračunu upotrijebljeni parametri koji su dobijeni eksperimentalnim putem
- formiranje konačnog zaključaka o relevantnim svojstvima ispitivanih mikroarmiranih kompozita i saopštavanje ocjene i mogućnosti njihove praktične primjene na osnovu sprovedene analize.

Dakle, postavljeni ciljevi doktorske disertacije su ostvareni tokom izrade i navođenjem konačnih rezultata sprovedenih istraživanja. Da bi navedeni ciljevi bili ostvareni, na početku istraživanja formulisane su odgovarajuće pretpostavke koje je bilo potrebno dokazati eksperimentalnim i drugim naučnim metodama tokom izrade iste. U daljem tekstu navode se dokazane pretpostavke, koje se sada, na kraju disertacije, saopštavaju kao zaključci sprovedenih istraživanja:

1. Fizičko-mehaničke karakteristike projektovane mikroarmirane mješavine su u funkciji izbora: agregata, cementa, vrste i količine čeličnih vlakana u masi betona
2. Ojačanje betona čeličnim vlaknima dovodi u manjoj ili većoj mjeri, do povećanja čvrstoća betona pri pritisku, savijanju, zatezanju u poređenju na etalonu (betonom bez čeličnih vlakana)
3. Ojačanje betona čeličnom mikroarmaturom doprinosi porastu žilavosti (duktilnosti) očvrslog betonskog kompozita, i vrijednosti modula elastičnosti takvog kompozita su u primjetnom porastu
4. Ojačanje betona čeličnom mikroarmaturom doprinosi porastu otpornosti na dinamičko-udarno opterećenje, odlaže pojavu prve pukotine i istovremeno odlaže progresivno širenje betonskih prslina
5. Ojačanje betona čeličnom mikroarmaturom sprečava pojavu ljušpanja i odlamanja dijelova ploča pri udarnom opterećenju
6. Upotreba mikroarmiranog betona sa čeličnim vlaknima, sa zakrivljenim krajevima, i faktorom oblika $L/D = 50/0,75$ u količini od 2% u masi betona daje izvanredne rezultate u proračunu tunelske konstrukcije. Pri tome se totalna pomjeranja mikroarmirane tunelske obloge poklapaju sa totalnim pomjeranjima tunelske obloge od armiranog betona. Ovim je prikazana mogućnost primjene mikroarmiranog betona u proračunu podzemnih objekata umjesto obloge od armiranog betona, sa jednom velikom napomenom da tehnologija izrade mikroarmiranog betona i homogenost betonske mješavine predstavljaju ključni faktor za dobre pokazatelje i svojstva ispitivanog mikroarmiranog kompozita.

Primjena mikroarmiranog betona višesturka, kako u podzemnim tako i u nadzemnim konstrukcijama:

- obloge (podgrade) tunela, metroa i ostalih podzemnih konstrukcija
- obloge nasipa, usjeka, zaštita temeljinih jama
- hidrotehničke konstrukcije (brane, prelive, vodotoci, akvadukti...)
- aerodorske piste i kolovozne konstrukcije
- industrijski podovi (zbog povećane otpornosti na habanje i dinamičko-udarno opterećenje)

Prikazani laboratorijski rezultati u sprovedenom istraživanju o mikroarmiranom betonu jednoznačno pokazuju da isti u poređenju sa klasičnim betonom posjeduje unaprijeđena fizičko-mehanička svojstva, pri čemu se posebno ističe njegova energetska sposobnost da zaustavi nastanak ili uspori progresivni razvoj prslina.

7.1 Mogućnost daljih istraživanja

Da bi se u potpunosti iskoristile prednosti mikroarmiranog betona, u poređenju sa klasičnim betonom, potrebno je razvijati metode za proračun nestandardnih (mikroarmiranih) betonskih konstrukcija. Osim toga najbolju raspodjelu mikroarmature u betonskim konstrukcijama ili dijelovima konstrukcija nije lako pronaći uzimajući u obzir konkretne strukture složene geometrije. S tim u vezi daju se preporuke za dalja istraživanja koja bi trebalo da obuhvate:

- Izradu jasno definisanih Standarda koji sadrže definicije standardizovanog materijala (mikroarmiranog betona) - klase i sredstva, kako bi se osiguralo njihovo poštivanje i izvršenje, analogno sadašnjoj praksi klasičnog betona
- Proučavanje redistribucije dinamičkog-udarnog opterećenja mikroarmiranih ploča, sa osnovnim postavkama primjenjene nove metode koje je opisana u radu uočena je pozitivna preraspodjela tog opterećenja. Ovu metodu bi dalje trebalo usavršavati variranjem niza drugih parametara kao što su: vrsta agregata, različite vrste i porijeklo mikroarmature u masi betona, kombinacije mikroarmature npr (čelična i propilenska vlakna)...
- Veoma važno dalje istraživanje, za praktičnu primjenu mikroarmiranih betona, u izradi betonskih konstrukcija složenih oblika i zahtjevnih opterećenja jeste nastavak razvijanja programskih paketa koji će biti zasnovani na jasnim teorijskim postavkama i uspostavljenim Standardima mikroarmiranog betona.

Literatura:

- /1/ ACI Committee 201.2R-08: Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute, June 2008
- /2/ Shah, S. P., "Fiber Reinforced Concretes," Handbook of Structural Concrete, edited by F. K. Kong, R. H. Evans, E. Cohen, and F. Roll, McGraw-Hill, U.K., 1983
- /3/ M. Uljarević, „Žilavost mikroarmiranog betona pri savijanju“, 2002
- /4/ D.D. Milašinović, "Geometric non-linear analysis of thin plate structures using the harmonic coupled finite strip method", Thin-Walled Structures, 49/2, pp. 280-290. 2011 doi:10.1016/j.tws.2010.11.005. ISSN: 0263-8231. Citati: ISI/Web of Science (2) Scopus (1)
- /5/ J. Šušteršič, Andrej Zajc, Iztok Leskovar (2003). Surface characteristics of fiber reinforced concrete. Industrieböden Band 1, Str. 255-261
- /6/ ACI Committee 210R-93(R2008): Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, American Concrete Institute, 1993 (Reapproved 2008)
- /7/ M. Uljarević, Beton Ojačan metalnim vlaknima, Monografija, 2013
- /8/ Ukraincyk V., Šušteršič J., Neka svojstva mikroarmiranog betona, Naše Građevinarstvo br. 45. 1991
- /9/ D.D. Milašinović, Rheological-dynamical analogy: prediction of buckling curves of columns, Int. J. Solids Struct. 37(29) (2000), 3965–4004.
- /10/ Höcker T.: Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 468, Beuth Verlag, 1996
- /11/ Shah, S. P., and Batson, G. B., Fiber Reinforced Concrete—Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987
- /12/ ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984
- /13/ M. Uljarević, B. Grujić, Ž. Grujić. Primjena mikroarmiranog prskanog betona u tunelogradnji, Zbornik radova građevinskog fakulteta u Subotici, 2015
- /14/ M. Uljarević J. Šušteršič, A. Zajc, „Tragfähigkeit einer Faser-Spritzbeton-Auskleidung für einen Kraftwerkstollen“, Zement und Beton, 1992
- /15/ Milašinović, D.D. (2004). Rheological-dynamical analogy: visco-elasto-plastic behavior of metallic bars. International Journal of Solids and Structures 41/16-17, pp. 4599-4634. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.02.061. ISSN: 0020-7683.
- /16/ Milašinović, Dragan D. (2007). Rheological-dynamical analogy: Prediction of damping parameters of hysteresis damper. International Journal of Solids and Structures 44/22-23, pp. 7143-7166. doi:10.1016/j.ijsolstr.2007.04.001. ISSN: 0020-7683.
- /17/ J. Šušteršič, Aljoša Šajna, Andrej Zajc (1999). Utjecaj mikroarmiranja na udarnu i statičku čvrstoću betona. Građevinar., str. 645-653
- /18/ J. Šušteršič, Andrej Zajc, Iztok Leskovar (2003). Surface characteristics of fiber reinforced concrete. Industrieböden Band 1, Str. 255-261
- /19/ J. Šušteršič; Andrej Zajc (2012). Concrete ductility as a parameter for designing of tunnel and mine roadway linings. Zbornik referatov, Str. 347-354

- /20/ D. Milašinović: Non-Linear Analysis of Plate and Folded Plate Structures by the Finite Strip Method, Engineering Computations, 1987, Vol. 4. pp.41-47.
- /21/ D. Milašinović, (2005). Rheological-dynamical Analogy: Frequency Dependence of the System Parameters of Internally Damped Bars. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures 1/2, pp. 143-170(28). DOI: 10.1163/15736110577453206. ISSN: 1573-6105.
- /22/ D. Milašinović, (2006). Rheological-Dynamical Theory of Visco-Elasto-Plasticity and Fatigue: Part 1 Multidiscipline Modeling in Materials and Structures 2/1, pp. 1-29(29). DOI: 10.1163/157361106775249970. ISSN: 1573-6105
- /23/ D. Milašinović, (2006). Rheological-Dynamical Theory of Visco-Elasto-Plasticity and Fatigue: Part 2. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures 2/2, pp. 127-166(40). DOI: 10.1163/157361106776240806. ISSN: 1573-6105
- /24/ B.Grujić, "Primjena specijalnih vrsta betona za izradu primarne obloge tunelske konstrukcije", Magistarski rad, 2012.
- /25/ B. Grujić, Rješenje tunelskih konstrukcije na auto-putu E66, Diplomski rad, 2006
- /26/ ACI Committet 544. 4R-88, Desing Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Septembar-Oktobar 1988
- /27/ Поповић Б. "Тунели", Београд 1987.
- /28/ Williamson G.R., "The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, Fiber Reinforced Concrete" , American Concrete Institute, Detroit 1974.
- /29/ M.Uljarević, „Mikroarmirani beton u tunelogradnji“, Savez građevinskih inženjera Srbije, Građevinski kalendar, 2015
- /30/ Henager C.H. "The Technology and Uses of Steel Fibrous Shotcrete": A State of the art Report, Battelle-Northwest, Richland, sep. 1987.
- /31/ Shah S.P. , Stroeve P. , Dalhuisen D. , Van Stekelen –Burg P., "Complete Stess-Strain Curves for Steel Fiber Rinfored Concrete in Uniaxial Tension and comosites", Rilem Simposium 1978.
- /32/ Sridharan R., Rajaguru K., Arumugam V."A Study on the Inflence of Fiber Reinforcement in Concrete" Puplic Works, Madras 1987
- /33/ Fanella D.A. , Naaman A. E. , "Stress-Strin Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", ACI Journal, Juli-August 1985.
- /34/ Patel J.K. , "Properties and Aplication of Steel, Polypropylene and Polyester Fibre Reinorcd Concrete" Madras 1987.
- /35/ Johnston C.D. , "Definition and Measurement of Fleksural Toughness Parameterss for Fiber Reinforced Concrete", Cement, Concrete and Aggregatess, 1982.
- /36/ E.Hoek, "Practical Rock Enginnering" – CH.5 – EXCAVATION AND SHOTCRETE SUPPORT. 1995. 1999.
- /37/ Ramakrishan V. "Constitutive Relations and Modelingfor Concrete Fibre Composites" a State of the Atr Report, Madras, 1987.
- /38/ Soroushian P. And Lee C.D. „A Physical Simulation of the Fiber Reinforced Concrete Behavior under Compression“, Proceedhigs of the ISFRC, Madras 1987.
- /39/ Scoot B.D. , Park R. And preistley M.J.N. „, Stress-Strain Rehavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates“, ACI Journal Januar-Februar 1982.
- /40/ Soroushian P. And Sim J., „Axial Behavior of R/C Element under Dynamic Loads“, ACI JOURNAL Novembar – Decembar 1986

- /41/ Soroushian P. And Lee C.D. „Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete“, ACI Materials Journal
- /42/ Soroushian P. And Lee C.D. „Distribution and Orientatiton of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete“ Proceedings of the ISFRC, Madras 1987
- /43/ Shah S.P. „Strenght Evaluation and Failure Mechanisms of Fiber Reinforced Concrete“, Proceedings of the ISFRC, Madras 1987.
- /44/ Ghalib M.A. „Moment capacity of Steel iber Reinforced Small Concrete Slabs, ACI Journal, Juli-August 1980.
- /45/ Swamy R.N. and Mahgat P.S. , „A Theory for the Flexural Strenght of Steel Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research 1985.
- /46/ Aveston J.Mercer R.A. Silwood J.M., „Fiber Reinforced Cements-Scientific Foundations Composites, Standards, Testing and Desing“, NPLCP, April 1984.
- /47/ Hannant D.J., „Fiber Cements and Fiber Concretes“, Wiley and Sons, Ltd., Chichester 1978.
- /48/ Sharma A.K., „Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams“, ACI Journal Juli-August 1986.
- /49/ Athel E.Allos, „Shear Transfer in Fiber Reinforced Concrete“, Madras 1987.
- /50/ A.R.Ržancin "Теорија пужења материјала", Грађевинска књига Београд, 1974.
- /51/ Kujundžić B. "Mehanika Stena" Građevinski priručnik, Tehnička knjiga 1974.
- /52/ Kujundžić B. , "Osnove Mehanike Stena I i II" Građevinski kalendar Beograd 1979.
- /53/ Miljanović T., "Osiguranje Iskopa Tunela u Mekim Sredinama", Nikšić 1988.
- /54/ Plamenac M. "Miniranje u Tunelima, Mehanika Stijena, temeljenje i podzemni radovi", Zagreb
- /55/ A. Hillerborg, M. Modeer, P. E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research 6(6) (1976), 773–781.
- /56/ Zollo R.F.: Fiber-reinforced concrete: an overview after 3 years of development, Cement and Concrete Composites 19, pp. 107 – 122, 1997
- /57/ Ramadevi V., Venkatesh Babu D.L.: Flexural behavior of hybrid (steel and polypropylene) fibre reinforced concrete beams, European Journal of Scientific Research, vol. 70 no. 1, pp. 81-87, 2012.
- /58/ Atis C.D., Karahan O.: Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete, Construction and Building Materials 23, pp. 392 – 399, 2009
- /59/ Malhotra V. M., Carino N.J.: Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press LLC, ASTM International, Chapter 8, 2004.
- /60/ Tasdemir M.A., Ilki A., Yerlikaya M.: Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, International Conference of Hydropower and Dams – HYDRO, 4–7 October, Kiris-Antalya, pp. 159–166, 2002
- /61/ Song P.S., Hwang S.: Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials 18, pp. 669–673, 2004
- /62/ Altun, F., Haktanir, T. and Ari, K. (2007) Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams.Const. Buil. Mat.21, 654–661.
- /63/ Barros, J. A. O. and Cruz, J. S. (2001) Fracture energy of steel fiber-reinforced concrete.Mech. Comp. Mat. Struc.8, 29–45.

- /64/ Johnston, C. D. and Skarendahl, A°. (1992) Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. *Mater. Struct.* 25, 191–200.
- /65/ Antonaci, P., Bocca, P. and Grazzini, A. (2006) In situ determination of toughness indices of fibre reinforced concrete. *Mater. Struct.* 39, 283–290.
- /66/ Naaman, A. E. Optimized Geometries of fiber reinforcements of cement, ceramic and polymeric based composites. US Patent No. 5,989,713, November 23, 1999.
- /67/ Naaman, A. E. (2003) Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Adv. Conc. Technol.* 1, 241–252.
- /68/ Banthia, N. and Armelin, H. S. (2002) A novel double anchored steel fiber for shotcrete. *Can. J. Civ. Eng.* 29, 58–63.
- /69/ Williamson, G. R. (1974) The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Fiber Reinforced Concrete SP-44, 195–207. 15. Gopalar
- /70/ Song, P. S. and Hwang, S. (2004) Mechanical properties of high strength steel fiber-reinforced concrete. *Const. Buil. Mater.* 18, 669–673.
- /71/ Sukontasukkul, P. (2004) Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.* 9, 35–41.
- /72/ Khaloo, A. R. and Afshari, M. (2005) Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cem. Con. Comp.* 27, 141–149.
- /73/ ASTM C 143/C 143M – 98. (1998) Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- /74/ El-Shakra, Z. M. and Gopalaratnam, V. S. (1993) Deflection measurements and toughness evaluations for FRC. *Cem. Conc. Res.* 23, 1455–1466.
- /75/ A. R. Khaloo and N. Kim, 1996. Mechanical Properties of Normal to High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Aggregates*. Vol. 18. No. 2. Pp. 92–97.
- /76/ British Standard Institution (BSI) (2009). Testing Hardened Concrete, Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. London, BS EN 12390.
- /77/ British Standard Institution (BSI) (2009). Testing Hardened Concrete, Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens. London, BS EN 12390.
- /78/ B. W. Xu and H. S. Shi, 2009. Correlations Among Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Construction and Building Material* 23. 3468–3474.
- /79/ D. V. Soulioti, Barkoula N. M., Paipetis A. and Matikas T. E., 2011. Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete. *An international journal for experimental mechanics*. e535–e541.
- /80/ Fatih A., Haktanir T and Ari K., 2005. Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams. *Construction and Building Materials*. 654–661.
- /81/ F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadia and R. N. Swamy, 2008. Stress-Strain Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 255–263.
- /82/ I. S. Ibrahim and M. B. Che Bakar, 2011. Shear Capacity of Composite Slab Reinforced with Steel Fibre Concrete Topping. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 23(1). 1–23.

- /83/ J. Thomas, 2007. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 385-392.
- /84/ JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete. JCI-SF.
- /85/ J. A. O. Barros, Cunha V. M. C. F., Ribeiro A.F. and Antunes J. A. B., 2005. Post-Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. Materials and Structures. 47-56.
- /86/ J. Gao, W. Sun and K. Morino, 1997. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced, High Strength, Lightweight Concrete. Cement and Concrete Composites 19. 307-313.
- /87/ J. Thomas and A. Ramaswamy, 2007. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 385-392.
- /88/ K. Holschemacher, Mueller T. and Ribakov Y., 2010. Effects of Steel Fibres on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. Materials and Design. 2604-2615
- /89/ M. Ramli and E. T. Dawood, 2010. Performance of High Strength Flowing Concrete Containing Steel Fibre. Malaysian Construction Research Jurnal. Vol. 6. No. 1. 29-38.
- /90/ Hu X.G., Momber A.W., Yin Y.: Erosive wear of hydraulic concrete with low steel fiber content, Journal of Hydraulic Engineering 12, pp. 1331–1340, 2006
- /91/ Song P.S., Hwang S., Sheu B.C.: Strength properties of nylon-and polypropylene fiber-reinforced concretes, Cement and Concrete Research 35, pp. 1546–1550, 2005
- /92/ Higgins P., Kurtovich M.: Repairing critical assets using high performance calcium aluminate cements, M-NZ Concrete Society Conference, Wairakei, pp. 23–28, 2003
- /93/ Tasdemir M.A., Ilki A., Yerlikaya M.: Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, International Conference of Hydropower and Dams – HYDRO, 4–7 October, Kiriş-Antalya, pp. 159–166, 2002
- /94/ ACI Committet 544. 4R-88, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Septembar-Oktobar 1988
- /95/ Heraković D. „Savremene tendencije u projektovanju i građenju tunela“, građevinski kalendar 1987.
- /96/ Popović B. „Tuneli“, Beograd 1987.
- /97/ Sandell N.O., Westerdahl B. and Dir M., „System BESAB for high Strength Steel Fiber Reinforced Shotcrete“ Stockholm 1985.
- /98/ Williamson G.R., „The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, Fiber Reinforced Concrete“, American Concrete Institute, Detroit 1974.
- /99/ Henager C.H. „The Technology and Uses of Steel Fibrous Shotcrete“: A State of the art Report, Battelle-Northwest, Richland, sep. 1987.
- /100/ Shah S.P. , Stroeven P. , Dalhuisen D. , Van Stekelen –Burg P., „Complete Stress-Strain Curves for Steel Fiber Reinforced Concrete in Uniaxial Tension and composites“, Rilem Symposium 1978.
- /101/ Sridharan R., Rajaguru K., Arumugam V. , „A Study on the Influence of Fiber Reinforcement in Concrete“ Public Works, Madras 1987
- /102/ Fanella D.A. , Naaman A. E. , „Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression“, ACI Journal, Juli-August 1985.
- /103/ Patel J.K. , „properties and Application of Steel, Polypropylene and Polyester Fibre Reinforced Concrete“ Madras 1987.

- /104/ Swamy R.N. , „Deformation and Ultimate Strenght in Flexsure of Reinforced Concrete Beams made Steel Fiber Concrete“ ACI Journal, Proceeding, sep-oct. 1981.
- 105/ Batson G., „ Use of Steel Fiber for Shear Reiforcement ah Ductility“, Swedish cement and Concrete, 1985.
- /106/ Johnston C.D., „Definition and Measurement of Fleksural Toughness Parametersss for Fiber Reinforced Concrete“, Cement, Concrete and Aggregatess, 1982.
- /107/ Johnston C.D. and Colin D. , „Steel Fiber Reinforced and Plain Concete: Factors Influencing Flexsural Strenght Meusurement“, ACI Journal, 1982.
- /108/ Naamah A.E. and Shah S.P. , „ Pull-Out Mechanish in Steel Fiber Reinforced Concrete „ , Journal of the Structural Division, August 1976.
- /109/ Soroushian P. And Lee C.D. „A Physical Simulation of the Fiber Reinforced Concrete Behavior under Compression“, Proceedhigs of the ISFRC, Madras 1987.
- /110/ Scoot B.D. , Park R. And preistley M.J.N. , „Stress-Strain Rehavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates“, ACI Journal Januar-Februar 1982.
- /111/ Soroushian P. And Sim J. , „Axial Behavior of R/C Element under Dynamic Loads“ , ACI JOURNAL Novembar – Decembar 1986
- /112/ Soroushian P. And Lee C.D. „ Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete“, ACI Materials Journal
- /113/ Soroushian P. And Lee C.D. „Distribution and Orientatiton of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete“ Proceedings of the ISFRC, Madras 1987
- /114/ Shah S.P. „Strenght Evaluation and Failure Mechanisms of Fiber Reinforced Concrete“, Proceedings of the ISFRC, Madras 1987.
- /115/ Ghalib M.A. „Moment capacity of Steel iber Reinforced Small Concrete Slabs, ACI Journal, Juli-August 1980.
- /116/ Swamy R.N. and Mahgat P.S. „A Theory for the Flexural Strenght of Steel Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research 1985.
- /117/ Aveston J.Mercer R.A. Silwood J.M., „Fiber Reinforced Cements-Scientific Foundations Composites, Standards, Testing and Desing“ , NPLCP, April 1984.
- /118/ Hannant D.J., „Fiber Cements and Fiber Concretes“, Wiley and Sons, Ltd., Chichester 1978.
- /119/ British Standard Institution (BSI) (2009). Testing Hardened Concrete, Part 3:Compressive Strength of Test Specimens. London, BS EN 12390
- /120/ B. W. Xu and H. S. Shi, 2009. Correlations Among Mechanical Properties of Stel Fiber Reinforced Concrete. Construction and Building Material 23.3468-3474.
- /121/J. Thomas, 2007. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 385-392
- /122/ J. A. O. Barros, Cunha V. M. C. F., Ribeiro A.F. and Antunes J. A. B., 2005. Post-Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. Materials and Structures. 47-56.
- /123/ K. Holschemacher, Mueller T. and Ribakov Y., 2010. Effects of Steel Fibres on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. Materials and Design.2604-2615
- /124/ Rilem TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, 2002. Materials and Structures.Vol. 35. pp262-278.

- /125/ Dongarra, J.J., Duff, I.S., Sorensen, D.C. and van der Vorst, H.A. (1998) Numerical Linear Algebra for High Performance Computers, SIAM, Philadelphia, PA.
- /126/ Heath, M., Ng, E. and Peyton, B. (1991) Parallel algorithms for sparse linear systems. SIAM Rev., 33, 420–60. Saad, Y. (1996) Iterative Methods for Sparse Linear Systems, PWS Publishing Company, Boston MA.
- Problem
- /127/ Practical Rock Engineering – CH.5 – EXCAVATION AND SHOTCRETE SUPPORT
/E. Hoek/ 1999
- /128/ Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats *2002
(ACI 336.2R-88)
- /129/ Specification for Cast – in – Place Concrete Pipe (ACI 346-09)
- /130/ Guide Test Methods for Fiber – Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or
Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04)
- /131/ Finite Element Analysis of Fracture in Concrete Structures (ACI 446.3R-97)
- /132/ Report on Dynamic Fracture of Concrete (ACI 446.4R-04)
- /133/ Specification for Types ES (Epoxy Slurry) Polymer Overlay for Bridge and Parking Garage
Decks (ACI 548.9-08)

O AUTORU

Diplomirala je na Arhitektonsko – građevinskom fakultetu u Banjoj Luci 2006., odsjek građevinski, iz predmeta Zemljani radovi i tuneli ocjenom (deset) 10,00 - oblast geotehničke konstrukcije. Postdiplomske studije je upisala 2008. odsjek građevinski, smjer građevinske konstrukcije. Uspješno je položila sve ispite na postdiplomskom studiju predviđene Planom i programom prosječnom ocjenom deset (10,00) i odbranila magistarsku tezu 2012.god. pod naslovom: „Primjena specijalnih vrsta betona u izradi primarne podgrade tunelske konstrukcije“. Time je stekla diplomu magistra tehničkih nauka iz oblasti građevinarstva. Krajem 2014. god. prijavila je temu za izradu doktorske disertacije: "Modeliranje fizičko-mehaničkih svojstava betona ojačanog vlaknima sa primjenom u konstrukcijama".

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ

ФАКУЛТЕТ: Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет

Одсјек грађевински



Број: 1429
Датум: 13.12.2016.

ИЗВЈЕШТАЈ

о оцјени урађене докторске дисертације

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци, Наставно-научно вијеће Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањој Луци, на 36. сједници, одржаној дана 29.09.2016. године, донијело је одлуку (број одлуке: 14/3.1029/16), о именовању Комисије за оцјену и одбрану урађене докторске тезе кандидата мр Бојане Грујић, дипл.инж.грађ., под насловом „Моделирање физичко-механичких својстава бетона ојачаног влакнима са примјеном у конструкцијама“, у следећем саставу:

1. Проф. др Драган Милашиновић, дипл. инж. грађ., редовни професор, ужа научна област Техничке механике у грађевинарству;
Универзитет у Новом Саду - Грађевински факултет у Суботици

предсједник и члан комисије
2. Проф. др Јакоб Шуштершич, дипл.инж. грађ., редовни професор, ужа научна област Грађевинске конструкције;
Institute for Research in materials and Applications, Ljubljana, Slovenija

члан комисије
3. Проф. др Мато Уљаревић, дипл.инж.грађ., ванредни професор, ужа научна област Геотехника;
Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет

ментор и члан комисије

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Основни биографски подаци:

Име, средње име и презиме: мр Бојана (Милош) Грујић, дипл.инж.грађ.
Датум рођења: 13.05.1980. године
Мјесто рођења: Соколац, Босна и Херцеговина
Адреса: Степе Степановића 177/1

78000 Бања Лука
Република Српска
Босна и Херцеговина
E-mail: bgrujic@agfbl.org
Научна област: Геотехника и грађевинске конструкције
Научно поље: Грађевинарство
Ужа научна област: Геотехника

Образовање:

Магистар техничких наука из области грађевинарства (смјер Грађевинске конструкције)

Магистарска теза: „Примјена специјалних врста бетона за израду примарне подграде тунелске конструкције“

Година магистрирања 2012.

Просјечна оцјена на постдипломским студијама: 10,00 (десет).

Година пријаве докторске дисертације и назив студијског програма: септембар, 2014.год, Грађевински одсјек

III УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат, мр Бојана Грујић, дипл. инж. грађ., написала је докторску дисертацију под насловом „Моделирање физичко-механичких својстава бетона ојачаних влакнима са примјеном у конструкцијама“. У складу са методологијом писања научно-истраживачких радова, докторска дисертација садржи седам поглавља и то:

1. Увод
2. Микроармирани бетони у савременом грађевинарству
3. Припрема и обрадљивост микроармираних бетона
4. Експериментално истраживање
5. Анализа добијених резултата
6. Примјена добијених експерименталних лабораторијских резултата у прорачуну тунелске конструкције
7. Закључна сазнања и могућност даљих истраживања
8. Списак табела
9. Списак слика
10. Литература

Свако од наведених поглавља подијељено је у неколико одјељака који су такође нумерички обиљежени.

Дисертација је написана на 225 страна А4 формата, садржи 64 слике, 55 табела и 150 литературних навода. На почетку дисертације дата је кључна документација са изводом рада на српском и енглеском језику.

IV УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Савремени захтјеви у области грађевинске науке непрекидно захтијевају увођење нових, виших, стандарда у циљу освајања квалитетнијих, трајнијих и економичнијих материјала у оквиру грађевинских конструкција. Прије свега, овдје спадају нови композити са побољшаним физичко-механичким, динамичко-реолошким, технолошким, експлоатационим и другим карактеристикама у односу на већ постојеће, уобичајене материјале.

Један од значајнијих производа оваквог развојног приступа у области грађевинарства је микроармирани бетон, тј. бетон са додатком влакана која представљају врсту микроарматуре. Захваљујући све израженијој потреби за сложенем врстом објеката, како у погледу оптерећености конструкције, тако и у погледу облика конструкције, остварена унапређења у квалитету бетона армираног

челичним влакнима су у сталном порасту.

С тим у вези, истиче се основни разлог због кога су у оквиру докторске дисертације спроведена истраживања у области микроармираног бетона која су дала значајне, унапријеђене физичко-механичке и динамичко-реолошке карактеристике микроармираног бетона за његову примјену у грађевинским конструкцијама.

Увођење влакана у испитивање бетонске мјешавине, посебно у пост-еластичној зони, изазива позитивне промјене које се крећу од најблажих до значајних у зависности од низа фактора укључујући чврстоћу матрице бетона, тип влакана, модул еластичности влакана, чврстоћу влакана, карактеристику површинског везивања влакана за матрицу бетона, садржај влакана, орјентацију влакана у матрици као и ефекте величине агрегата. Примјена бетона у комбинацији са челичним влакнима доприноси пластичном понашању ове врсте материјала, што је посебно погодно за примјену гдје је ојачање класичном арматуром тешко извести.

Предмет докторске дисертације је експериментално-теоријска и моделска анализа микроармираног бетона, која је спроведена на узорцима микроармираног бетона различитих облика (цилиндри, греде и плоче), различите геометрије и облика употребијелених челичних влакана као и различитих процената учешћа примјењене челичне микроарматуре. Предложена и спроведена санација М. Уљаревића 2005.год., на доводном каналу (један од осам канала) руде на млинове темоелектране Гацко, остварена је без претходног испитивања таквог композита на ударна дејства. Иако се санација показала као успјешна (трајност увећана за 8 пута), предметна докторска дисертација експерименталним истраживањем доказала је неопходност употребе микроармираних бетона при ударном оптерећењу. У реализацији постављеног циља и спровођења предметног истраживања кандидат је развила сопствену методу утврђивања отпорности микроармираног бетона на ударна дјеловања. Све облике примјењених микроармираних узорака пратила је и израда узорака без микроарматуре који су служили као еталони.

Основни циљ докторске дисертације је био да се на основу моделирања физичко-механичких карактеристика бетона ојачаног челичним влакнима (микроармираног бетона), добије одговор за могућност побољшане и унапријеђене примјене ове врсте бетона у грађевинским конструкцијама сложених облика и оптерећења.

Током израде докторске дисертације пролазило се кроз неколико нивоа и врста моделирања бетона ојачаног челичним влакнима (у лабораторијама) да би се на најбољи могући начин представила функционална зависност његових особина од примјењених параметара влакана и осталих употребијелених компоненти: агрегата, цемента, воде и адитива.

Преглед расположивих и документованих метода истраживања о микроармираном бетону од стране истраживачке заједнице је основа од које је настављена област истраживања микроармираног бетона са челичним влакнима у оквиру предметне дисертације. Концепт спроведених истраживања, добијени резултати и евалуација цјелокупног рада представљају апликације за различите дијелове грађевинских конструкција високоградње, нискоградње и хидроградње карактеристичних оптерећења и облика.

Сазнање да се примјеном различитих врста влакана у маси бетона позитивно утиче на карактеристике истог, може се сматрати једном од важних иновативних чињеница у историји грађевинске струке. Управо, ова чињеница довела је до развоја микроармираног бетона.

Римљани су претече у примјени различитих врста природних влакана у ојачању конструкција. У прво вријеме, примјена природних влакана је текла без стручног

знања. Послије пада Римског царства примјена ове врсте ојачаног бетона пала је у заборав. Након поновне ренесансе бетона средином XIX вијека као његови додаци, за побољшање карактеристика, кориштени су азбест, пластика, стакло и челик. Према томе, може се рећи да је почетак примјене микроармираних бетона крај XIX вијека, када је А. Berand 1874. године с намјером да побољша жилавост бетона својој рецептури додао челичне опилке. Са научно-истраживачким развојем микроармираних бетона, паралелно се одвија и њихова индустријска примјена. Porter је 1910. године експериментисао са бетоном који је ојачан челичним влакнима, затим је Fricklin 1914. године добио патент за ојачани бетон са челичним ексерима. Zitkewic је 1938. године такође патентирао бетон са примјењеним комадима жице од меког челика за ојачавање бетона.

Постављање научне теорије о микроармираном бетону везане су за три истраживача а то су Romualdi, Batson и Mandel који су вршили истраживања крајем 50-их и почетком 60-их година прошлог вијека, у циљу одређивања механичких особина микроармираних бетона. Њима би такође требало додати и следеће истраживаче који су дали велики и значајни допринос у развоју микроармираног бетона: Parker 1974; Rollings 1981; Vondran 1991; PCA 1991; ACI 1997; AASHTO 2001; The Concrete Society 1994. Bentur и Midness су 1990 год. објавили да је више од 60% примјене влакнастог бетона употребијено за армирање бетонских плоча као други вид армирања. Бетон армиран челичним влакнима такође је био представљен за израду крутих коловозних конструкција али су и одговарајући недостаци тог бетона такође представљени у доступној литератури. Пропусти примјењеног микроармираног бетона за изградњу крутих коловозних конструкција десили су се због недовољне количине употребијених влакана за дизајнирану облогу. Може се закључити да су многобројна испитивања у погледу оптималне примјене и врсте (челичних) влакана у маси бетона недовољна и непотпуна, па је у оквиру предметне докторске дисертације вршено испитивање плоча различите дебљине од микроармираног бетона на ударно, динамичко оптерећење. Приказујући, ретроспективно досадашња истраживања микроармираног бетона и дизајнирања његових карактеристика показано је да ултра танке и велике димензије плоча са недовољном количином и врстом микроарматуре су подложне појави раних пукотина у угловима таквих плоча, широким отвореним пукотинама и прекомјерним љуспањем површине плоча. С обзиром на изложено, у оквиру предметне докторске дисертације кандидат је спровео сопствено испитивање да би унаприједио резултате примјене микроармираних плоча оптерећених на ударно, динамичко оптерећење.

Истраживачки програм следећих аутора: Falkner 1995; Beckett 1990 и 1999. био је фокусиран на ефекте влакана које та влакна имају на жилавост и дозвољено гранично оптерећење при савијању плоча и греда израђених од микроармираног бетона. Милашиновић Д. 2015.год., у свом истраживању реолошко-динамичког континуума комбинује реолошко-динамичку аналогију и механичка оштећења узорака микроармираног бетона са посебним освртом на коефицијент пузања, Poisson-ов коефицијент и скаларну варијаблу оштећења који су у функционалној зависности. Монографија Уљаревић М. 2013.год., о микроармираном бетону и истраживачки рад објашњава да примјена челичних влакана у маси бетона повећава жилавост, чврстоће, отпорност микроармираног бетона и одлаже појаву прве пукотине што је такође у функцији учешћа количине влакана, врсте влакана и односа L/D. У својим истраживањима од 1987. до 2004.год. Уљаревић М. истиче могућност примјене микроармираног бетона у рационализацији тунелских облога те примјене на елементима хидротехничких конструкција. Испитивања Шуштершича Ј., на хидротехничким бетонима високих перформански армираним челичним влакнима показала су да подводна абразија пропорционално расте са

повећањем способности композита да апсорбује енергију.

Због недостатка и недовољног истраживања у области плоча армираних челичним влакнима, у сврху унапређења физичко-механичких карактеристика микроармираног бетона, у предметној докторској дисертацији су спроведена испитивања плоча, цилиндара и греда армираних челичним влакнима. Добијени резултати на најбољи могући начин репрезентују усавршавање микроармираног бетона са изабраним врстама челичних влакана.

Велики значај и допринос развоју бетона ојачаног влакнима потврдио је АСИ (American Concrete Institute) организовањем једног од првих званичних симпозијума 1973. године о бетонима ојачаним влакнастим материјалима. Симпозијум је представио 15 радова о бетонима са примјеном челичних влакана, 8 радова о бетонима са стакленим влакнима. У септембру 1975. године одржана је RILEM конференција, у Лондону, која се бавила искључиво проблематиком бетона ојачаног челичним влакнима.

Истраживање о употреби блиско размакнуте челичне жице у маси бетона у касним 1950-им и раним 1960-им годинама прошлог вијека била је основа за патент и развој микроармираног бетона на бази примјене челичних влакана. Додавање влакана у матрицу бетона је показало да се повећава жилавост тог материјала и да присуство микроарматуре утиче на одлагање појаве прве пукотине у таквом бетону.

Примјена микроармираног бетона је постала изражена од средине 1960-их година прошлог вијека у изградњи саобраћајница, подних плоча индустријских објеката, ватросталних материјала и бетонских производа. Корисна примјена бетона армираног челичним влакнима је напредовала захваљујући развоју и напретку других технологија које прате развој, примјену и уградњу ове врсте бетона. То је допринијело употреби прсканог микроармираног бетона у различитим типовима подземних конструкција.

У модерно доба, широк спектар инжењерских материјала (керамика, пластика, цемент, гипс) укључују влакана за побољшање композитних својстава. Побољшање својстава подразумијева увећање (затезне чврстоће, притисне чврстоће, модул еластичности, отпор ширењу прслина, контрола пукотина, трајност, замор, отпорност на ударце и хабање, скупљање, ширење, термичке карактеристике и отпорност на ватру), у односу на обичан бетон, без влакана.

Експериментална испитивања и патенти који укључују кориштење дисконтинуалног челика за армирање елемената као што су сјечена жица у сегментима и друге врсте и облици метала за побољшање својства бетона долазе као савремена тенденција у пољу грађевинских конструкција што у потпуности оправдава и одобрава урађену докторску дисертацију.

Експериментални дио докторске дисертације пружа неколико јединствених научних доприноса у оквиру истраживачке заједнице када говоримо о микроармираном бетону и његовој примјени. Тестови који су спроведени на узорцима различитих облика, са примјеном различитих типова челичне микроарматуре и са различитим запреминским учинком у оквиру матрице бетона, пружају информације о дистрибуцији оптерећења у погледу правца носивости као и дистрибуцији напона у испитиваним узорцима, те нам на тај начин дају важне информације о структурном понашању бетона са или без челичних влакана. Овај рад такође је представио практичан примјер примјене добијених експерименталних, лабораторијских резултата у прорачуну облоге тунелске конструкције што је још једна потврда успјешно завршених испитивања и сматра се прагматичним доприносом дисертације. Претходно наведено, говори о унапријеђеним и побољшаним могућностима употребе микроармираног бетона у конструкцијама сложених облика, под дејством сложених оптерећења.

V МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Кандидат је у својој докторској дисертацији представила проблем моделирања физичко-механичких својстава микроармираног бетона и истовремено пролазила кроз рјешавање проблема механике лома. Да би се јасније представила улога влакана у матрици бетона требало би напоменути да у бетону постоје микропукотине. Енергија која доводи до ширења пукотина је много мања од енергије која доводи до почетног стварања микропукотина. Под дејством оптерећења (статичког или динамичког), пукотине достижу критичне вриједности што доводи до лома. Ако у бетонској мјешавини постоје влакна онда се енергија која би повећала пукотину троши (распоређује) око влакана. Због тога је потребно више енергије за ширење пукотина, тј мора се утрошити знатно више енергије за истезање односно деформацију присутних влакана.

Према томе, када говоримо о главном научном концепту при изради предметне докторске дисертације са сигурношћу се може рећи да влакна (челична) у маси бетона представљају изазов истраживача за постизање напреднијих физичко-механичких, динамичко-реолошких карактеристика микроармираног бетона.

Експерименти у оквиру докторске дисертације и примјењена методологија израде представљају репрезентативне резултате о продуженој трајности бетонске конструкције ојачане влакнима у односу на конструкцију без влакана.

Сprovedена истраживања су такође показала да карактеристике микроармираног бетона у конструкцијама (са аспекта моделирања, квалитета и граничне носивости), зависе од великог броја фактора: врсте употријебљеног агрегата, облика и величине зрна агрегата, врсте и карактеристика примјењене челичне микроарматуре, врсте и количине цемента.

Дакле, главни научни приступ израде докторске дисертације, дат је кроз следеће фазе:

1. почетна фаза
2. дефинисање проблема
3. истраживачке активности
4. закључак

У раду су примјењене следеће методе истраживања: експериментална, метода моделовања, статистичка као и посебне методе сазнања: анализа и синтеза, дефинисање и класификације, типолошке скале, индукција и дедукција, доказивање и оповргавање. У оквиру експерименталног дијела рада наведене методе су кориштене за одређивање карактеристика бетонске мјешавине у свјежем стању, као и одређивање физичко-механичких, динамичко-реолошких карактеристика бетона при старости од 28 дана.

Експериментална истраживања поменутим методама су спроведена на бетонској мјешавини једнаке рецептуре у погледу примјењеног агрегата, цемента, воде и адитива, док су варијације вршене у погледу учешћа челичних влакана у маси бетона.

Експериментална истраживања су вршена у циљу моделирања и постизања што бољих перформанси микроармираног бетона са изабраним компоненатама на различитим врстама узорака. Основна испитивања спроведена су за различите врсте оптерећења:

1. Оптерећење на притисак
2. Оптерећење на савијање

3. Динамичо (ударно) оптерећење

Имајући у виду достигнућа у пољу микроармираног бетона на свјетском нивоу и на основу изложеног, комисија закључује да су примјењене научне методе истраживања адекватне, тачне и савремене. Комисија констатује да је истраживање реализовано у односу на план истраживања који је предочен приликом пријаве докторске дисертације.

Експериментално истраживање, као најважнији дио докторске дисертације обухватило је справљање и испитивање различитих врста узорака (цилиндри, греде, плоче) израђених од стандардних фракција агрегата I(0/4 mm), II(4/8 mm) и III(8/16mm), цемента као везива, воде, адитива за бетон, три врсте челичних влакана са ојачаним крајевима дужине 31mm и 50mm и таласастих челичних влакана дужине 25mm и пречника свих влакана 0,75mm. На основу предложене рецептуре спроведен је експериментални дио дисертације који у потпуности репрезентује поуздано истраживање и добијене параметре микроармираног бетона који су значајни за употребу микроармираног бетона у будућности. То потврђује и прагматична примјена добијених, лабораторијских резултата за израду подграде тунелске конструкције, чији је прорачун такође дио докторске дисертације.

За утврђивање особина микроармираног бетона (реолошких, физичко-механичких, технолошких и других), које се примјењују у конструкцијама, извршено је експериментално истраживање и анализирани су добијени резултати. Сам научни експеримент је спроведен као планско, организовано и методско произвођење и мијењање реалних појава у циљу открића непознатих параметара микроармираног бетона и његових својстава.

Карактеристике композитног, микроармираног бетона утврђене су различитим методама испитивања, на различитим апаратурама, у складу са важећим стандардима (EN, ASTM, ISO и др). Такође примјењене су и нестандартне методе испитивања услед недостатка одговарајуће опреме, а са циљем да се што реалније симулирају експлоатациони услови могуће примјене микроармираног бетона. Статистичка обрада и анализа података након истраживања је јасно изложена и спроведена кроз адекватне методе нумеричке анализе. Закључци истраживања говоре о јасним и систематичним резултатима које је било потребно исказати на основу постављеног циља испитивања у оквиру предметне докторске дисертације.

VI РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Резултати истраживања кандидата мр Бојане Грујић, дају оригинални научни и практични допринос у области бетона ојачаних челичним влакнима са његовим примјенама у грађевинским конструкцијама.

Као резултати истраживања који су произашли из докторске дисертације, наводимо постигнуте побољшане физичко-механичке, динамичко-реолошке карактеристике моделираног микроармираног бетона при употреби специјалних врста челичних влакана. Испитивања су спроведена за различите врсте оптерећења и на различитим узорцима. Кандидат је у свом раду приказао резултат реолошко-динамичког понашања материјала на стандардном бетонском цилиндру.

Као посебан допринос истраживања истиче се моделирање микроармираних бетонских плоча које су оптерећене на ударно, динамичко оптерећење гдје је кандидат у дефинисању наведеног својства примијенила самостално развијену методу испитивања. Наиме, на основу спроведених експерименталних испитивања кандидат је на јасан начин успоставила зависност ударних чврстоћа микроармираних бетона и својстава бетонске матрице, врсте влакана и количине влакана. Следећи, изузетно важан, прагматичан дио овог рада, јесте кориштење добијених, лабораторијских карактеристика микроармираног бетона за

димензионисање тунелске облоге. Комисија закључује да су добијени резултати истраживања јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени.

У овом истраживању, закључци имају тенденцију не само да продуже границе истраживања напријед, већ да поставе и отворе нова питања за следећа истраживања. То значи да итерација петље из закључка долази опет у формулацију проблема.

Избор матрице бетона и влакна са посебним нагласком на избор специфичних облика и дозаже челичних влакана у маси бетона који је изложен динамичком, ударном оптерећењу, оптерећењу на савијање и на притисак, што је био предмет урађене докторске дисертације у даљим истраживањима може да буде основа за моделовање нових бетонских мјешавина и њихово кориштење у конструкцијама заштитних облика и оптерећења, без/са употребом класичне или преднапрегнуте арматуре.

VII ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Кандидат, мр Бојана Грујић, дипл. инж. грађ. је својом докторском дисертацијом дала значајан и оригиналан научни допринос у области бетона ојачаних влакнима и његове примјене у конструкцијама. Кандидат је у приказу својих истраживања користила стандардизовану, стручну терминологију а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама. Докторска дисертација садржи све релевантне елементе за одлучивање, те Комисија у наведеном саставу са задовољством предлаже Наставно-научном вијећу Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањој Луци и Сенату Универзитета у Бањој Луци да докторску дисертацију кандидата мр Бојане Грујић под насловом: „Моделирање физичко-механичких својстава бетона ојачаног влакнима са примјеном у конструкцијама“, прихвати као позитивну и одобри јавну одбрану.

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Бања Лука, Новембар, 2016.год.

1.

[Redacted Signature]

Проф. др Драган Милашиновић, дипл. инж. грађ.
предсједник и члан комисије

2.

Проф. др Је [Redacted Signature] инж. грађ.

члан комисије

3.

Проф. др Мато Уљаревић, дипл. инж. грађ.,
ментор и члан комисије

Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем
да је докторска дисертација

Наслов рада "МОДЕЛИРАЊЕ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА БЕТОНА
ОЈАЧАНОГ ВЛАКНИМА СА ПРИМЈЕНОМ У КОНСТРУКЦИЈАМА"

Наслов рада на енглеском језику "MODELING OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF FIBER REINFORCED CONCRETE FOR APPLICATIONS IN CONSTRUCTIONS"

☒ резултат сопственог истраживачког рада,

☒ да докторска дисертација, у цјелини или у дијеловима, није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,

☒ да су резултати коректно наведени и

☒ да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци 15.03.2017. год.

Потпис докторанта

[Handwritten signature]

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци да докторску дисертацију учини јавно доступном

Овлашћујем Универзитет у Бањој Луци да моју докторску дисертацију под насловом

МОДЕЛИРАЊЕ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА БЕТОНА ОЈАЧАНОГ
ВЛАКНИМА СА ПРИМЕНОМ У КОНСТРУКЦИЈАМА

која је моје ауторско дјело, учини јавно доступном.

Докторску дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Бањој Луци 15.03.2017. год.

Потпис докторанта





Изјава 3

Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске дисертације

Име и презиме аутора МР БОЈАНА ГРУЏИЋ, дипл. инж. грађ.

Наслов рада

МОДЕЛИРАЊЕ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА БЕТО-НАЧАНОГ ВЛАКНИМА СА ПРИМЕНОМ У КОНСТРУКЦИЈАМ

Ментор

ПРОФ. ДР МАТО УВАРЕВИЋ, дипл. инж. грађ.

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације идентична електронској верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци 15.03.2017. год.

Потпис докторанта





УНИВЕРЗИТЕТУ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Име и презиме аутора дисертације БОЈАНА ГРИЏИЋ

Датум, мјесто и држава рођења аутора 13.05.1980. год. у Сокоцу, Бих

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања: АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Датум одбране мастер / магистарског рада аутора: 07.04.2012. год. ГРАЂЕВИНСКИ ОДСЈЕК

Наслов мастер / магистарског рада аутора: ПРИМЈЕНА СПЕЦИЈАЛНИХ ВРСТА БЕТОНА ЗА ИЗРАДУ ПРИМАРНЕ ПОДГРАДЕ ТУНЕЛСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Академска титула коју је аутор стекао одбраном мастер / магистарског рада: МАГИСТАР ТЕХНИЧКИХ НАУКА ИЗ ОБЛАСТИ ГРАЂЕВИНАРСТВА

Академска титула коју је аутор стекао одбраном докторске дисертације: ДОКТОР ТЕХНИЧКИХ НАУКА ИЗ ОБЛАСТИ ГРАЂЕВИНАРСТВА

Назив факултета/Академије на коме је докторска дисертација одбрањена: АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ, ГРАЂЕВИНСКИ ОДСЈЕК

Назив докторске дисертације и датум одбране: МОДЕЛИРАЊЕ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА БЕТОНА ОЈАЧАНОГ ВЛАКНИМА СА ПРИМЈЕНОМ У КОНСТРУКЦИЈАМА

Научна област дисертације према CERIF шифрарнику: T220

Имена ментора и чланова комисије за одбрану докторске дисертације:

1. МЕНТОР - ПРОФ. ДР МАТО УВАРЕВИЋ, дип. инж. грађ.
2. ПРЕДСЈЕДНИК КОМИСИЈЕ И ЧЛАН: ПРОФ. ДР ДРАГАН МИЛАШИЊКОВИЋ, дипл. инж. грађ.
3. ЧЛАН КОМИСИЈЕ: ПРОФ. ДР ЈАКОБ ШЧИТЕРШИЋ, дипл. инж. грађ.
У Бањој Луци, дана 20.03.2012. год.



Декан

