

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Milan J. Spremić

ANALIZA PONAŠANJA GRUPE
ELASTIČNIH MOŽDANIKA KOD
SPREGNUTIH NOSAČA OD ČELIKA I
BETONA

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Milan J. Spremić

THE ANALYSIS OF HEADED STUDS
GROUP BEHAVIOR IN COMPOSITE
STEEL-CONCRETE BEAM

doctoral thesis

Belgrade, 2013

Doktorska disertacija: ANALIZA PONAŠANJA GRUPE ELASTIČNIH MOŽDANIKA KOD SPREGNUTIH NOSAČA OD ČELIKA I BETONA

Kandidat: Mr Milan J. Spremić, dipl.građ.inž.

Mentori: Prof. dr Dragan Buđevac, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet
Prof. dr Zlatko Marković, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Članovi komisije za ocenu i odbranu:

Prof. dr Dragan Buđevac, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Zlatko Marković, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Milan Veljković, dipl.građ.inž.
Department of Civil, Environmental and Natural
Resources Engineering,
Luleå University of Technology

V. prof. dr Biljana Deretić Stojanović, dipl.građ.inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Datum odbrane: _____

Od autora

Zahvaljujem se mentorima profesorima Draganu Buđevcu i Zlatku Markoviću na velikoj podršci i pomoći pri izradi doktorske disertacije. Korisnim savetima i sugestijama mentori i članovi komisije su mi značajno pomogli pri izradi disertacije.

U sprovođenju eksperimentalnog dela rada učestvovalo je osoblje Laboratorije za materijale i Laboratorija za ispitivanje konstrukcij. Profesoru Zoranu Miškoviću, Savi, Mladenu i Dušanu se zahvaljujem na uloženom trudu pri planiranju, organizaciji i realizaciji eksperimenta.

Izradu uzoraka su finansirale firme „GEMAX“, „NB Čelik“ i „Sika“ iz Beograda. Ovom prilikom želim da se zahvalim rukovodstvu i zaposlenima u ovim firmama na njihovom razumevanju i angažovanju.

Hvala, kolegama Marku i Nenadu na uloženom vremenu i snažnoj podršci pri radu sa uzorcima u Laboratoriji za materijale. Zahvaljujem se Marku na njegovoj nesebičnoj pomoći prilikom izrade numeričkog modela.

Za Anu, Olgu i Tihomira.

ANALIZA PONAŠANJA GRUPE ELASTIČNIH MOŽDANIKA KOD SPREGNUTIH NOSAČA OD ČELIKA I BETONA

REZIME

Diskontinualni podužni smičući spoj ostvaren grupama moždanika je jednostavno i široko rasprostranjeno rešenje za sprezanje čeličnih nosača i montažnih armiranobetonskih ploča. Ovaj rad analizira mogućnost primene grupa moždanika sa redukovanim rastojanjima između susednih moždanika u grupi. Osnovni cilj rada je da se istraži mogućnost smanjenja rastojanja između susednih moždanika u grupi u odnosu na minimalno propisana rastojanja. Smanjenje rastojanja između moždanika u grupi i dimenzija grupe, omogućava izvođenje manjeg otvora u armiranobetonskoj montažnoj ploči potrebnog za smeštaj moždanika. Prikazano je sopstveno eksperimentalno istraživanje nosivosti grupa moždanika, sprovedeno na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Eksperimentalnim istraživanjem analizirana je mogućnost primene grupe moždanika kod spregnutih greda u zgradarstvu. Ispitana je nosivost, deformabilnost i ponašanje, podužnog smičućeg spoja ostvarenog grupama moždanika. Glavni parametri analizirani u radu su: raspored moždanika u grupi, orijentacija grupe moždanika u odnosu na pravac podužne sile smicanja i međusobno rastojanje moždanika. Istraživanjem je obuhvaćeno pet različitih dispozicija grupa od četiri elastična moždanika sa glavom, kod kojih su međusobna rastojanja manja od minimalno propisanih rastojanja u Evrokodu 4. Cilj istraživanja je i da se utvrdi kako smanjenje minimalnih propisanih rastojanja između moždanika utiče na ponašanje, odnosno nosivost, duktilnost i ukupne deformacije podužnog smičućeg spoja. Korišćeni materijali, polazne pretpostavke i postupak ispitivanja su u skladu sa Evrokodom 4. Metodom konačnih elemenata simulirano je eksperimentalno istraživanje a kalibrisan numerički model sa eksperimentom je poslužio za izvođenje zaključaka o ponašanju veze ostvarene grupom moždanika sa glavom. Uočeni su i definisani modeli loma koji se mogu javiti u podužnim smičućim spojevima, formiranim grupama moždanika. Na uočenim modelima loma definisana su granična stanja nosivosti grupe moždanika.

Pomoću numeričkih modela urađena je i parametarska analiza koja je obuhvatila različite prečnike i grupe moždanika. Na osnovu dobijenih rezultata izvedene su preporuke za određivanje nosivosti grupe moždanika kada su rastojanja između susednih moždanika manja od propisanih. Predložen je redukcionni koeficijent za određivanje nosivosti grupe moždanika. Izvedene preporuke važe za smičuće spojeve spregnutih greda od čelika i betona u objektima visokogradnje.

Ključne reči: Moždanici sa glavom, Grupa moždanika, Spregnuti nosač od čelika i betona, Prefabrikovane betonske ploče

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Spregnute konstrukcije od čelika i betona, Metalne konstrukcije

UDK: 624.016 (043.3)

THE ANALYSIS OF HEADED STUDS GROUP BEHAVIOR IN COMPOSITE STEEL-CONCRETE BEAM

ABSTRACT

Discontinuous shear connection with groups of headed studs is simple and widespread solution for connection between steel beam and precast concrete element. This thesis analyzes the possible applications of headed studs group with reduced distances between adjacent headed studs in the group. The main objective of this study was to investigate the possibility of reducing the spacing between adjacent headed studs in the group compared to the minimum required in Eurocode 4. Reducing the distance between the headed studs in the group and the dimensions of the group, would allow construction of a smaller hole in the reinforced concrete precast plate needed to accommodate the headed studs. The paper presents the results of the experimental research conducted on push-out tests at the Faculty of Civil Engineering at the University of Belgrade. Throughout the experiment there has been analyzed the possibility of using the headed studs group in composite beams for buildings. The capacity, deformability and behavior of shear connection with grouped headed studs was investigated (analyzed). A shape of group arrangement along with its orientation to the applied load and distance between the studs were variables considered. The study includes five different groups of four headed studs, with the distance between headed studs less than the minimum distances required in Eurocode 4. The aim of the research is to determine how the reduce of the minimum required distance between the headed studs affects to the behavior, shear capacity, ductility and total longitudinal shear deformation of the shear connection. The materials, initial assumptions and test set up are in accordance with Eurocode 4. The FEM model is used to simulate the experiment. Calibrated FEM models with push-out tests were used to draw conclusions about the behavior of shear connection with group of headed studs. The fracture models which can occur in longitudinal shear connection with headed studs group were identified and defined in the paper. Ultimate limit state for headed stud group based on the fracture models is defined. Parametric analysis, which included a models with different diameters of headed studs and layout of groups were performed by numerical models.

Based on the results, the recommendations were derived for determining the shear capacity of the headed studs group, when the distance between studs is less than required by Code. The reduction coefficient was suggested to determine the shear capacity of the headed studs group. Derived recommendations can be applied to shear connections in composite steel-concrete beams applied in buildings.

Keywords: Headed studs, Group arrangement of stud connectors, Steel-concrete composite beams, Prefabricated concrete slab

Science field: Civil Engineering

Narrow scientific field: Composite steel and concrete structures, Steel structures

UDK: 624.016 (043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Montažne spregnute konstrukcije	1
1.2. Podužni smičući spoj sa grupom moždanika	3
1.3. Predmet i ciljevi istraživanja.....	5
1.4. Nosivost moždanika sa glavom	8
1.5. Raspored moždanika i minimalna rastojanja	12
1.6. Prethodna istraživanja.....	14
1.7. Analiza mogućnosti primene grupe moždanika.....	19
2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	26
2.1. Plan sopstvenih eksperimentalnih istraživanja	26
2.2. Opšte o eksperimentu.....	29
2.3. Materijali.....	33
2.3.1. Moždanici sa glavom.....	34
2.3.2. Konstrukcioni čelik	35
2.3.3. Čelik za armiranje.....	37
2.3.4. Beton.....	38
2.4. Tipovi ispitanih uzoraka	43
2.4.1. Geometrija uzoraka ispitanih u prvoj fazi eksperimenta.....	43
2.4.2. Geometrija uzoraka ispitanih u drugoj fazi eksperimenta.....	45
2.5. Postupak formiranja uzoraka	46
2.6. Postupak ispitivanja	49

3. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA	52
3.1 Prikaz rezultata ispitivanja.....	52
3.1.1 Standardni uzorci - ST.....	53
3.1.2 Grupa moždanika – uzorci TDA	54
3.1.3 Grupa moždanika - uzorci LDA1	56
3.1.4 Grupa moždanika – uzorci LDA2	59
3.1.5 Grupa moždanika - uzorci G1	61
3.1.6 Grupa moždanika - uzorci GR1	63
3.2 Analiza eksperimentalnih rezultata i ponašanja uzoraka	65
3.2.1 Karakteristična vrednost nosivosti na smicanje ispitanih grupa moždanika .	66
3.2.2 Ponašanje pri lomu ispitanih grupa moždanika.....	69
3.3 Analiza deformacija i krutosti.....	71
3.4 Nosivost grupe moždanika.....	75
3.5 Zaključci eksperimentalnog istraživanja.....	78
4. SIMULACIJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA.....	80
4.1 Modeli materijala.....	80
4.1.1 Čelik moždanika sa glavom.....	81
4.1.2 Beton.....	84
4.1.3 Čelik za armiranje i čelični profil	91
4.2 Granični uslovi i mreža konačnih elemenata.....	92
4.3 Prikaz rezultata.....	94
5. NOSIVOST GRUPE MOŽDANIKA.....	99
5.1. Mehanizmi loma grupe moždanika pri graničnom stanju nosivosti.....	99
5.1.1 Lom betona zatezanjem	99
5.1.2 Lom moždanika usled kombinovanog naprezanja zatezanjem i smicanjem	103

5.1.3 Lom betona usled lokalnog pritiska	105
5.2. Granično stanje nosivosti grupe moždanika	106
5.2.1 Ekvivalentni (zamenjujući) prečnik grupe moždanika	120
5.2.2 Nosivost grupe moždanika na smicanje	122
5.2.3 Koeficijent redukcije	122
5.3 Parametarska analiza	124
5.4 Duktilnost spoja ostvarenog grupom moždanika	132
5.5 Poređenje predložene redukcije sa podacima dostupnim u literaturi	133
5.6 Oblast i ograničenja primene predloženog rešenja	138
5.7 Primer proračuna podužnog smičućeg spoja sa grupom moždanika	139
6. ZAKLJUČCI	143
7. LITERATURA	146
8. PRILOZI	150
8.1 Poprečni presek armiranobetonske ploče ispitanih uzoraka	150
8.2 Rezultati numeričkih (FEM) modela	153
9. OZNAKE I SKRAĆENICE	160
10. BIOGRAFIJA AUTORA	164

PRILOG 1: Izjava o autorstvu

PRILOG 2: Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

PRILOG 3: Izjava o korišćenju

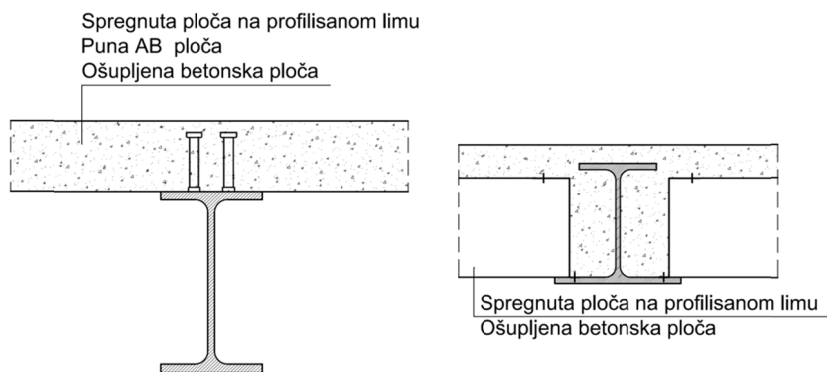
1. UVOD

1.1. Montažne spregnute konstrukcije

Savremenu građevinsku praksu karakteriše stalna težnja ka industrijalizaciji izvođenja radova na izgradnji objekta. Rezultat ovog trenda je stalni razvoj novih i unapređenje postojećih tipskih rešenja konstruktivnih elemenata, a u novije vreme i tipskih konstrukcija. Spregnute međuspratne konstrukcije od čelika i betona najbolje oslikavaju ovakav trend.

Poslednjih nekoliko decenija izvođenje betonskih konstrukcija karakteriše razvoj velikog broja tipskih montažnih armiranobetonskih konstruktivnih elemenata, a među njima značajno mesto zauzimaju prefabrikovane betonske ploče međuspratnih konstrukcija. Spregnuta konstrukcija od čelika i betona, se nameće kao optimalno rešenje za međuspratnu konstrukciju objekata visokogradnje. Spregnuta konstrukcija koju čine čelični nosač i ploča betonirana na licu mesta ili spregnuta ploča na profilisanom limu, podrazumeva dosta radova na gradilištu i dodatno vreme koje je potrebno da betonska ploča dostigne potrebnu čvrstoću da bi se nastavilo sa radovima. Smanjenje obima radova na gradilištu i ubrzavanje izvođenja tj. skraćivanje vremena građenja je prioritetni cilj moderne građevinske industrije, pogotovu kada je u pitanju smanjenje ukupne zapremine betona koji je potrebno ugraditi na licu mesta. Montažna gradnja je sve zastupljenija u odnosu na tradicionalne načine izvođenja betonskih konstrukcija sa betoniranjem u oplati na licu mesta. Stoga je izvođenje montažne armiranobetonske ploče spregnute sa čeličnim nosačem potpuno opravdano kako u objektima visokogradnje tako i u mostogradnji.

Spregnute međuspratne konstrukcije u zgradarstvu mogu se izvoditi kao klasične, sa betonskom pločom na gornjoj nožici nosača, ili kao „slim floor“ konstrukcija sa betonskom pločom koja se oslanja na donju nožicu monosimetričnog čeličnog profila, slika 1.1. Klasična spregnuta greda sa pločom na gornjoj nožici je ekonomičnije rešenje sa stanovišta utroška čelika. Spregnute grede sa pločom na gornjem pojasu izvode se sa punom pločom ili sa spregnutom pločom na profilisanom limu.



Slika 1.1: Klasična spregnuta greda i „slim floor“ greda

Betonska ploča se može izvoditi kao: puna ploča livena na licu mesta, spregnuta ploča na profilisanom limu ili kao prefabrikovana ploča od montažnih armiranobetonskih elemenata sa slojem za monolitizaciju. Montažni armiranobetonski elementi za podne ploče izvide se najčešće kao: pune betonske ploče, ošupljene betonske ploče ili delimično betonirane pune ploče. Primeri su prikazani na slici 1.2.



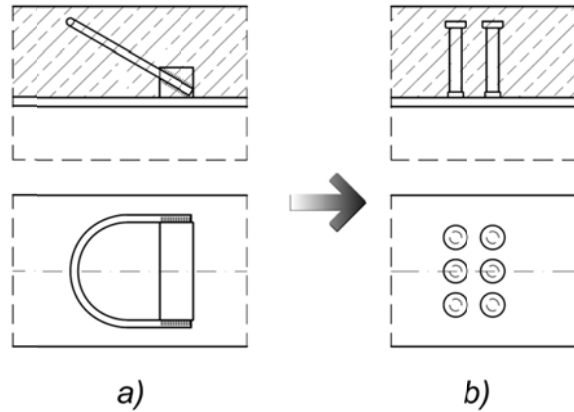
Slika 1.2: Prefabrikovani armiranobetonski elementi za montažne spregnute grede, slike preuzete iz [48]

Kada se koriste delimično betonirane pune ploče ili ošupljene ploče, podrazumeva se izrada sloja betona za monolitizaciju konstrukcije. U slučaju primene pune montažne armiranobetonske ploče, količine betona koje se ugrađuju na gradilištu, radi monolitizacije, su najmanje. Monolitizacija konstrukcije se vrši betoniranjem delova ploče između dva betonska elementa i delova konstrukcije u kojima se postavljaju moždanici. Moždanici se postavljaju između dva prefabrikovana betonska elementa i u otvorima koji se ostavljaju u ploči za smeštaj moždanika.

1.2. Podužni smičući spoj sa grupom moždanika

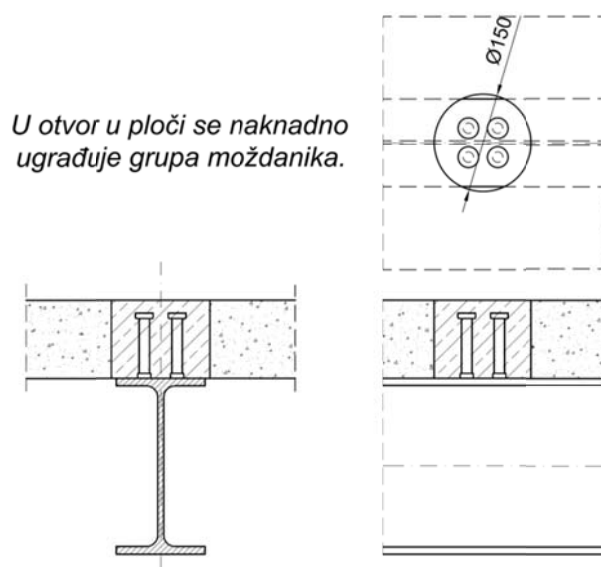
Spregnuti nosač je element konstrukcije sa komponentama poprečnog preseka od konstrukcionog čelika (čelični profil) i betona, koji su međusobno povezani smičućim spojem koji ograničava podužno proklizavanje između čelika i betona. Da bi se ostvarilo spregnuto dejstvo, pored ograničenja proklizavanja između betona i čelika, mora se sprečiti i odvajanje jedne od druge komponente poprečnog preseka. Način prenošenja podužne sile smicanja između čeličnog profila i betonske ploče, jedna je od glavnih konstruktivnih karakteristika spregnute konstrukcije. Formiranje podužnog smičućeg spoja ostvaruje se mehaničkim spojnim sredstvima – moždanicima. U slučaju spregnutih međuspratnih konstrukcija u objektima visokogradnje, moždanici sa glavom koji su zavareni za čelični deo poprečnog preseka i ubetonirani u betonski deo preseka, najrasprostranjeniji su način za prenošenje podužne sile smicanja između čeličnog nosača i betonske ploče. Izvođenje podužnog smičućeg spoja montažne armiranobetonske ploče sa čeličnim nosačem jednostavnije je realizovati ukoliko se umesto kontinualno postavljenih moždanika primene moždanici koji su grupisani i diskontinualno postavljeni na nosaču. Ovakav pristup omogućava izvođenje montažnih ploča veće dužine, što ujedno znači manji broj jedinica za montažu. Takođe je konstruktivno lakše rešiti prepuste ploče, a moguće je izvesti i kontinualnu ploču na dva ili tri polja. Kontinualno postavljanje moždanika na nožici čeličnog profila rezultira značajnim ograničenjima u konstruktivnom oblikovanju montažnih spregnutih međuspratnih konstrukcija. Kontinualno postavljeni moždanici podrazumevaju upotrebu manjih montažnih elemenata i veću dužinu spojeva montažnih betonskih elemenata. Pri konstruisanju spregnutih spojeva kod nosača sa prefabrikovanim armiranobetonskim pločama, za vezu između čeličnog profila i betonske ploče se često primenjuje rešenje

sa grupama moždanika, koji se postavljaju u unapred pripremljene otvore na montažnim armiranobetonskim pločama.



Slika 1.3: Zamena jednog blok moždanika sa grupom moždanika sa glavom

Grupisani moždanici sa glavom svoju primenu nalaze i u slučajevima kada se zahteva velika nosivost podužnog smičućeg spoja. Umesto primene krutih - blok moždanika velike nosivosti (slika 1.3a), moguća je primena većeg broja grupisanih moždanika sa glavom (slika 1.3b), što pojednostavljuje konstruktivno oblikovanje i izvođenje konstrukcije. Primena moždanika sa glavom u grupi koja zamenjuje jedan blok moždanik, omogućava konstruisanje duktilnog podužno smičućeg spoja koji ima ekvivalentnu nosivost kao i podužni spoj ostvaren blok moždanicama.



Slika 1.4: Ojačanje i sanacija postojećih konstrukcija sa grupom moždanika

U slučaju sanacije i ojačanja postojećih konstrukcija, primenom grupe elastičnih moždanika moguće je povezati čelični profil sa betonskom pločom ili ojačati postojeći smičući spoj. Izvođenjem otvora prečnika $d=150$ mm na međusobnom rastojanju 500-600mm, u koji se mogu postaviti četiri grupisana moždanika, moguće je realizovati sanaciju ili ojačanje (slika 1.4).

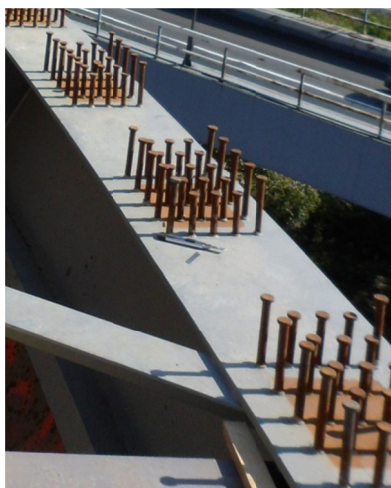
1.3. Predmet i ciljevi istraživanja

Prethodne studije i istraživanja podužnog smičućeg spoja sa grupama moždanika, koje će kasnije u radu biti navedene, ne definišu grupu moždanika na isti način.

Podužni smičući spoj ostvaren grupama moždanika je smičući spoj sa diskontinualno postavljenim moždanicima. Ovo bi bila najopštija definicija podužnog smičućeg spoja, ostvarenog grupama moždanika. U ovakvom smičućem spoju moždanici su grupisani na način da su međusobna rastojanja između moždanika jednaka ili veća od minimalno propisanih rastojanja. Rastojanja između grupa moždanika mogu biti i veća od maksimalnih propisanih rastojanja za pojedinačni moždanik. Međutim, u slučajevima podužnog smičućeg spoja sa grupisanim moždanicima koji se koristi za sprezanje montažne AB ploče sa čeličnim delom poprečnog preseka, teži se tome da se dimenzije grupe svedu na najmanju moguću meru. Na osnovu dimenzija grupe, konstruišu se otvori u montažnoj ploči za smeštaj moždanika. Jasno je da je interes da diskontinuitet u betonskoj ploči bude minimalan, što podrazumeva minimalne dimenzije otvora u ploči na mestu grupe moždanika.

Ovaj rad se bavi grupama moždanika, koje su formirane na način da su rastojanja između susednih moždanika u grupi manja od minimalno standardom propisanih vrednosti. Smanjenjem rastojanja između moždanika dobijaju se grupe minimalnih dimenzija. Rešenjem podužnog smičućeg spoja sa grupisanim moždanicima na malim međusobnim rastojanjima, a sa rastojanjem između grupa koje je prilagođeno geometriji montažnih armiranobetonskih ploča ostvaruje se potrebna nosivost podužnog smičućeg spoja, a uz zadovoljenje konstruktivnih zahteva, pre svega po pitanju jednostavnosti i brzine izvođenja radova. U mostogradnji ovakva rešenja nisu strana (slika 1.5). Evrokod 4 EN 1994-2 [9], za spregnute mostove, prepoznaje ovakvo rešenje i dozvoljava grupisanje moždanika i diskontinualno sprezanje, primenom grupa

moždanika sa rastojanjima između grupa koja su veća od propisanih rastojanja za pojedinačno postavljene moždanike.



Slika 1.5: Primer iz mostogradnje – Prilazna rampa mostu „Ada“ u Beogradu

Širom sveta sproveden je veliki broj ispitivanja u kojima je analizirano ponašanje moždanika u smičućim spojevima, pregled najznačajnijih su dali Pallares i Hajjar [43]. Međutim, još uvek nije potpuno istražena i definisana nosivost grupe moždanika. Cilj ovog rada je analiza nosivosti i ponašanja grupe moždanika u poređenju sa nosivošću ravnomerno raspoređenih moždanika. Da li se, i u kojim slučajevima sme sabira nosivost pojedinačnih moždanika u grupi, ili se suma nosivosti pojedinačnih moždanika u grupi mora redukovati, i u kojoj meri, osnovna su pitanja za

koja su dati odgovori i tumačenja. Pored nosivosti, analizirana je i krutost podužnog smičućeg spoja. Posebno se vodilo računa o duktilnosti podužnog spoja ostvarenog grupama moždanika. Da li je smičući spoj ostvaren sa grupom moždanika duktilan, jedno je od glavnih pitanja. Da bi se pretpostavke koje važe za pojedinačno spojno sredstvo primenile i na grupu, pored nosivosti, potrebno je analizirati i deformacijske karakteristike grupe u poređenju sa pojedinačnim spojnim sredstvom.

Tokom rada analizirane su specifičnosti ponašanja grupe moždanika koje se moraju uzeti u obzir pri konstruisanju i izvođenju spregnutih elemenata sa grupama moždanika. Prethodna istraživanja u ovoj oblasti bavila su se pre svega problemima u mostogradnji. Analizirane su velike grupe od devet ili više moždanika, najčešće velikog prečnika 20-25mm. Pregled dosadašnjih istraživanja smičućeg spoja sa grupom moždanika sa glavom, koja su sprovedena u svetu, zasnovanih pre svega na probleme spregnutih elemenata u mostogradnji, prikazan je u poglavlju 1.6.

* * *

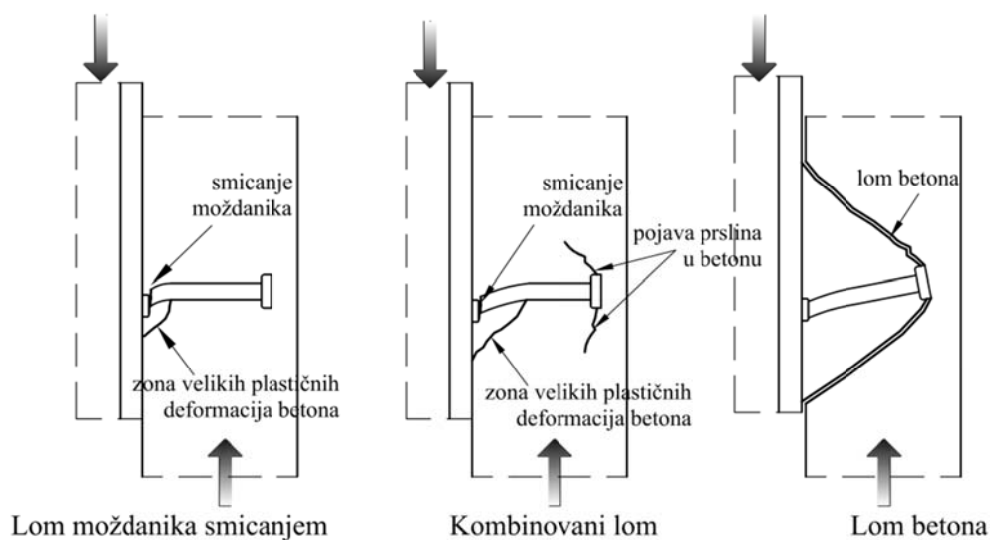
Ovaj rad se bavi analizom nosivosti i ponašanja grupe od četiri moždanika prečnika 12-19mm. Analizirani su podužni smičući spoj, pune montažne armirano - betonske ploče sa čeličnim profilom u objektima viskogradnje, ostvaren grupom moždanika. U radu su prikazana sopstvena eksperimentalna istraživanja, sprovedena 2010. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Istraživanjem je analizirano 6 serija uzoraka sa ukupno 22 uzoraka.

Drugo poglavlje detaljno prikazuje realizovano eksperimentalno istraživanje. Dokumentovani su svi parametri koji su praćeni tokom realizacije istraživanja. Rezultat, kao i izvedeni zaključci eksperimentalnog istraživanja prikazani su u poglavlju broj tri. Numerička simulacija metodom konačnih elemenata (FEM) sprovedena je pomoću modela koji je kalibrisan sa eksperimentalnim rezultatima. FEM model je korišćen za detaljniju analizu dobijenih rezultata i opis ponašanja veze čeličnog profila i betonske ploče ostvarene grupom moždanika. U poglavlju pet opisano je ponašanje podužnog smičućeg spoja i izvedeni su zaključci i preporuke za primenu grupe moždanika u smičućim spojevima kod spregnutih elemenata u zgradarstvu. U radu su sagledane mogućnosti primene predloženog rešenja na karakterističnim primerima. Analizirane su i

postojeće preporuke koje su izvedene za spregnute elemente u mostogradnji i mogućnost njihove primena na spregnute elemente u zgradarstvu.

1.4. Nosivost moždanika sa glavom

Lom smičućeg spoja ostvarenog moždanicama, može se opisati sa tri karakteristična oblika loma: lom moždanika smicanjem, lom betona i kombinovani oblik loma sa lomom moždanika na smicnaje pri граниčnom opterećenju. Na slici 1.6 šematski su prikazani mogući tipovi loma veze ostvarene moždanicama.



Slika 1.6: Šematski prikaz mogućih oblika loma smičućeg spoja

Koji oblik loma će karakterisati određeni spoj zavisi od kvaliteta betona i geometrije moždanika. Ako se usvoji velika visina moždanika $h_{sc} \geq 4d$ uticaj visine moždanika na nosivost veze je u tom slučaju isključen. Ovo je dokazano brojnim eksperimentalnim studijama, videti Pallares i Hajjar [43], Ollgaard i dr. [41]. Lam [33] je u svojoj studiji analizirao i objasnio, pojavu određenog oblika loma u funkciji čvrstoće betona pri pritisku.

Da bi se odredila nosivosti grupe moždanika na smicanje potrebno je pre svega odrediti nosivost pojedinačnog moždanika na smicanje. Aktuelni propisi: EN1994-1-1 (u daljem tekstu Evrokod 4 ili EC4) [8], BS [2], JSCE [14], AISC [1], definišu na sličan način nosivost pojedinačnog moždanika na smicanje u punoj betonskoj ploči. U

skraćenom obliku, dato je poređenje vrednosti granične nosivosti elastičnih moždanika sa glavom, prema navedenim propisima. Prema Evrokodu 4, proračunska nosivost moždanika sa glavom na smicanje, u slučaju sprezanja pune betonske ploče i čeličnog nosača, jednaka je manjoj od sledećih vrednosti:

$$P_{Rd} = 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v} \quad (1.1)$$

$$P_{Rd} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v} \quad (1.2)$$

pri čemu je redukcijoni koeficijent za visinu moždanika jednak:

$$\alpha = 0.2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \quad \text{za} \quad 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4 \quad (1.3a)$$

$$\alpha = 1 \quad \text{za} \quad \frac{h_{sc}}{d} > 4 \quad (1.3b)$$

U prethodnim izrazima su:

- d - prečnik stabla moždanika sa glavom $\text{Ø}16\text{mm} < d < \text{Ø}25 \text{ mm}$,
- f_u - čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika sa glavom, ali ne veća od 500 MPa,
- f_{ck} - karakteristična čvrstoća betona pri pritisku, pri čemu se moraju koristiti betoni zapreminske mase veće od 1750 kg/m^3 ,
- E_{cm} - sekantni modul elastičnosti betona,
- h_{sc} - ukupna visina moždanika sa glavom,
- γ_v - parcijalni koeficijent sigurnosti, preporučena vrednost prema EC4 $\gamma_v = 1.25$ je usvojena i u NA SRPS EN 1994-1-1.

Izrazom (1.1) definisana je nosivost moždanika po kriterijumu nosivosti moždanika na smicanje dok je izrazom (1.2) definisana nosivost moždanika po kriterijumu loma betona. Treba napomenuti da je Evrokod 4, praktično jedini od savremenih propisa, koji dozvoljava primenu moždanika manje visine od $4d$, ali ne manje od $3d$. Redukcioni koeficijent za visinu moždanika dodatno smanjuje nosivost

moždanika i to po kriterijumu loma betona u slučaju kada se primenjuju moždanici visine $3d < h_{sc} \leq 4d$.

„Stari“ Britanski standard BS 5950 [2] definiše minimalne karakteristične nosivosti moždanika na smicanje u funkciji karakteristične čvrstoće betona na pritisak. Karakteristične vrednosti nosivosti moždanika sa glavom Q_k prečnika 16 mm minimalne visine 75 mm su prikazane u tabeli 1.1. Britanski standard propisuje minimalnu visinu moždanika kao $h_{sc} > 4d$.

Tabela 1.1: Karakteristične vrednosti nosivosti moždanika prema BS 5950

	Moždanik: $d=16$ mm, $h_{sc,min}=75$ mm				
f_{ck} [MPa]	25	30	35	40	50
Q_k [kN]	70	74	78	82	82

Prema standardima i preporukama JSCE [14] za spregnute konstrukcije, proračunska nosivost moždanika na smicanje jednaka je manjoj od sledećih vrednosti:

$$V_{sud} = (31A_s \sqrt{h_{sc}/d \cdot f_{cd}} + 10000) / \gamma_b \quad (1.4)$$

$$V_{sud} = A_s \cdot f_{ud} / \gamma_b \quad (1.5)$$

pri čemu je:

$$h_{sc}/d \geq 4,$$

A_s - površina poprečnog preseka stabla moždanika,

f_{cd} - proračunska čvrstoća betona $f_{cd} = f_{ck}/1.3$, f_{ck} karakteristična čvrstoća betona pri pritisku,

f_{ud} - proračunska čvrstoća pri zatezanju čelika od koga je napravljen moždanik $f_{ud} = f_u/1.0$,

f_u - granična čvrstoća pri zatezanju čelika od koga je napravljen moždanik, ali ne veća od 400 MPa,

γ_b - parcijalni koeficijent sigurnosti, $\gamma_b = 1.30$.

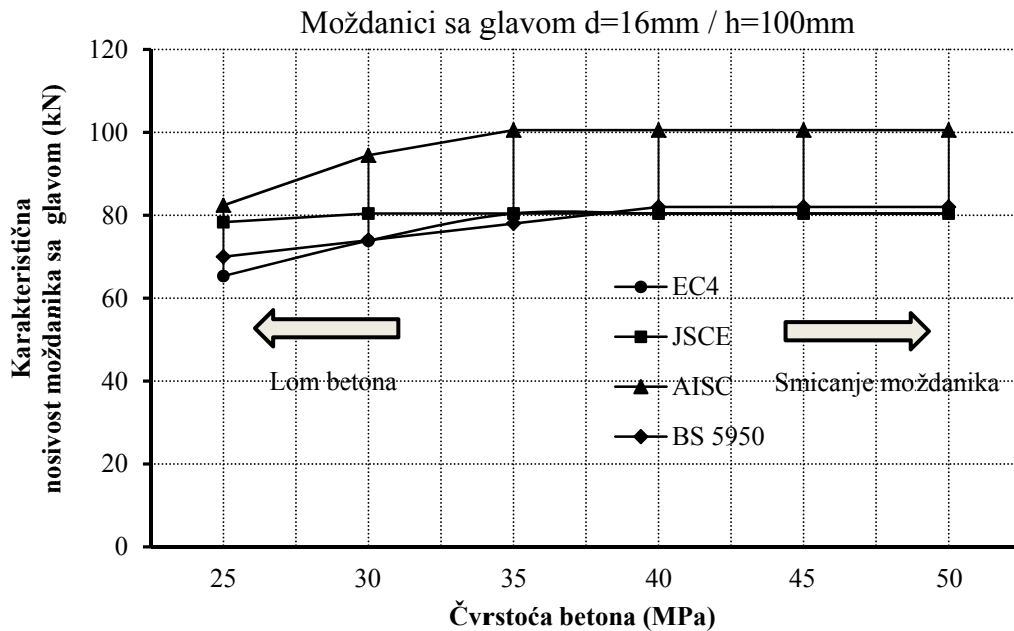
Američki propisi ANSI/AISC 360/05 [1] definišu karakterističnu vrednost nosivosti moždanika sa glavom na smicanje Q_n u punoj betonskoj ploči kao:

$$Q_n = 0.5A_s \sqrt{f_{ck} E_c} \leq A_s f_u \quad (1.6)$$

U prethodnom izrazu su:

- A_s - površina poprečnog preseka stabla moždanika,
- E_c - modul elastičnosti betona $E_c=0,043w_c^{1.5}f_c^{0.5}$,
- w_c - težina betona [kg/m^3]
- f_{ck} - karakteristična čvrstoća betona pri pritisku,
- f_u - granična čvrstoća pri zatezanju čelika od koga je napravljen moždanik,

Na slici 1.7 prikazane su vrednosti karakteristične nosivosti na smicanje moždanika sa glavom prečnika 16 mm visine 100 mm, sračunate prema navedenim standardima.



Slika 1.7: Uporedna analiza nosivosti na smicanje moždanika sa glavom

Jasno se uočava da se nosivosti na smicanje moždanika prema Evrokodu 4, BS 5950 i preporukama JSCE značajno ne razlikuju. Nosivosti prema standardu ANSI/AISC 360/05 su 20-25% veće. Navedene vrednosti se moraju analizirati uzimajući u obzir i ostale faktore koji utiču na nosivost. To su pre svega dimenzije moždanika: prečnik i visina moždanika nakon zavarivanja kao i rastojanje između moždanika. Evrokod 4 dopušta primenu moždanika čija je visina $3 < h_{sc}/d < 4$. Međutim, ostali navedeni propisi ne dopuštaju primenu moždanika visine manje od $h_{sc}/d=4$.

Takođe, postoje razlike i u preporukama za rastojanja između moždanika, kako u pravcu sile, tako i upravno na pravac smičuće sile.

Tabela 1.2 prikazuje karakteristične vrednosti nosivosti moždanika različitih prečnika prema Evrokodu 4. Prikazane vrednosti su sračunate u funkciji klase betona usvajajući zateznu čvrstoću materijala od koga je moždanik napravljen $f_u=500$ MPa za visinu moždanika veću od četverostruke vrednosti prečnika, $h_{sc} \geq 4d$.

Tabela 1.2: Nosivosti moždanika na smicanje prema Evrokodu 4

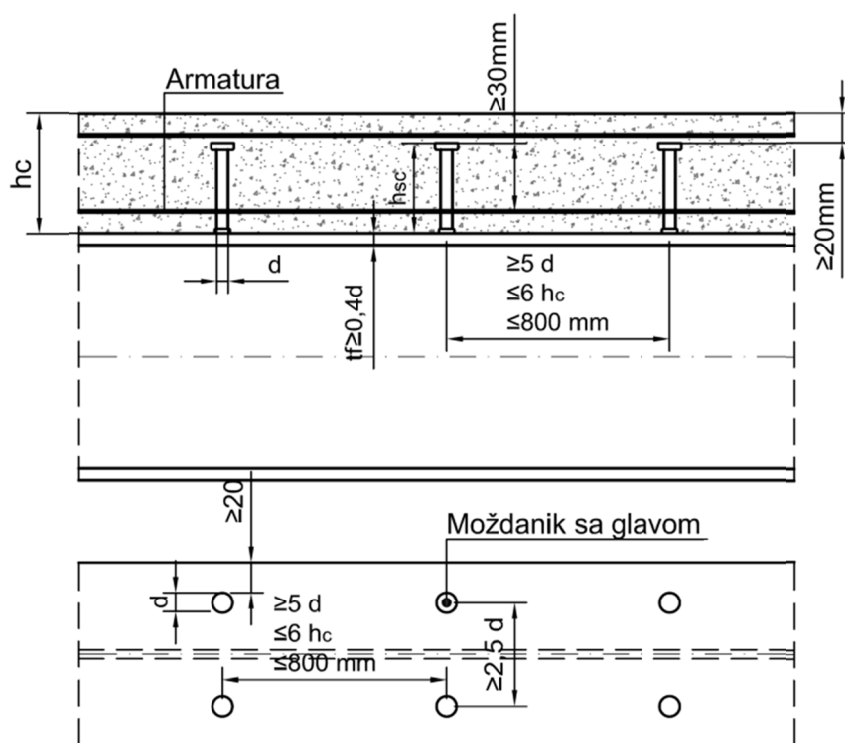
f_{ck}	M12*	M16	M19	M22	M25
25	36.8	65.3	92.2	123.5	159,5
30	41.5	73.9	104.2	139.6	180.3
35	45.2	80.4	113.4	152.1	196.3
40	45.2	80.4	113.4	152.1	196.3
45	45.2	80.4	113.4	152.1	196.3
50	45.2	80.4	113.4	152.1	196.3

*Prema EN 1994-1-1 izrazi 1.1 do 1.3b ne važe za moždanike M12

1.5. Raspored moždanika i minimalna rastojanja

Ispitivanja nosivosti moždanika na smicanje pokazala su da je visina moždanika parametar koji značajno utiče na oblik loma koji će se javiti i nosivost moždanika na smicanje. Sedamdesetih godina prošlog veka nizom eksperimentalnih istraživanja, neka su prikazali Pallares i Hajjar [42], pokazano je da za veće visine moždanika od četverostruke dimenzije prečnika, visina moždanika nema značajan uticaj na graničnu nosivost na smicanje moždanika. Prema preporukama JSCE visina moždanika bi trebalo da je veća ili jednaka od $5,5d$.

Adekvatan prenos podužne sile smicanja između pune betonske ploče i čeličnog nosača, postiže se potrebnim brojem moždanika sa glavom i pravilnim konstruktivnim oblikovanjem podužnog smičućeg spoja. Minimalna rastojanja između moždnika u punoj betonskoj ploči prema Evrokodu 4 [8] su: $5d$ u pravcu podužne sile smicanja i $2,5d$ upravno na pravac sile smicanja (slika 1.8).



Slika 1.8: Raspored moždanika na nosaču prema EC4

Rastojanja između moždanika prema ANSI/AISC 360/05 [1] moraju biti minimum $6d$ u pravcu delovanja sile i $4d$ upravno na pravac delovanja smičuće sile. Minimalna rastojanja između moždanika prema BS5950 [2] su: u pravcu delovanja sile $5d$ a upravno na pravac smičuće sile $4d$. Preporuke JSCE [14] za rastojanja između moždanika zahtevaju vrednosti: $\max(5d, 100\text{mm})$ u pravcu delovanja sile odnosno $d+30\text{mm}$ upravno na pravac smičuće sile. Uočava se da ANSI/AISC 360/05 definiše najveće vrednosti za minimalna rastojanja između moždanika, što je rezultat veće karakteristične nosivosti moždanika na smicanje koje definiše ovaj standard u odnosu na ostale citirane propise. Vrednosti minimalnih propisanih rastojanja između moždanika u funkciji prečnika moždanika prikazane su u tabeli 1.3.

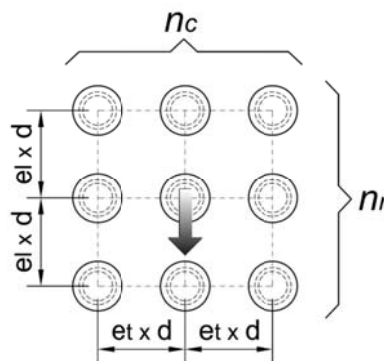
Tabela 1.3: Minimalna propisana rastojanja između moždanika

	EC4	AISC	BS5950	JSCE
u pravcu delovanja sile	$5d$	$6d$	$5d$	$\max(5d, 100\text{mm})$
upravno na pravac delovanja sile	$2,5d$	$4d$	$4d$	$d+30\text{mm}$
d – prečnik moždanika sa glavom				

1.6 Prethodna istraživanja

Svaki od pomenutih standarda i preporuka za proračun spregnutih konstrukcija u prethodnom poglavlju, dozvoljava primenu grupe elastičnih moždanika u podužnim smičućim spojevima. Međutim, preporuka i ograničenja o načinu primene grupe elastičnih moždanika i proračunu nosivosti grupe elastičnih moždanika nema. Prema EN 1994-2 (Spregnuti mostovi) [8], sprezanje čeličnog nosača sa montažnim armiranobetonskim pločama može se izvesti sa grupom moždanika, pri čemu standard dozvoljava da rastojanje između grupa bude veće od maksimalnih propisanih rastojanja za pojedinačno postavljene moždanike. Američki i britanski propisi za zgrade za razliku od Evrokoda 4 propisuju maksimalna rastojanja između grupa moždanika i to na $8h_c$ gde je: h_c debljina pune betonske ploče.

Bliže preporuke za određivanje nosivosti na smicanje grupe elastičnih moždanika date su jedino u preporukama JSCE [14]. Ove preporuke se pozivaju na redukzione faktore koje su predložili Okada i dr. [40] u svom radu. Tabela 1.4 prikazuje seriju ispitanih uzoraka Okade i dr. Istraživanje je obuhvatilo dvanaest uzoraka sa grupama od od po devet moždanika prečnika $d=22\text{mm}$, ali nije izveden ni jedan uzorak sa rastojanjima između susednih moždanika u pravcu sile manjim od $5d$. Dobijeni rezultati eksperimentalnog istraživanja pokazuju da sve ispitane grupe moždanika imaju istu graničnu nosivost, što je i očekivano imajući u vidu da su rastojanja između moždanika u potpunosti u skladu sa preporukama standarda. Međutim, predloženi redukcioni koeficijenti Okade i dr. [40] predviđaju smanjenje nosivosti moždanika u grupi i kada je rastojanje susednih moždanika jednako $5d$, što nije u saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima. Predloženi koeficijenti redukcije Okade i dr. [40] su i u funkciji klase betona.



Slika 1.9: Usvojene oznake za geometriju grupe moždanika

Na slici 1.9 definisana je geometrija grupe koja se koristi za prezentaciju eksperimentalnih rezultata dostupnih u literaturi. Oznake sa slike su:

- e_t - osno rastojanje između susednih moždanika u pravcu smičuće sile podeljeno sa prečnikom moždanika,
- e_l - osno rastojanje između susednih moždanika upravno na pravac smičuće sile podeljeno sa prečnikom moždanika,
- n_c - broj kolona moždanika upravno na pravac delovanja sile,
- n_r - broj redova moždanika u pravcu delovanja sile.

Tabela 1.4: Ispitani uzorci, Okada i dr. [40]

Uzorak	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$ [kom]	e_t [mm]	e_l [mm]	$P_{u,stud}$ [kN]
SP1-1		22	100	3 x 3	3	11	229
SP1-2		22	100	3 x 3	3	11	198
SP1-3		22	100	3 x 3	3	11	210
SP2-1		22	150	3 x 3	3	15	--
SP2-2		22	150	3 x 3	3	15	196
SP2-3		22	150	3 x 3	3	15	207
SP3-1	49,5	22	150	3 x 3	3	5	208
SP3-2	44,3	22	150	3 x 3	3	5	192
SP3-3	49,5	22	150	3 x 3	3	5	201
SP4-1	49,5	22	150	3 x 3	3	5	205
SP4-2	44,3	22	150	3 x 3	3	5	190
SP4-3	49,5	22	150	3 x 3	3	5	208

Granična čvrstoća pri zatezanje moždanika $f_u=530$ MPa
SP3 – uzorci sa armaturom u otvoru ploče na mestu moždanika
SP4 – uzorci bez armature u otvoru ploče na mestu moždanika

Minimalna dozvoljena rastojanja između moždanika u pravcu upravnom na pravac sile ($2,5d$) su praktično jednaka tehnološki minimalnim rastojanjima koja su rezultat dimenzija opreme za automatsko zavarivanje moždanika, pa se može analizirati samo mogućnost smanjivanja rastojanja između moždanika u pravcu delovanja sile. Shim C.S. i dr. [45] su analizirali nosivost grupe od 9 moždanika prečnika 22 i 25 mm u funkciji rastojanja između susednih moždanika u pravcu delovanja sile koja su manja od minimalno propisanog rastojanja od $5d$. Ovo je jedino eksperimentalno istraživanje nosivosti grupe moždanika koje je sprovedeno sa rastojanjima između susednih

moždanika u pravcu smičuće sile manjim od $5d$. Prikaz eksperimentalno ispitanih grupa moždanika je dat u tabeli 1.5.

Tabela 1.5: Ispitani uzorci, Shim C.S. i dr. [45]

Uzorak	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$	e_t [mm]	e_l [mm]	$P_{u,stud}$ [kN]
G25NS	49,5	25	190	3 x 3	3	5	1 P_{Rk}
G25OS	49,5	25	190	3 x 3	3	5	1 P_{Rk}
G25IS	49,5	25	190	3 x 3	3	5	1 P_{Rk}
G25OS-1	49,5	25	190	3 x 3	3	4	0,75 P_{Rk}
G25NS-2	49,5	25	190	3 x 3	3	3	0,7 P_{Rk}
G25OS-2	49,5	25	190	3 x 3	3	3	0,7 P_{Rk}
G25OS-2	49,5	25	190	3 x 3	3	3	0,7 P_{Rk}
G22OS	49,5	22	190	3 x 3	3	4	
G22IS	49,5	22	190	3 x 3	3	4	
G22OS-1	49,5	22	190	3 x 3	3	3	
G22IS-1	49,5	22	190	3 x 3	3	3	

OS – uzorci sa dodatnom armaturom u ploči oko otvora za moždanike
IS – uzorci sa dodatnom armaturom u betonu za monolitizaciju oko moždanika
NS – uzorci bez dodatne armature

Istraživnja Shim C.S. [45] su obuhvatila i uticaj dodatne armature na nosivost grupe. Naime, korišćene su montažne armiranobetonske ploče sa otvorom za smeštaj moždanika. Analiziran je uticaj dodatne armature na nosivost grupe. Dodatna armatura je postavljena u montažne prefabrikovane elemente oko otvora za smeštaj moždanika i opciono u otvor u betonskom elementu oko moždanika. U literaturi nisu dostupni detaljni podaci o nosivosti i ponašanju ispitanih uzoraka. Shim C.S. i dr. predložili su redukcionu koeficijent za nosivost grupe moždanika u slučaju kada su moždanici izvedeni na manjem međusobnom rastojanju od $5d$, prema izrazu (2.1).

$$\beta_s = 0,174 \cdot e_l + 0,13 \quad (2.1)$$

Predloženi izraz važi u slučajevima kada je razmak između susednih moždanika u pravcu sile $3d < e_l < 5d$. Predložena redukcija nosivosti je funkcija rastojanje između susednih moždanika. Takođe u istraživanju je konstatovano da dodatna armatura ne utiče značajno na nosivost grupe.

Hegger J. i dr. [25] su u svom istraživanju u kome su koristili betone visokih klasa čvrstoće, analizirali nosivost dva moždanika postavljena na međusobnom rastojanju od $2d$, u pravcu delovanja sile. Prezentirali su rezultate eksperimenta gde je zaključeno da je nosivost dva moždanika na rastojanju od $2d$ u pravcu delovanja sile manja za samo 5,4% od njihove pune nosivosti, što je neznatna redukcija nosivosti.

Pored navedenih istraživanja koja su se bavila nosivošću grupe moždanika i dala su neke kvantitativne rezultate, navedena su i istraživanja koja su se bavila ponašanjem grupe moždanika kao što su deformabilnost i duktilnost.

Dongyan i dr. [22] analizirali su ponašanje i krutost grupisanih moždanika. Analizirali su grupe od po devet moždanika prečnika 22mm. Rezultati njihovih eksperimentalnih istraživanja prikazani su u tabeli 1.6.

Tabela 1.6: Ispitani uzorci, Dongyan i dr. [22]

Uzorak	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$	e_t [mm]	e_l [mm]	$P_{u,stud}$ [kN]
MD1-1	50	22	200	3 x 3	4,5	4,5	186
MD1-2	50	22	200	3 x 3	4,5	4,5	186
MD2-1	50	22	200	3 x 3	4,5	6.8	180-200
MD2-2	50	22	200	3 x 3	4,5	6.8	180-200
MD3-1	50	22	200	3 x 3	4,5	9	180-200
MD3-2	50	22	200	3 x 3	4,5	9	180-200
MD4-1	50	22	200	3 x 3	4,5	11	180-200
MD4-2	50	22	200	3 x 3	4,5	11	180-200
Granična čvrstoća pri zatezanju moždanika $f_u=460 - 490$ MPa							

Na osnovu dobijenih rezultata konstatovano je da je nosivost moždanika u grupi koji su postavljeni na međusobnom rastojanju u pravcu smičuće sile od $4,5d$, veća od proračunske nosivosti prema Evrokodu 4. U poređenju sa pojedinačnim moždanikom moždanici u grupi su imali neznatno manju nosivost. Takođe su konstatovali da grupa moždanika ima istu inicijalnu krutost kao i pojedinačni moždanik. Ova činjenica je od posebne važnosti za granično stanje upotrebljivosti spregnutih elemenata sa smičućim spojem ostvarenim grupom moždanika.

Novijeg datuma su istraživanja ponašanja grupe moždanika koje su realizovali Chen Xu i dr. [21] i Guezouli i dr. [23]. Dispozicije uzoraka koji su oni u svojim istraživanjima eksperimentano ispitani su prikazane u tabelama 1.7 i 1.8.

Tabela 1.7: Ispitani uzorci, Chen.Xu i dr. [21]

Uzorak	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$	e_t [mm]	e_l [mm]	$P_{u,stud}$ [kN]
QT1	>50	13	80	3 x 3	4	4.6	63.4
QT2	>50	13	80	3 x 3	4	4.6	60.18
QT3	>50	13	80	3 x 3	4	4.6	54.92
Granična čvrstoća na zatezanje moždanika $f_u=480$ MPa							

Chen Xu i dr. [21] su prezentovali numeričku parametarsku analizu. Analizirali su uticaj visine moždanika na nosivost grupe kao i nosivost grupe pri dvoosnom savijanju ploče. Jedno od zapažanja je i da visina moždanika u grupi utiče na nosivost grupe. Nosivost pojedinačnog moždanika u smičućim spojevima u funkciji visine su definisali i opisali Ollgaard i dr. u svom radu [41]. Kada je visina moždanika veća od četverostruke vrednosti prečnika stabla moždanika, ona ne utiče na graničnu nosivost na smicanje. Istraživanjima o nosivosti pojedinačnog moždanika koja su sprovedena decenijama unazad pokazno je da čvrstoća betona, vitkost moždanika tj. odnos visine i prečnika moždanika (h_{sc}/d) su parametri koji definišu i oblik loma moždanika koji se javlja pri graničnom opterećenju.

Tabela 1.8: Ispitani uzorci, Guezouli i dr. [23]

Uzorak	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$	e_t [mm]	e_l [mm]	$P_{u,stud}$ [kN]
SP1	56	19	100	3 x 3	4	5	158
SP2	56	19	100	3 x 3	4	5	158
SP3	56	19	100	3 x 3	4	5	158

Guezouli i dr. [23] su u svom radu analizirali procentualno učešće nosivosti jednog moždanika u nosivosti grupe u funkciji njegovog položaja. Rezultate ovih parametarskih analiza komentarisani su pri analizi rezultata numeričkog modela koji je prezentiran u poglavlju 5.

Nosivost i ponašanje pojedinačnog moždanika u smičućim spojevima detaljno je istražena i opisana u literaturi: Oehlers [39] i Pallares i Hajjar [43]. Nema velikog broja

podataka o nosivosti i ponašanju grupe moždanika. Sve navedene studije su relativno novijeg datuma i realizovane su u poslednjih 10 godina.

Iz svih prikazanih podataka prethodnih istraživanja može se uočiti da su eksperimentalne vrednosti nosivosti moždanika za 10 do 20% veće od karakterističnih vrednosti koje se dobijaju proračunom po Evrokodu 4.

Analizirajući dostupne studije o nosivosti i ponašanju grupa moždanika napravljen je plan sopstvenih eksperimentalnih istraživanja.

1.7 Analiza mogućnosti primene grupe moždanika

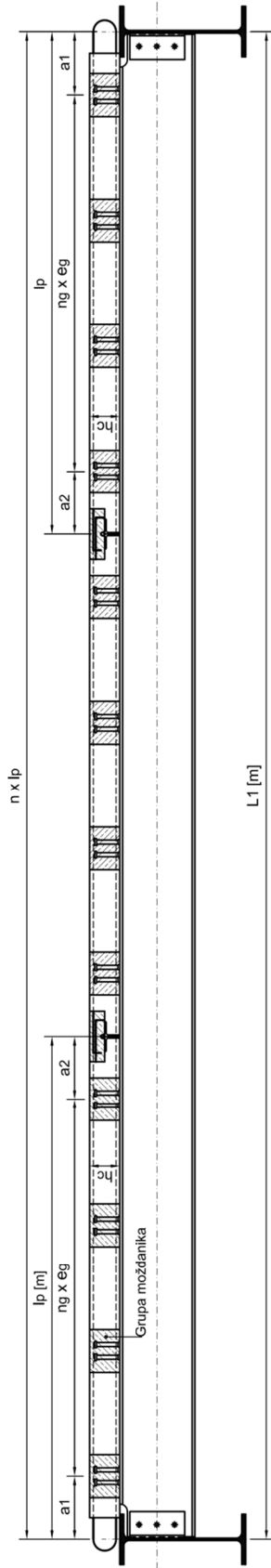
Na primerima koji ilustruju tipične spregnute grede u objektima zgradarstva sagledana je mogućnost i analizirana je opravdanost primene grupe moždanika sa glavom za ostvarivanje podužnog smičućg spoja. Analizirana je međuspratna konstrukcija sa rasterom stubova 8.0 x 8.0 m i razmakom podnih nosača od 4.0 m. Takođe je prikazan i proračun nosača raspona 10.0 m i 12.0 m. Na slici 1.10, šematski su prikazani analizirani nosači. Dimenzije ploče su usvojene u skladu sa rasterom konstrukcije, gabaritima i kapacitetima transportnog sredstva. Širina ploče se može prilagoditi razmaku grupa tako da se grupe moždanika postavljaju u deo konstrukcije između ploča i u otvore u ploči koji se nalaze u polovini širine ploče.

Opterećenja međuspratne konstrukcije usvojena su prema EN1991-1-1 [6]. Pored sopstvene težine ploče i konstrukcionog čelika, usvojena je vrednost dodatno stalnog opterećenja od podova, pregrada i instalacija od 2.5 kN/m². Korisno opterećenje je inteziteta 3.0 kN/m², što odgovara kategorijama opterećenih površina A do C2 u skladu sa EN1991-1-1 [6].

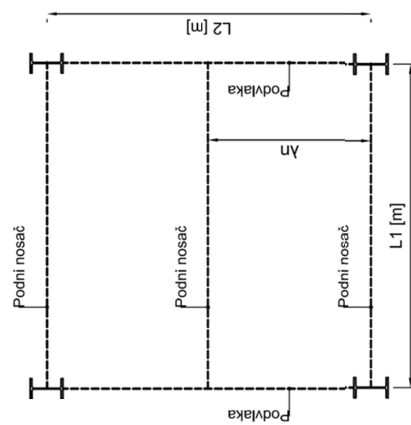
Konstrukcioni čelik je kvaliteta S275. Klasa betona, prema EN 1992-1 je 35/45. Svi usvojeni poprečni preseki su klase 1. Usvojene dimenzije poprečnih preseka i kontrola nosivosti u fazi građenja su prikazani u tabeli 1.9.

Tabela 1.9: Kontrola nosivosti poprečnog preseka u fazi građenja

Nosač	Poprečni presek	$M_{a,Ed}$ [kNm]	$M_{pl,a,Rd}$ [kNm]	$M_{a,Ed}/M_{pl,a,Rd}$	$V_{a,Ed}/V_{a,Rd}$
PN1	IPE330	172.8	221.2	0.781	0.180
PO1	IPE 450	345.6	468.1	0.738	0.214
PN2	IPE 400	236.3	359.4	0.657	0.140
PN3	IPE500	388.0	603.4	0.644	0.140



Oznaka nosača	PN1	PO1	PN2	PN3
Konstrukcioni čelik	S275	S275	S275	S275
Raster konstrukcije	8,0 x 8,0 m	8,0 x 8,0 m	10,0 x 8,0 m	12,0 x 8,0 m
Raspon grede	$L_1=8,0$ m	$L_2=8,0$ m	$L_1=10,0$ m	$L_1=12,0$ m
Razmak nosača	λ_n	8,0 m	4,0 m	4,0 m
Broj montažnih AB ploča	n_p	4	4	6
Dimenzije AB ploče	h_c	16 cm	16 cm	16 cm
	l_p	100-200 cm	100-200 cm	100-200 cm



Slika 1.10: Šematski prikaz analiziranih podnih nosača

Kontrola stabilnosti nosača na bočno-torziono izvijanje se ne razmatra. Naime konstruktivnim merama moguće je nosač bočno stabilizovati. Prema preporukama Hicks i Lawson [26], rasporedom montaže ploča od oslonaca ka sredini raspona, ili konstruktivnom vezom ploča sa nosačem u fazi građenja može se sprečiti bočno torziono izvijanje nosač. Konstruktivnim merama kao što su spregovi i zatege moguće je na adekvatan način postići stabilizacija nosača na bočno torziono izvijanje.

Plastični momenti nosivosti spregnutih poprečnih preseka analiziranih nosača kao i dokaz nosivosti su prikazani u tabeli 1.10. Za usvojeni razmak podnih nosača od 4.0 m usvojena je debljina betonske ploče od 16.0 cm. Imajući u vidu da je betonski deo poprečnog preseka puna ploča, moguće je izvesti potreban broj moždanika za pun smičući spoj.

Tabela 1.10: Kontrola nosivosti spregnutog poprečnog preseka

Nosač	M_{Ed} [kNm]	M_{Rd} [kNm]	M_{Ed}/M_{Rd}	V_{Ed} [kN]	V_{Rd} [kN]	$V_{a,Ed}/V_{a,Rd}$
PN1	424.8	522.1	0.814	212.4	489.2	0.434
PO1	849.6	953.0	0.892	424.1	807.4	0.526
PN2	630.0	735.6	0.856	252.0	677.0	0.372
PN3	955.8	1223	0.782	318.6	950.6	0.335

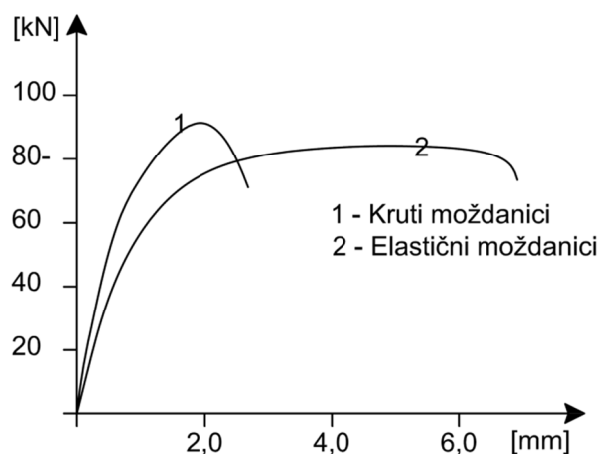
Podužni smičući spoj se ostvaruje moždanicama sa glavom. Evrokod 4 daje preporuke koje mora ispuniti geometrija moždanika sa glavom:

- Visina moždanika nakon zavarivanja mora biti minimum $3d$, gde je d prečnik moždanika;
- Glava moždanika mora imati prečnik veći od $1.5d$ i debljinu ne manju od $0.4d$;
- Za zategnute elemente i elemente konstrukcije izložene zamoru, prečnik moždanika ne sme biti veći od $1.5t_f$ gde je t_f debljina nožice elementa na koju se moždanik zavaruje;
- Prečnik moždanika mora biti manji od $2.5t_f$. Gde je t_f debljina pritiskute nožice elementa na koju se moždanik zavaruje. Od ove preporuke može se odstupiti u slučajevima kada je moždanik zavaren direktno iznad rebra nosača.

Polazeći od nosivosti moždanika sa glavom prema izrazima (1.1) do (1.3) određen je potreban broj moždanika za pun smičući spoj između konstrukcionog čelika i betonske

ploče. Raspored i rastojanje na kome se spojna sredstva mogu izvesti u podužnom smičućem spoju zavisi od deformacijskih karakteristika spoja.

Prema načinu ponašanja i prenošenja sile u literaturi je uobičajena podela moždanika na krute i elastične – duktilne moždanike. Na slici 1.11. prikazano je ponašanje krutog i elastičnog moždanika. Elastične moždanike odlikuje pre svega velika deformabilnost i sposobnost da postignu velike plastične deformacije. Kruti - blok moždanici primaju smičuće sile isključivo smicanjem, i pri graničnoj nosivosti imaju neznatne plastične deformacije. Deformabilnost spojnog sredstva – moždanika obezbeđuje prerasporelu ukupne smičuće sile na veći broj moždanika, koji tu silu treba da prenesu između čeličnog profila i betonske ploče. Elastičnim ili duktilnim moždanicama mogu se smatrati oni moždanici koji imaju dovoljan kapacitet deformacija da omoguće idealno plastično ponašanje podužnog smičućeg spoja. Evrokod 4 daje uslov za eksperimentalni dokaz duktilnosti moždanika, prema kome se može smatrati da je moždanik elastičan – duktilan, ako je karakterističan kapacitet klizanja pri graničnoj nosivosti na smicanje moždanika $\delta_{uk} \geq 6,0$ mm.



Slika 1.11: Duktilnost moždanika

Primenom duktilnih moždanika, potreban broj moždanika, za prenos podužne sile smicanja, se može rasporediti na delu mosača između oslonca i poprečnog preseka sa maksimalnom vrednošću momenta savijanja, što je u ovom slučaju sredina raspona nosača. U tabeli 1.11 prikazani su rezultati proračuna nosivosti podužnog smičućeg

spoja. Pri proračunu nosivosti moždanika usvojena je granična čvrstoća pri zatezanje materijala od koga je moždanika napravljen $f_u=490$ MPa.

Tabela 1.11: *Podužni smičući spoj*

Nosač	d [mm]	h_{sc} [mm]	P_{Rd} [kN]	$V_{l,Ed}$ [kN]	n [kom]
PN1	16	100	63.1	1721.5	2 x 27.3
PO1	19	100	88.9	2717.0	2 x 30.6
PN2	16	100	63.1	2323.8	2 x 36.8
PN3	19	100	88.9	3190.0	2 x 35.9

U prethodnoj tabeli su:

- P_{Rd} proračunska nosivost na smicanje moždanika sa glavom,
- $V_{l,Ed}$ proračunska vrednost sile smicanja u podužnom smičućem spoju,
- n potreban broj moždanika za pun smičući spoj na celoj dužini nosača.

Na osnovu dobijenog potrebnog broja moždanika za pun smičući spoj u tabeli 1.12 su prikazana rastojanja za kontinualno postavljene moždanike kao i za predloženu grupu moždanika. Predložena je grupa od četiri moždanika u rasporedu 2x2. Naime veće grupe moždanika nisu primerene za nosače u zgradarstvu zbog ograničene širine gornje nožice nosača na koju se vrši ugradnja moždanika.

Tabela 1.12: *Raspored moždanika*

Nosač	$d \times h_{sc}$ [mm]	n [kom]	e [cm]	Grupa [kom]	n_g [kN]	e_g [cm]
PN1	16x100	27.3	14.5	2 x 2	4	58.0
PO1	19x100	30.6	13.1	2 x 2	4	52.4
PN2	16x100	36.8	13.5	2 x 2	4	54.0
PN3	19x100	35.9	16.0	2 x 2	4	64.0

U predhodnoj tabeli su:

- n potreban broj moždanika za pun smičući spoj,
- e razmak susednih moždanika,
- n_g broj moždanika u grupi,
- e_g razmak grupa moždanika.

Na osnovu proračuna dobijene su vrednosti razmaka, grupa moždanika u pravcu delovanja sile, od 520 mm do 640 mm. Ovi razmaci su u skladu sa konstruktivnim rešenjem armiranobetonske pune ploče, koju većina proizvođača montažnih betonskih elemenata izvodi u širinama 1000 mm ili 1200 mm.

Predpostavljena je plastična raspodela podužne sile smicanja što je primereno u slučaju duktilnog spoja. U radu je pokazano da se grupe od četiri moždanika ponašaju duktilno. Duktilnos podužnog smičućeg spoja omogućava i primenu parcijalnog smičućeg spoja ostvarenog grupama moždanika. Ovo omogućava da se po potrebi usvoje nešto veće vrednosti razmaka grupa ukoliko bi to zahtevalo konstruktivno rešenje armiranobetonske ploče. U radu Spremić i dr. [46] je analizirana veza plastične nosivosti poprečnog preseka i stepena smičućeg spoja, gde je pokazano da za male redukcije broja moždanika, odnosno malo smanjenje stepena sprežanja, nema značajne redukcije nosivosti poprečnog preseka. Detaljnija analiza primene grupe moždanika na analiziranim nosačima je data u poglavlju sedam.

Pored nosivosti proverena su i granična stanja upotrebljivosti nosača. Provereni su ugibi nosača u fazi građenja i eksploatacije spregnutog nosača. Analizirana je i frekvencija podnih nosača na osnovu kojih su svi nosači svrstani u kategoriju D prema „Design Guide for Floor Vibrations“ [3]. Pri kontroli vibracija usvojeno je ukupno prigušenje od 3%. U modalnu masu je uključeno i 10% korisnog opterećenja. U tabeli 1.13 prikazani su rezultati kontrole graničnih stanja upotrebljivosti analiziranih nosača.

Tabela 1.13: Kontrola graničnog stanja upotrebljivosti podnih nosača

Nosač	w_a [cm]	L / w_a	w_{t0} [cm]	w_{tn} [cm]	L / w_{tn}	f [Hz]	M_{mod} [kg]
PN1	3.45	232	1.00	1.46	549	5.05	10880
PO1	2.41	266	0.92	1.31	610	5.26	21760
PN2	3.75	281	1.60	2.21	452	4.15	12600
PN3	4.27	332	1.63	2.23	538	3.96	16320

U predhodnoj tabeli su:

- w_a ugib nosača u fazi građenja,
- w_{t0} ugib spregnutog nosača,
- w_{tn} ugib spregnutog nosača sa uključenim efektima tečenja betona,
- f frekvencija nosača u prvom tonu,
- M_{mod} modalna masa.

Povećanjem raspona nosača preko 12.0 m granično stanje upotrebljivosti usled vibacija postaju kriterijum koji je merodavan za dimezionisanje nosača. Efekti skupljanja betona na deformacije spregnutog nosača se smanjuju primenom prefabrikovanih betonskih elemenata kod kojih je deo početnog skupljanja betona, oko 20% ukupne vrednosti skupljanja, završen pre montaže konstrukcije.

Na osnovu analiziranih primera nosača jasno je da se sa grupom od četiri možanika mogu uspešno konstruisati nosači u zgradarstvu. Razmak grupe koji je u granicama 500-600mm odgovara širinama prefabrikovanih ploča koje se kod većine proizvođača prefabrikovanih elemenata najčešće kreću u granicama od 1000 mm do 1800 mm i prilagođavaju se zavisno od rasponima podnih nosača.

2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

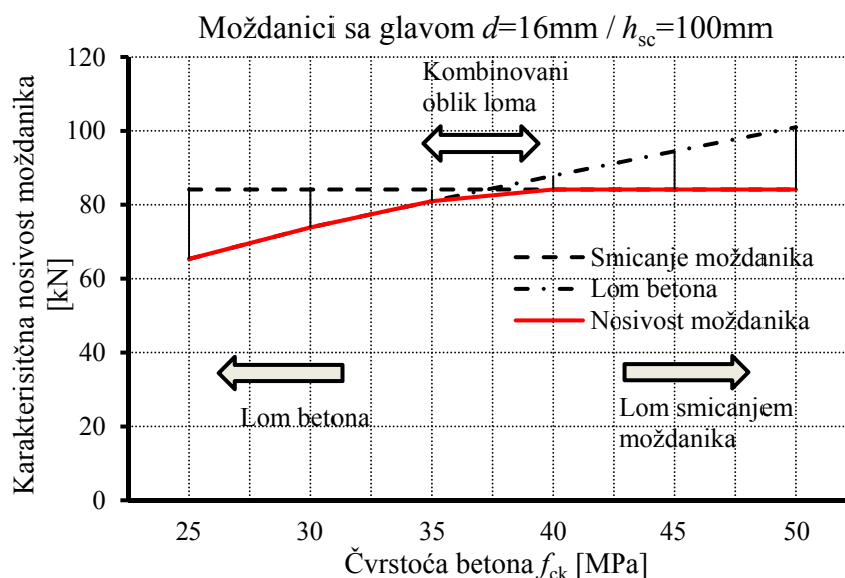
Za potrebe istraživanja, koje je tema ovoga rada, sprovedena su sopstvena eksperimentalna ispitivanja. Eksperimentalno ispitivanje je realizovano u dve faze. Prva faza, sa dvanaest uzoraka, obuhvatila je: tri standardna uzorka koji su izvedeni u svemu prema Evrokodu 4 i tri serije od po tri uzorka sa različitim grupama moždanika. U drugoj fazi eksperimenta ispitano je osam uzorka sa grupom od četiri moždanika, pri čemu su četiri uzorka izvedena sa armiranobetonskom pločom bez armature u delu ploče u kom je predviđeno postavljanje moždanika. Ispitivanja uzoraka su sprovedena u okviru Laboratorije za ispitivanje konstrukcija i Laboratorije za materijale i konstrukcije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Materijal za eksperiment kao i pomoć pri izradi uzoraka dobijena je od preduzeća: “Gemax” i “NB Čelik” iz Beograda.

2.1 Plan sopstvenih eksperimentalnih istraživanja

Kao polazni podatak za analizu nosivosti grupe elastičnih moždanika usvojena je nosivost jednog moždanika koja je određena u skladu sa odredbama Evrokoda 4. Na dijagramu, slika 2.1., prikazana je nosivost moždanika prečnika $d=16$ mm visine $h_{sc}=100$ mm u funkciji čvrstoće betona.

U zavisnosti od kvaliteta betona i geometrije moždanika, u smičućem spoju između čeličnog profila i betonske ploče pri graničnom opterećenju se može pojaviti jedan od tri karakteristična oblika loma: lom smicanjem moždanika, lom betona ili kombinovani oblik loma koji karakteriše lom betona u zoni oko moždanika uz lom moždanika smicanjem. Ako se usvoji visina moždanika veća od $4.5d$, prema Ollgardu i dr. [41], Pallares i Hajjar [42] i drugoj literaturi, može se smatrati da geometrija moždanika ne utiče dominantno na oblik loma smičućeg spoja koji će se pojaviti. Model loma smičućeg spoja u zavisnosti od kvaliteta betona prema slici 2.1. Pri malim vrednostima karakteristične čvrstoće betona ($f_{ck}<35$ MPa) očekuje se lom betona, dok se za čvrstoće betona veće od $f_{ck}=40$ MPa može očekivati lom smicanjem moždanika. Za

karakterističnu čvrstoću betona oko $f_{ck} = 35.0$ MPa, može se očekivati kombinovani oblik loma, pošto su za ove vrednosti čvrstoće betona na pritisak nosivosti moždanika na smicanje i na pritisak po betonu približno jednake.



Slika 2.1 : Nosivost moždanika u funkciji čvrstoće betona, prema Evrokodu 4

Imajući ovo u vidu odlučeno je da se za monolitizaciju uzoraka u okviru eksperimentalnog dela rada koristi beton upravo kvaliteta $f_{ck}=35$ MPa. Ako se analiziraju eksperimentalna istraživanja koja su navedena uočava se da je korišćen beton u tim studijama viših klasa. Međutim, Evrokoda 4 omogućava da se rezultati i zaključci dobijeni eksperimentalnim putem mogu primeniti i u svim slučajevima kada se koriste betoni viših klasa od one koja je korišćena za formiranje uzoraka. Ova činjenica je još jedan od razloga zašto je odlučeno da se koristi beton niže klase kvaliteta.

Na osnovu vrednosti nosivosti moždanika prema Evrokodu 4 koje su manje od eksperimentalno dobijenih vrednosti i do 20%, uočeno je da postoji mogućnost smanjenja rastojanja između susednih moždnika u vezi. Od svih dostupnih eksperimentalnih ispitivanja samo su Shim C.S. i dr. [45] ispitali uzorke sa grupom moždanika na rastojanjima manjim od $5d$. Ostali autori su istraživanje nosivosti i deformabilnosti, zasnovanih na uzorcima sa standardnim rasporedom moždanika, koji su uglavnom korišćeni za kalibraciju numeričkog modela.

Zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata sa blisko postavljenim moždanicima na rastojanjima manjim od $5d$, odlučeno je da se sopstveno, eksperimentalna istraživanja zasnivaju upravo na uzorcima sa blisko postavljenim moždanicima. Samo jedna serija uzoraka, je izvedena sa standardnim rasporedom moždanika, kao etalon.

Da bi se beton adekvatno ugradio, zbog blisko postavljenih moždanika, korišćen je trofrakcijski beton za monolitizaciju uzoraka. I drugi autori su koristili trofrakcijski beton i u slučaju kada su moždanici izvedeni u standardnom rasporedu.

U literaturi postoje podaci o uticaju armature koja je u betonu ispred moždanika. Pre svega Li An i Cederwall [34] su u okviru svog eksperimentalnog istraživanja analizirali uticaj položaja armature u betonu na nosivost i krutost moždanika u smičućem spoju. Zaključili su da armatura u delu betonskog dela preseka ispred moždanika nema značajan uticaj na nosivost i ponašanje smičućeg spoja. Slične zaključke su izveli i Okada i dr. [40] i Shim C.S. i dr. [45] u svojim studijama.

Jedna grupa uzoraka je izvedena bez armature u delu betonskog elementa za smeštaj moždanika. Cilj ispitivanja ovih uzoraka je da se uoči da li postoje konstruktivna ograničenja. Želelo se proveriti kako će se pri graničnom opterećenju ponašati spoj starog i novog betona kada nisu međusobno povezani armaturom.

U nastavku poglavlja detaljno su opisana eksperimentalna istraživanja. Ispitani su uzorci sa grupama od 4 moždanika prečnika $d=16$ mm visine $h_{sc}=100$ mm. Grupa od četiri moždanika je izabrana na osnovu rezultata analize karakterističnih spregnutih greda u zgradarstvu. U delu 1.7 dokazano je da se sa grupom od četiri moždanika mogu uspešno konstruisati spregnute grede u zgradarstvu raspona 8-12 m.

2.2 Opšte o eksperimentu

Uzorci koji su obuhvaćeni istraživanjem su formirani i ispitivani u skladu sa Aneksom B standarda EN 1994-1-1 [8].



Slika 2.2: Elektrolučno zavarivanje moždanika

Jedan uzorak formiraju: dve montažne armirano-betonske ploče i čelični profil HEB260, sa grupama moždanika. Moždanici sa glavom su zavareni za nožice čeličnog profila, elektrolučnim zavarivanjem (Drawn Arc Stud Welding), slika 2.2. Elektrolučno zavarivanje moždanika se izvodi bez elektroda (dodatnog materijala). Postupak zavarivanja se može podeliti u četiri koraka:

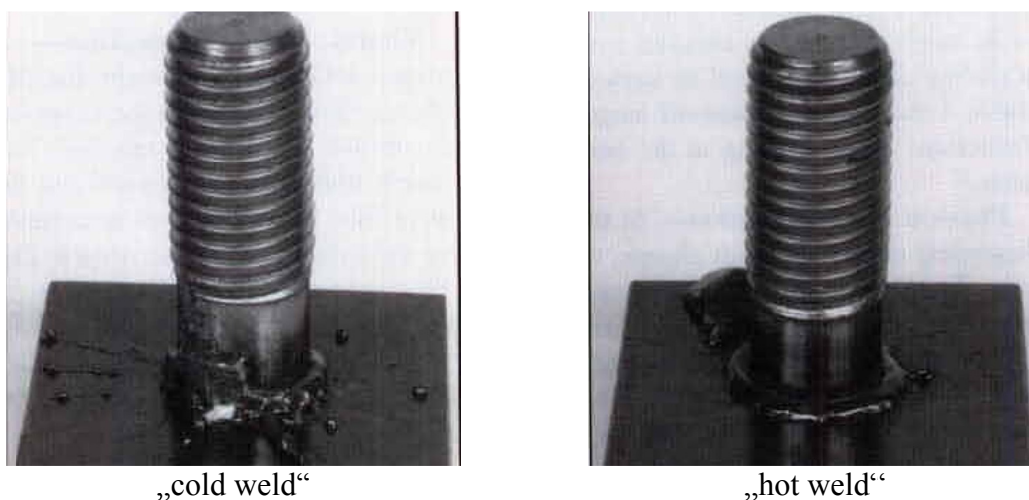
- I Postavljanje moždanika i keramičke čaure u alat (pištolj) i postavljanje pištolja u položaj za zavarivanje na osnovnom materijalu (čeličnom profilu).
- II Rukovalac držeći alat na mestu zavarivanja, startuje zavarivanje, koje se dalje odvija automatski. Pištolj odvaja moždanik od osnovnog materijala, stvarajući zadati zazor između moždanika i osnovnog materijala koji je uslov za formiranje

električnog luka. Električni luk topi deo moždanika u keramičkoj čauri i površinu osnovnog materijala.

III Nakon zadatog vreme za trajanje električnog luka, pištolj automatski potiskuje moždanik ka osnovnom materijalu. Potiskivanjem moždanika ka čeličnom profilu, rastopljeni materijal moždanika i čeličnog profila se mešaju i popunjavaju prostor unutar keramičke čaure i na taj način formiraju šav.

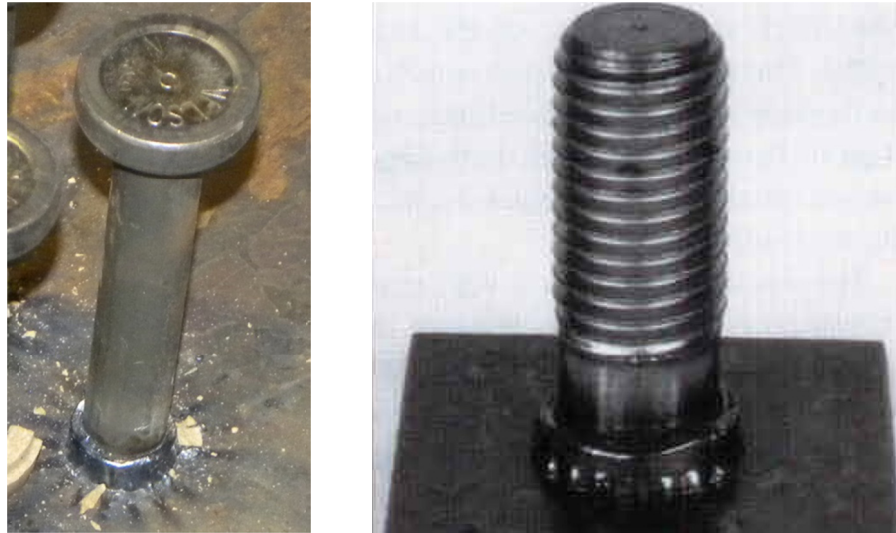
IV Zavarivanje je završeno alat se odiže od čeličnog profila i uklanja se keramička čaura.

Proces zavarivanja je potpuno automatizovan. Rukovalac na alatu (pištolju) zadaje zazor između moždanika i osnovnog materijala. Mali zazor između moždanika i osnovnog materijal, kratko odizanje moždanika, rezultuje greškom „cold weld“. Suprotno veliki zazor pri zavarivanju rezultuje greškom „hot weld“. Primeri loše izvedenog zavarivanja prikazani su na slici 2.3 (preuzeta iz literature Chambers [20]).



Slika 2.3: Loše izvedeno zavarivanje moždanika - greške

Moždanici su zavareni za čelični profil u radionici preduzeća “NB Čelik” u istim uslovima i na isti način kako je to uobičajeno za čelične konstrukcije. Pre početka izrade uzoraka izvršeno je probno zavarivanje moždanika u cilju podešavanja alata i opreme za zavarivanje. Nakon izrade uzoraka (zavarivanja moždanika) izvršena je vizuelna kontrola šavova. Na slici 2.4, prikazani u izvedeni moždanik i slika pravilno izvedenog šava preuzeta iz literature Chambers [20].



Slika 2.4: *a) Izvedeni moždanik, b) ispravan šav (slika preuzeta iz [20])*

Za potrebe istraživanja korišćena su tri tipa montažnih armiranobetonskih ploča (slika 2.9). Montažne ploče su izvedene u pogonu za proizvodnju montažnih armiranobetonskih elmenata kompanije „Gemax“. Ploče su izvedene u uslovima i na način kako je to uobičajeno za armiranobetonske elemente u praksi, bez posebnih zahteva. Izrada armiranobetonskih ploča je prikazana na slikama 2.6 do 2.8.



Slika 2.5: *Čelični profili sa zavarenim moždanicima*



Slika 2.6: *Priprema za betoniranje, detalj armature u montažnoj AB ploči*

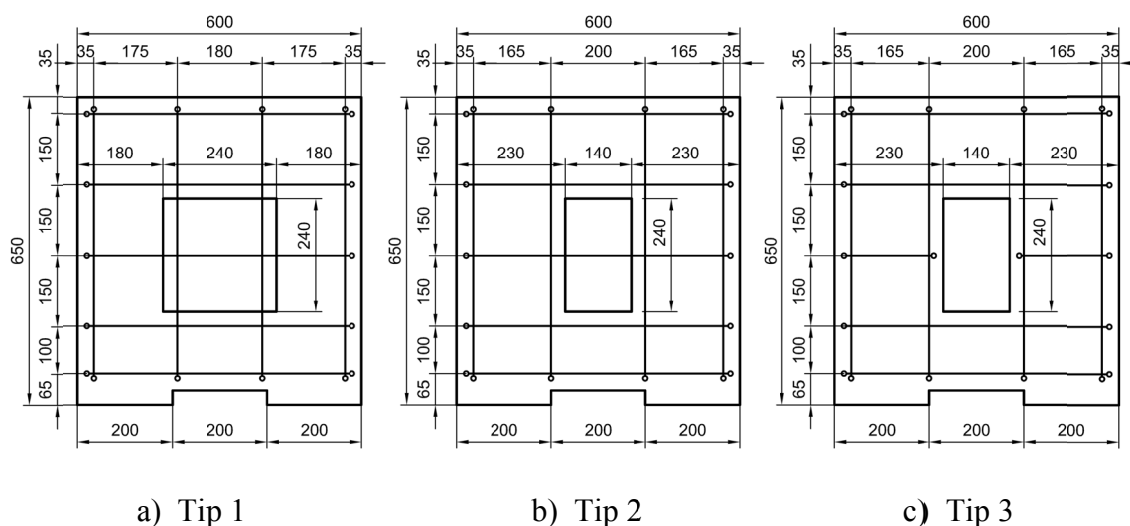


Slika 2.7: *Montažne ploče tokom i neposredno nakon betoniranja*



Slika 2.8: *Montažne armiranobetonske ploče*

Izvedeno je šest serija od po deset ploča, ukupno 60 armiranobetonskih montažnih ploča. Sve korišćene armiranobetonske ploče su standardnih dimenzija 600x650 mm, debljine 120 mm i izvedene su sa otvorom za smeštanje grupe moždanika koji se nalazi približno u sredini ploče. Ploča Tip 1 je standardna, sa otvorom dimenzija 240x240 mm, u svemu prema Aneksu B, Evrokoda 4. Ploča Tip 2 je modifikovana u odnosu na standardnu (Tip 1) tako što je smanjena veličina otvora, koji je u ovom slučaju dimenzija 140x240 mm (Slika 2.9b). Ploča Tip 3 je potpuno istih dimenzija (sa istim otvorom) kao ploča Tip 2, ali sa prekinutom poprečnom armaturom na mestu otvora (Slika 2.9c). Ploče su armirane rebrastom armaturom prečnika 10mm u dva pravca, videti sliku 2.9. Korišćena je armatura kvaliteta B500. Detalji armiranja su izvedeni u svemu prema slici B.1. Aneksa B, Evrokoda 4



Slika 2.9: Tipovi armiranobetonskih ploča

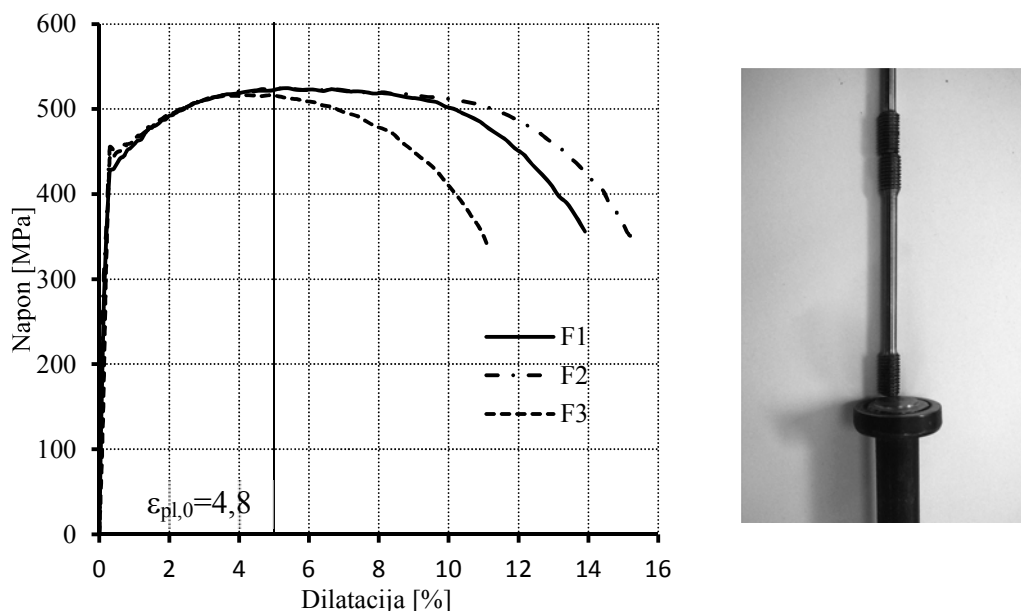
2.3 Materijali

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, izvršene su kontrole kvaliteta i određene su fizičko mehaničke karakteristike materijala, koji su korišćeni za izradu uzoraka. Čelični materijali: konstrukcioni čelik, čelik za armiranje i moždanici sa glavom su ispitani u Laboratoriji za metale, Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Kvalitet betona, armiranobetonskih ploča, kontrolisan je od strane preduzeća „Gemax“, dvadeset osam dana nakon betoniranja. Međutim, fizičko mehaničke karakteristike betona, montažnih ploča, su određene i u Laboratoriji za materijale i konstrukcije

Građevinskog fakulteta, u periodu kada su sprovedena eksperimentalna ispitivanja. U nastavku su prikazani najvažniji rezultati eksperimentalnih ispitivanja kvaliteta i fizičko mehaničkih svojstava korišćenih materijala. Zbog obima rezultata, ovde je prikazan deo rezultata koji je od posebnog interesa za dalje analize koje su prikazane u ovom radu.

2.3.1 Moždanici sa glavom

Prilikom izrade uzoraka u radionici izdvojeno je pet uzoraka moždanika koji su iskorišćeni za određivanje fizičko mehaničkih karakteristika čelika od koga su moždanici izrađeni. Od svakog uzetog moždanika napravljena je po jedna epruveta za ispitivanje materijala na zatezanje. Ispitane epruvete su prečnika 5 mm i dužine 50 mm prema slici 2.10b.



Slika 2.10: a) Dijagrami napon – dilatacija b) Epruveta za ispitivanje

Na slici 2.10a prikazan je dijagram napon – dilatacija za tri ispitane epruvete. Rezultati ispitivanja na zatezanje materijala od koga su napravljeni moždanici sa glavom su prikazani u tabeli 2.1. Korišćeni moždanici su proizvođača „Nelson“. Jedan set za ugradnju formiraju moždanik i keramička čaura, videti sliku 2.2.

Tabela 2.1: Karakteristike čelika za moždanike sa glavom

Uzorak	d [mm]	A [mm ²]	F_{max} [kN]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
F1	4.99	19.5565	10.247	425.56	523.95	205.014
F2	5.00	19.6350	10.287	460.61	523.91	210.443
F3	4.99	19.5565	10.135	444.16	518.22	207.293

2.3.2 Konstrukcioni čelik

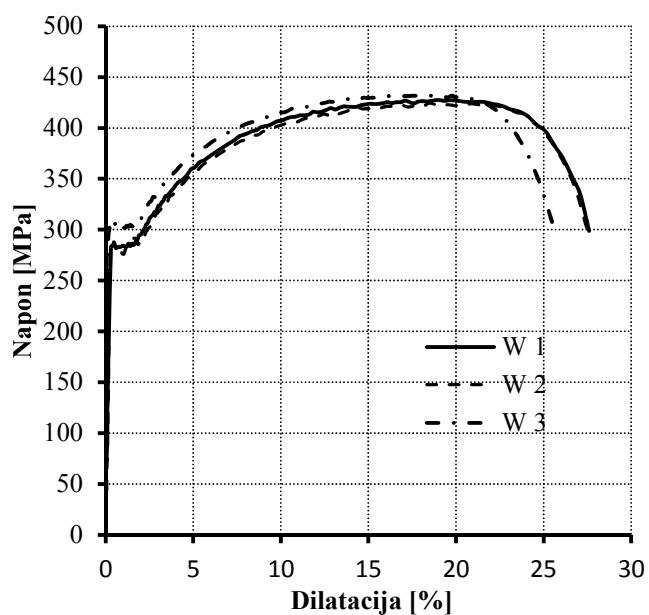
Za izradu uzoraka korišćen je vruće valjani profil HEB 260 od čelika kvaliteta S235JRG2. Kvalitet materijala je potvrđen atestom proizvođača. Svi uzorci su napravljeni iz jednog komada profila ukupne dužine 12,0 m. Izvedeno je ukupno 15 elemenata dužine 700 mm koji su korišćeni za formiranje uzoraka. Ovi elementi su korišćeni i u prvoj i u drugoj fazi eksperimenta. Prilikom izrade u radionici, uzeta su tri uzoraka materijala za proveru fizičko mehaničkih karakteristika, po jedan uzorak iz nožice profila u pravcu valjanja i upravno na pravac valjanja profila. Jedan uzorak materijala je uzet iz rebra profila i to u pravcu valjanja profila. Na slikama 2.11 i 2.12 prikazan je dijagram napon – dilatacija za čelik dobijen ispitivanjem epruveta izrađenih od materijala rebra odnosno nožice profila. Rezultati ispitivanja na zatezanje čelika od koga je izrađen vruće valjani profil dati su u tabelama 2.2 i 2.3.

Tabela 2.2: Karakteristike čelika, epruvete iz rebra profila HEB 260

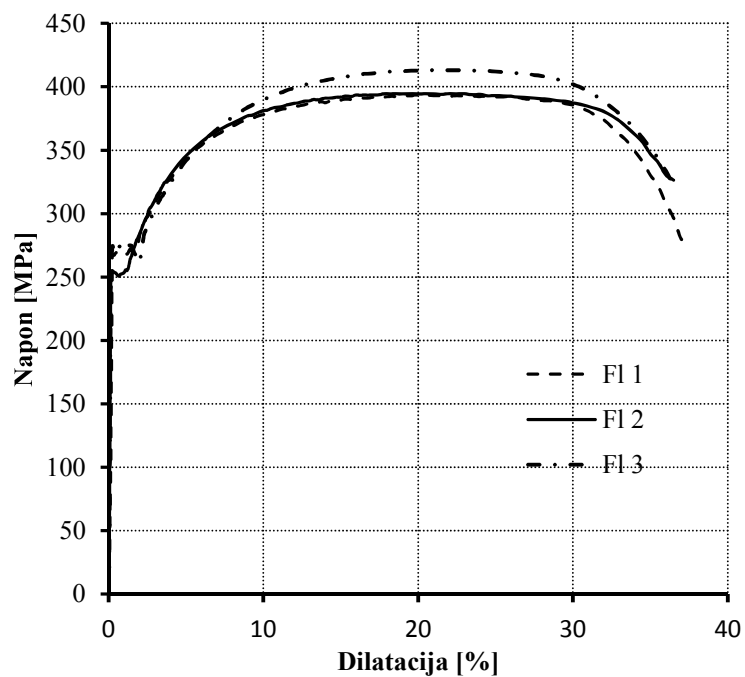
Uzorak	d [mm]	A [mm ²]	F_{\max} [kN]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
W1	5.01	19.7136	8.445	283.19	319.30	203.970
W2	5.00	19.6350	8.322	275.47	291.38	200.953
W3	4.99	19.5565	8.471	300.67	322.48	206.591

Tabela 2.3: Karakteristike čelika, epruvete iz nožica profila u pravcu valjanja

Uzorak	d [mm]	A [mm ²]	F_{\max} [kN]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
Fl 1	7.97	49.8892	19.663	270.21	394.13	200.995
Fl 2	7.94	49.5143	19.575	266.88	395.33	207.353
Fl 3	9.94	77.6002	32.083	274.26	413.44	205.829



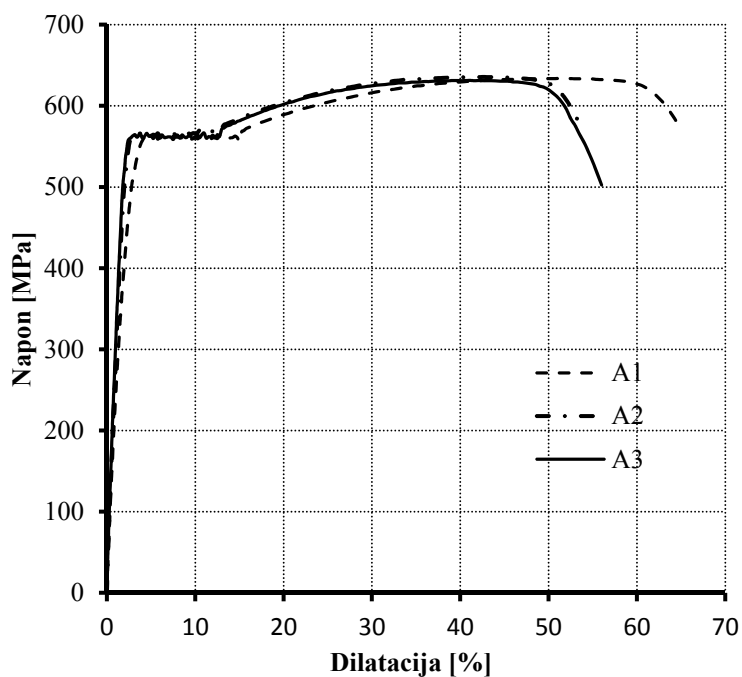
Slika 2.11: a) Dijagrami napon – dilatacija uzorci iz rebra profila,
b) Epruveta za ispitivanje



Slika 2.12: a) Dijagrami napon – dilatacija, uzorci iz nožice profila,
b) Epruveta za ispitivanje

2.3.3 Čelik za armiranje

Korišćeni čelik za armiranje je kvaliteta B500 prečnika 10 mm. Detalji armature su izvedeni u potpunosti prema odredbama Aneksa B, Evrokoda 4. Prilikom izrade armature za montažne ploče u radionici, uzeto je ukupno pet uzoraka za određivanje fizičko mehaničkih karakteristika materijala. Ispitana su tri uzorka. Rezultati, dijagrami napon - dilatacija za ispitane uzorke prikazani su na slici 2.13. Tabela 2.4 prikazuje dobijene vrednosti mehaničkih karakteristika čelika za armiranje.



Slika 2.13: Dijagrami napon – dilatacija čelika za armiranje

Tabela 2.4: Karakteristike čelika za armiranje

Uzorak	d [mm]	A [mm ²]	F_{\max} [kN]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
A1	10	79	50.08	561	633.5	210
A2	10	79	50.2	563.9	635.2	210
A3	10	79	49.15	561.3	631.4	210

2.3.4 Beton

Određivanju fizičko mehaničkih karakteristika betona posvećena je posebna pažnja tokom realizacije eksperimenata. Za izradu armiranobetonskih ploča korišćen je trofrakcijski beton spravljen po recepturi i proceduri fabrike betona u okviru pogona za izradu montažnih armiranobetonskih elemenata preduzeća „Gemax“. Beton koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka je projektovan za potrebe eksperimenta. Izvedene su tri probne mešavine. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja kocki na pritisak probnih mešavina u tri koraka je korigovana mešavina betona. Treća probna mešavina je usvojena i korišćena za izradu betona za monolitizaciju uzoraka u laboratoriji.

2.3.4.1 Beton za izradu montažnih armiranobetonskih ploča

Beton za montažne armiranobetonske ploče je izveden sa trofrakcijskim rečnim agregatom. Imajući u vidu da su ploče izvođene betoniranjem u serijama po deset, u cilju kontrole kvaliteta i određivanja fizičko mehaničkih karakteristika betona, pri betoniranju svake serije napravljeno je po sedam ispitnih uzoraka. Od svake mešavine betona napravljene su: po tri kocke za određivanje čvrstoće na pritisak, dve prizme za određivanje čvrstoće betona na zatezanje savijanjem i dva cilindra za određivanje modula elastičnosti betona.

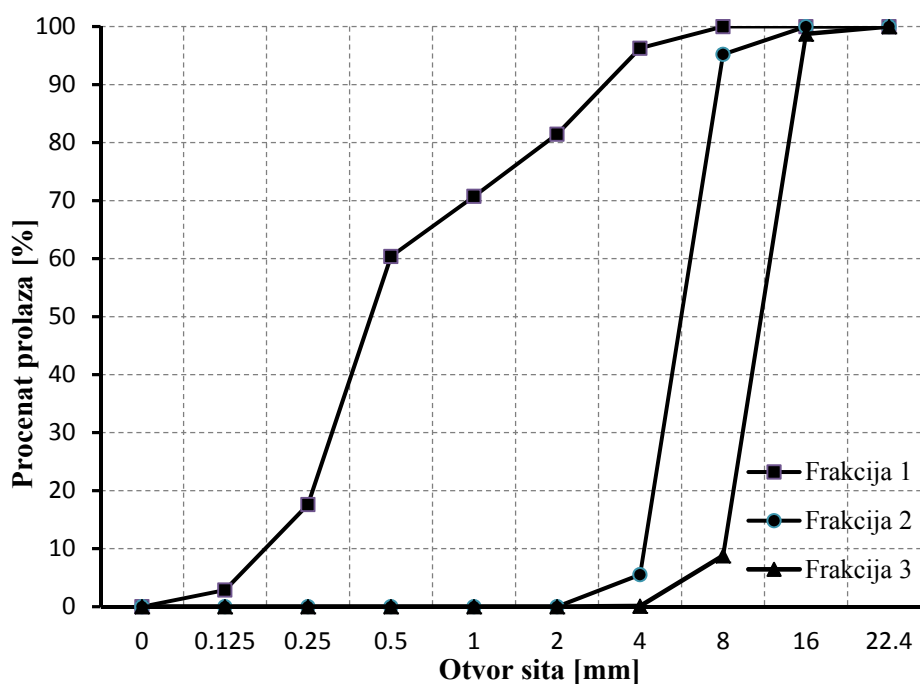
Tabela 2.5: Rezultati ispitivanja uzoraka betona korišćenog za izradu montažnih ploča

	$f_{c,cube}$ [MPa] kocka 15x15x15cm	$f_{ct,fl}$ [MPa] prizma 10x10x40cm	E_{cm} [MPa]	f_c [MPa] cilindar 15x30cm
MPB 1	26.4	4.0	34065*	22.2
24.06.2009.	29.8*	4.3*		
MPB 2	20.7	2.97	35706*	23.7
25.06.2009.	21.3*	3.24*	37838*	23.1
MPB 3	33.1	4.9	35393*	35.1
27.06.2009.	35.2*	5.1*	31285*	30.1
MPB 4	38.4	4.9	28100*	36.2
29.06.2009.	39.1*	5.1*	32610*	30.4
MPB 5	33.8	6.1	30500*	38.7
01.07.2009.	35.4*	5.1*	38450*	39.6
MPB 6	54.2	5.4*	31392*	44.4
03.07.2009.	55.2*	4.6*	38048*	41.9
*) uzorci ispitani na Građevinskom Fakultetu				

Dve kocke i jedna prizma su čuvani u vodi i ispitani dvadeset osam dana nakon betoniranje u Laboratoriji preduzeća „Gemax“. Ostali uzorci su ispitani na Građevinskom fakultetu u isto vreme kada je sprovedeno i eksperimentalno istraživanje nosivosti grupe moždanika. Treća kocka, jedna prizma i jedan cilindar, čuvani su u istim uslovima kao i montažne ploče. Preostali cilindar je čuvan u vodi do trenutka ispitivanja. U tabeli 2.5 prikazani su rezultati dobijeni ispitivanjem uzetih uzoraka.

2.3.4.2 Beton za monolitizaciju uzoraka

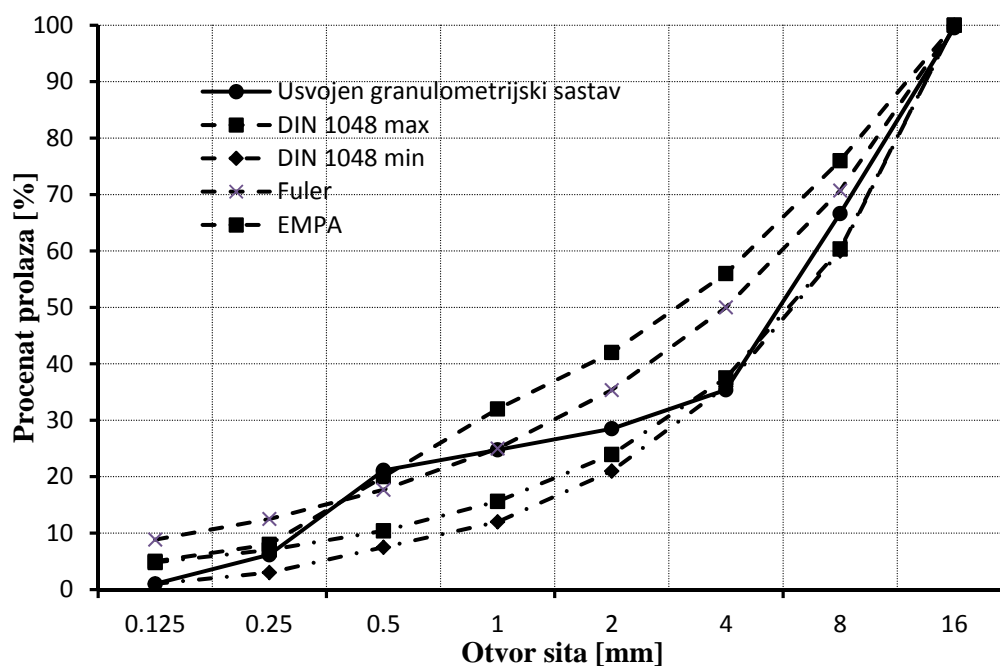
Beton koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka je spravljan u Laboratoriji za materijale i konstrukcije. Korišćen je rečni agregat od tri frakcije sa veličinom zrna agregata: 0-4, 4-8 i 8-16 mm. U cilju definisanja granulometrijskog sastava betona određen je granulometrijski sastava svake frakcije agregata. Rezultati prosejavanja prikazani su na slici 2.14.



Slika 2.14: Granulometrijski sastav frakcija agregata

Pri određivanju granulometrijskog sastava betona kao referentne krive, korišćene su krive: „Fuler“ i „EMPA“. Usvojen granulometrijski sastav agregata je upoređen sa graničnim krivama koje su definisane standardom za ispitivanje betona i

betonskih mešavina DIN 1048 [4]. Granulometrijski sastav mešavine agregata je prikazan na slici 2.15.



Slika 2.15: Granulometrijski sastav usvojene mešavine agregata

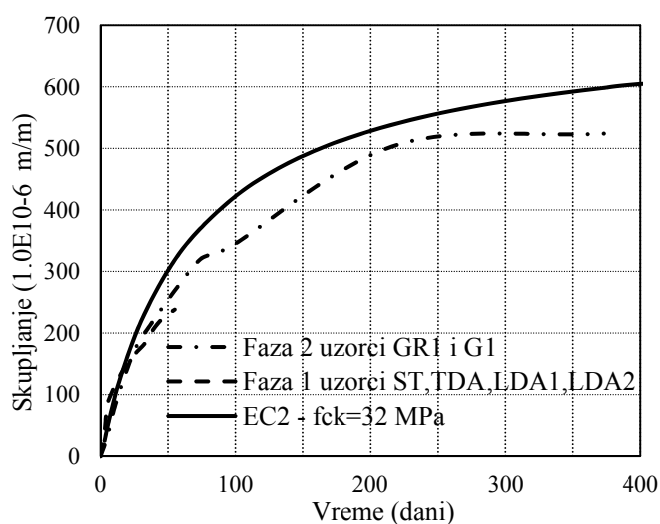
Za izradu betona za monolitizaciju uzoraka korišćen je cement PC 20M(S-L) 42.5R proizvođača „LAFARGE“ iz Beočina. Jedan od postavljenih ciljeva pri projektovnju mešavine betona je i da se dobije beton sa redukovanim vrednostima skupljanja. U cilju smanjivanja vrednosti dilatacija skupljanja, u mešavinu su uključeni i dodaci: CONTROL 40 i VISCONCRETE 1020X proizvođača „Sika“. Dodatak CONTROL 40 redukuje vrednosti dilatacije skupljanja betona koje su posledica očvršćavnja i sušenja betona. Smanjene vrednosti skupljanja se mogu postići i smanjivanjem količine vode u mešavini betona, odnosno smanjivanjem vodocementnog faktora. Zbog potrebe za dobrom ugradljivošću betona, da bi se izbegla kruta konzistencija koja je posledica smanjene količine vode, u mešavinu je uključen i superplastifikator VISCONCRETE 1020x. Usvojena mešavina betona koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka je prikazana u tabeli 2.6.

Primenom aditiva za redukciju skupljanja betona dobijene su dilatacije skupljanja koje su 20% manje od proračunskih verednosti prema Evrokodu 2 [7]. Merenjem vrednosti skupljanja na kontrolnim prizmama, videti sliku 2.16b, dobijene su dilatacije skupljanja od 250×10^{-6} , za starost betona od 45 dana pri temperaturi vazduha

od 20-25 °C i relativnoj vlažnosti sredine od 23±2%. Na dijagramu, slika 2.16a, prikazane su vrednosti dilatacije skupljanja praćene u periodu od 365 dana nakon betoniranja uzoraka u laboratoriji.

Tabela 2.6: Komponente u mešavini betona, usvojene vrednosti

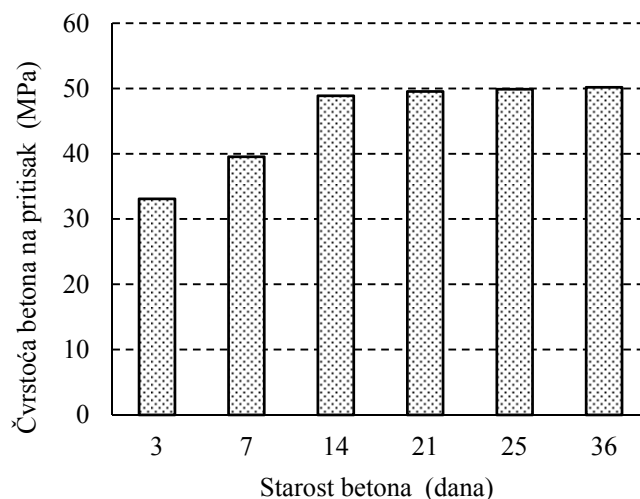
Komponente mešavine [kg/m ³]						
Cement	Voda	Rečni agregat			Dodaci betonu – aditivi	
		Frakcija I	Frakcija II	Frakcija III		
		0-4	4-8	8-16	CONTROL 40	VISCONCRETE 1020X
320	162	822	478	611	6.4	1.92



Slika 2.16: a) Dilatacija skupljanja betona kroz vreme,
b) Prizma sa opremom za praćenje skupljanja

Betoniranje pri spajanju ploča sa čeličnim profilom je vršeno u horizontalnom položaju. Treći dan nakon betoniranja jedne strane uzorka, uzorci su okretani i betonirna je druga strana uzorka. Projektovani beton sa cementom 42,5R je postizao punu projektovanu čvrstoću 14 dana nakon betoniranja, slika 2.17. Uzorci su ispitivani 25 dana nakon betoniranja druge strane, odnosno 28 dana nakon betoniranja prve strane uzorka. Da bi se procenila eventualno postojanje razlike u čvrstoći betona za monolitizaciju jedne i druge strane uzorka, kontrolisan je i prirast čvrstoće betona kroz

vreme. Dijagram čvrstoće betona u funkciji starosti betona, slika 2.17, pokazuje da je prirast čvrstoće betona nakon četrnaestog dana jako spor i može se zanemariti sa stanovišta ekperimentalnog ispitivanja uzoraka za određivanje nosivosti moždanika.



Slika 2.17: Prirast čvrstoće betona kroz vreme

Prilikom monolitizacije uzoraka iz svake mešavine uzeti su uzorci za kontrolu kvaliteta materijala i određivanje fizičko mehaničkih karakteristika betona. U tabelama 2.7 i 2.8 prikazane su dobijene vrednosti čvrstoća na pritisak, zatezanje i modula elastičnosti betona koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka.

Tabela 2.7: Rezultati ispitanih uzoraka betonskih mešavina - prva faza ispitivanja

	$f_{c,cube}$ [MPa] kocka 15x15x15cm 28 dana	$f_{ct,fl}$ [MPa] prizma 12x12x36cm 28 dana	E_{cm} [MPa] 180 dana	f_c [MPa] cilindar 15x30cm 180 dana
MB 11	44.2	4.4		
	44.6			
MB 12	39.2	3.9	34982	46,9
MB 13	39.2	4.06	34778	51,3
			36878	49,6
MB 14	44.2	3.9	38163	48,9
MB 15	48.7	4.5		
	48.3	3.9		
MB 16	45.8	4.06	34778	48,9
			38480	42,3
Srednja vrednost	44,30	4,10	36343	47.9

Tabela 2.8: Rezultati ispitanih uzoraka betonskih mešavina - druga faza ispitivanja

	$f_{c,cube}$ [MPa] kocka 15x15x15cm 28 dana	$f_{ct,fl}$ [MPa] prizma 12x12x36cm 28 dana	E_{cm} [MPa] 28 dana	f_c [MPa] cilindar 15x30cm 28 dana
MB 21	36.9	3.75	35384	41.9
	41.8	3.90	35182	40.3
MB 22	37.3	3.91		
	40.9			
MB 23	43.5	3.75	36431	40.7
			32924	35.3
MB 24	44.4	5.16		
	42.7	5.16		
Srednja vrednost	41,07	4,27	34980	39.5

2.4 Tipovi ispitanih uzoraka

Eksperimentalno istraživanje je obuhvatilo: uzorke sa standardnim rasporedom moždanika i pet serija uzoraka sa grupama moždanika. Svi uzorci su izvedeni sa ukupno 8 moždanika, po četiri moždanika sa svake strane uzorka. Korišćeni su moždanici prečnika $d=16,0$ mm i visine nakon zavarivanja $h_{sc}=100$ mm. Montažne ploče i čelični profili sa moždanicama koji su u radionici zavareni za čelični profil, spajani su u Laboratoriji za materijale. Postupak ispitivanja je dat u nastavku ovoga poglavlja

2.4.1 Geometrija uzoraka ispitanih u prvoj fazi eksperimenta

Kao što je prethodno rečeno u prvoj fazi eksperimenta, ispitano je dvanaest uzoraka:

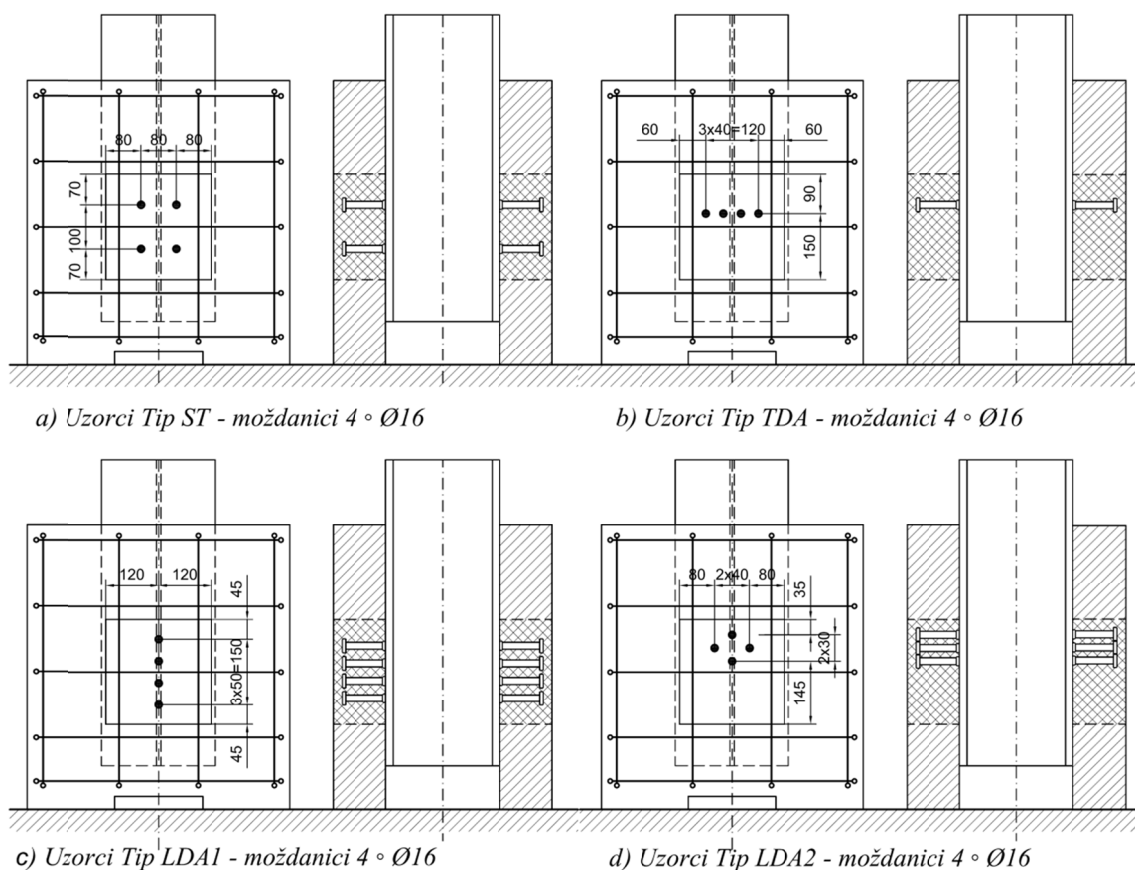
ST (standardni uzorak) - sa grupom od četiri moždanika u rasporedu koji je u potpunosti u skladu sa odredbama Aneksa B, Evrokoda 4. (slika 2.18).

TDA - uzorak sa grupom od četiri moždanika u redu. Moždanici su postavljeni u redu, na međusobnom rastojanju 40 mm, upravno na pravac delovanja sile. (slika 2.18). Rastojanje između susednih moždanika je jednako minimalnom propisanom rastojanju moždanika $2,5d$ upravno na pravac delovanja smičuće sile.

LDA1 – uzorak koji je obuhvatio slučaj kada su četiri moždanika postavljena u jednom redu u pravcu delovanja sile. U ovom slučaju dva susedna moždanika su postavljena na međusobnom rastojanju od 50mm ($\approx 3d$). Usvojeno rastojanje je manje od minimalno propisanog rastojanja $5d$.

LDA2 - Poslednja grupa moždanika na uzorcima LDA2 je izvedena sa rombičnim rasporedom četiri moždanika, pri čemu su rastojanja u pravcu delovanja opterećenja manja od standardom propisanih rastojanja (slika 2.9c). U ovom slučaju, rastojanja između susednih moždanika u pravcu smičuće sile su $\approx 3,8d$ što je manje od propisanih, dok je za razmak redova moždanika upravo na pravac sile usvojeno minimalno rastojanje $2,5d$. Na ovaj način je dobijena jako kompaktna grupa, malih dimenzija.

Geometrija (raspored) svih analiziranih grupa moždanika je prikazana na slici 2.18.



Slika 2.18: Geometrija uzoraka prve faze ispitivanja

2.4.2 Geometrija uzoraka ispitanih u drugoj fazi eksperimenta

Dobijeni rezultati prve faze istraživanja, pokazali su, da vrednosti granične nosivosti ispitanih uzoraka ne odstupaju od dobijenih vrednosti granične nosivosti standardnog uzorka (ST) koji je usvojen kao referentni. Nosivost uzoraka ST, TDA i LDA2 su približno jednake, što je i očekivano, imajući u vidu da rastojanja između moždanika u slučaju uzoraka TDA ne odstupaju od odredbi standarda Evrokoda 4. Merene vrednosti granične nosivosti uzoraka LDA2 su veće od prosečne vrednosti granične nosivosti uzoraka ST i TDA.

Međutim, u slučaju uzoraka tipa LDA1 merene vrednosti su se međusobno razlikovale. Naime, i maksimalna i minimalna izmerena vrednost granične nosivosti, uzimajući u obzir sve uzorke prve faze, su pripadale uzorcima serije LDA1.

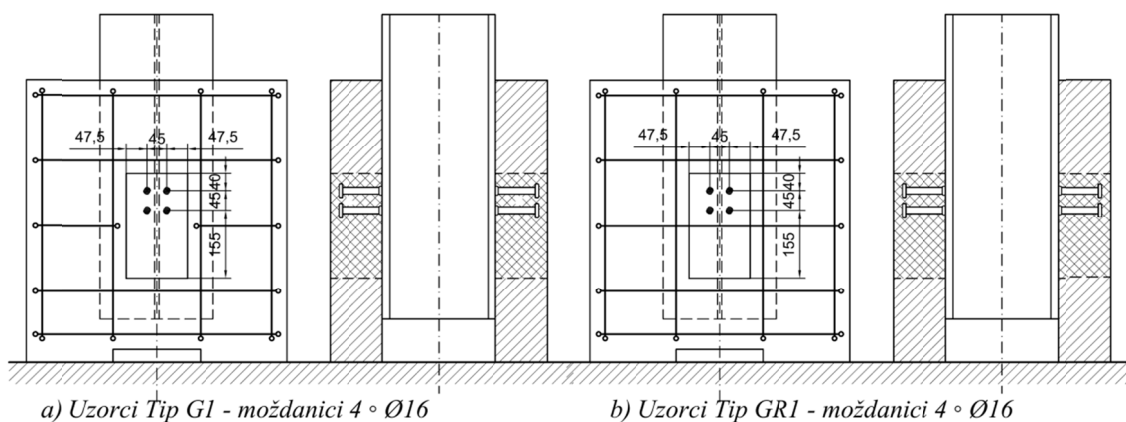
Nakon sagledavanja dobijenih rezultata prve faze eksperimentalnog istraživanja, planirana je druga faza. Drugom fazom istraživanja obuhvćene su dve nove dispozicije grupa moždanika:

G1 - uzorci sa grupom od četiri moždanika (slika 2.19a), sa rastojanjima između susednih moždanika 45 mm ($<3d$). Ovi uzorci su izvedeni sa montažnim pločama Tip 3 koje su bez poprečne armature u zoni ploče u kojoj se nalaze moždanici.

GR1 - uzorci sa grupom od četiri moždanika (slika 2.19b). Ovi uzorci su kao i prethodni, uzorci G1, izvedeni sa rastojanjima između susednih moždanika 45 mm ($<3d$). Ovi uzorci su izvedeni sa montažnim pločama Tip 2 koje imaju standardnu dispoziciju armature unutar montažne armiranobetonske ploče.

Pošto su dobijene vrednosti granične nosivosti uzoraka u prvoj fazi eksperimenta bile veće od očekivanih, u drugoj fazi rastojanja između susednih moždanika u grupama GR1 i G1 su smanjena na 45 mm ($<3d$). Imajući u vidu da je lom smicanjem moždanika bio merodavan kod svih ispitanih uzoraka prve faze istraživanja, za uzorke druge faze je, umesto betona čvrstoće $f_{ck}=35$ MPa, za monolitizaciju uzoraka korišćen beton nešto niže čvrstoće na pritisak (videti tabele 2.7 i 2.8). U drugoj fazi jedan od postavljenih ciljeva je bio i da se eksperimentalno proveru u

kolikoj meri armatura u zoni ploče neposredno ispred moždanika utiče na graničnu nosivost grupe moždanika.



Slika 2.19: Geometrija uzoraka, druga faza ispitivanja

2.5 Postupak formiranja uzoraka

Uzorci su formirani u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta. Nakon postavljanja montažnih AB ploča u tačno definisan položaj vršeno je betoniranje otvora u pločama. Pre betoniranja površina čeličnog profila je premazana uljem, kako bi se eliminisalo prijanjanje između betona za monolitizaciju i čeličnog profila. Neposredno pre monolitizacije, površine montažnih ploča koje su u direktnom kontaktu sa svežim betonom su tretirane premazom za kontaktne spojeve starog i novog betona.



Slika 2.20: Priprema uzoraka u laboratoriji pre monolitizacije

Nakon betoniranja prve strane uzorka, beton je negovan 48 sati. Trećeg dana nakon betoniranja prve strane, uzorci su okretani i betonima je druga strana uzoraka. (videti slike 2.20 i 2.21).



Slika 2.21: Nanošenje premaza za kontakt starog i novog betona, betoniranje uzorka

Svi ispitani uzorci sa navedenom serijom montažnih ploča (prema tabeli 2.5) i brojem mešavine betona za monolitizaciju (prema tabelama 2.7 i 2.8) su navedeni u tabelama ispod.

Tabela 2.9: Ispitani uzorci u prvoj seriji

Uzorak	Serijska montažne ploče	Tip montažne ploče	Beton za monolitizaciju
ST-a	MPB2	TIP 1	MB11 / MB14
ST-b	MPB1	TIP 1	MB11 / MB14
ST-c	MPB2	TIP 1	MB11 / MB15
TDA-a	MPB2	TIP 1	MB12 / MB15
TDA-b	MPB2	TIP 1	MB13 / MB16
TDA-c	MPB2	TIP 1	MB11 / MB16
LDA2-a	MPB1	TIP 1	MB12 / MB15
LDA2-b	MPB1	TIP 1	MB12 / MB14
LDA2-c	MPB4	TIP 1	MB13 / MB15
LDA1-a	MPB1	TIP 1	MB13 / MB14
LDA1-b	MPB1	TIP 1	MB13 / MB15
LDA1-c	MPB4	TIP 1	MB12 / MB16

Tabela 2.10: *Ispitani uzorci u drugoj seriji*

Uzorak	Serijska montažna ploča	Tip montažne ploče	Beton za monolitizaciju
G1-a	MPB6	Tip 3	MB22 / MB23
G1-b	MPB6	Tip 3	MB22 / MB24
G1-c	MPB6	Tip 3	MB22 / MB24
G1-d	MPB6	Tip 3	MB21 / MB23
GR1-a	MPB5	Tip 2	MB21 / MB23
GR1-b	MPB5	Tip 2	MB21 / MB24
GR1-c	MPB5	Tip 2	MB22 / MB24
GR1-d	MPB5	Tip 2	MB21 / MB24
LDA1-d	MPB3	Tip 1	MB21 / MB23
LDA1-e	MPB3	Tip 1	MB21 / MB23

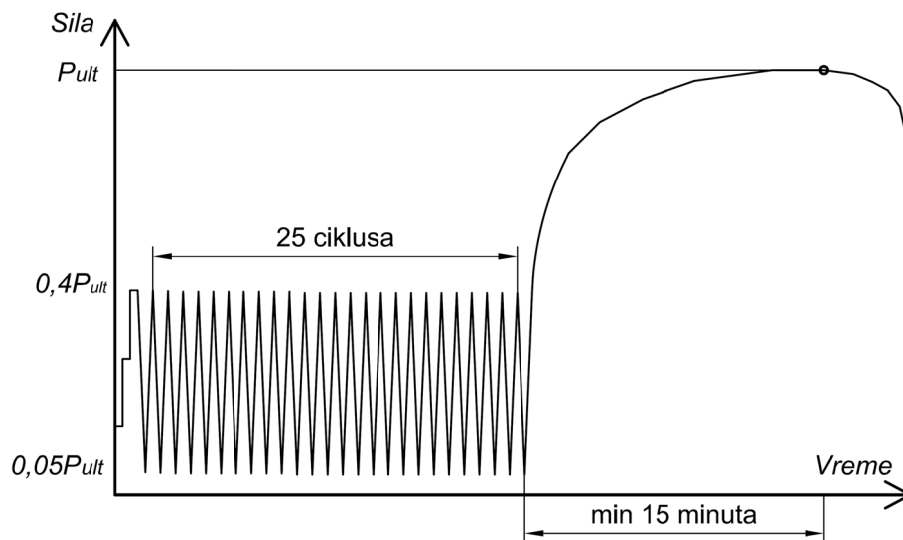
2.6 Postupak ispitivanja

Ispitivanja uzoraka su sprovedena u periodu jul 2010. godine. Uzorci prve serije su ispitani 45, odnosno 42 dana nakon betoniranja. Uzorci druge serije su ispitani 28, odnosno 31 dan nakon betoniranja. Na dijagramu, slika 2.17, pokazano je da je prirast čvrstoće betona nakon 14 dana mali. Imajući ovo u vidu, jasno je da je 28 dana, nakon betoniranja druge strane uzorka, razlika u čvrstoćama na pritisak betona za monolitizaciju, sa aspekta starosti betona zanemariva. Vertikalna sila je nanošena pomoću prese kapaciteta 3500 kN kontrolisanom deformacijom. Presa je prikazana na slici 2.22. Ispitivanje uzorka se sprovodi u dve faze.



Slika 2.22: *Uzorak spreman za ispitivanje*

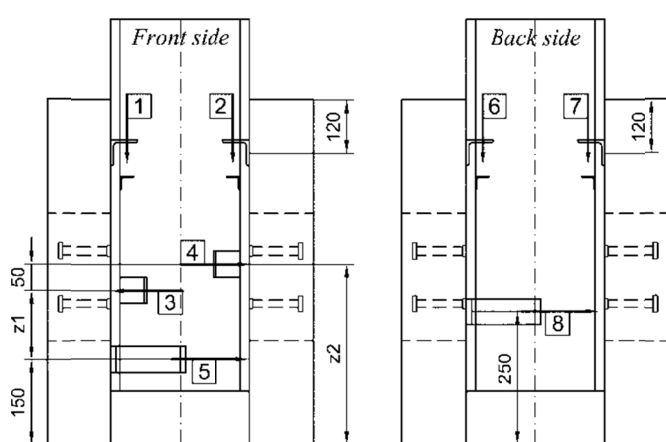
U prvoj fazi ispitivanja uzoraka vršeno je njihovo treniranje. Opterećenje je nanošeno u 26 ciklusa. U prvom ciklusu opterećenje je nanošeno inkrementalno u tri koraka po 90 kN do sile od 270 kN, što je oko 40% od očekivane vrednosti sile loma. Zatim je uzorak rasterećen do 32 kN, što odgovara vrednosti od oko 5% od očekivane vrednosti sile loma. Preostalih 25 ciklusa je podrazumevalo opterećenje uzorka do 270 kN i rasterećenje uzorka do 32 kN. Nakon poslednjeg ciklusa faze treniranja, odmah se nastavlja sa drugom fazom ispitivanja uzorka do loma. Opterećenje je nanošeno kontinualno do loma, pri čemu se vodilo računa da do loma uzorka dođe za 20-25 minuta od početka nanošenja opterećenja. Grafički prikaz opterećenja i rasterećenja uzorka tokom trajanja ispitivanja prikazan je na slici 2.23.



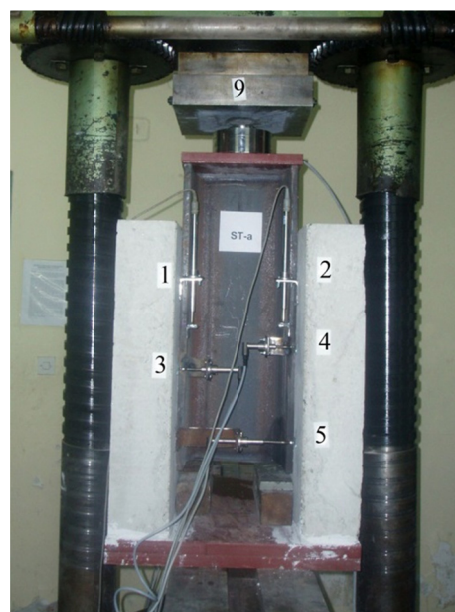
Slika 2.23: Šema opterećenja uzorka tokom ispitivanja

Da bi se umanjili ekscentriciteti, kao i da bi se obezbedilo dobro naleganje uzorka na presu, uzorak je pri montiranju na postolje prese postavljan u sloj svežeg gipsa. Gornja strana čeličnog profila preko koje se nanosi opterećenje, obrađena je tako da se ostvari idealno ravna površina. Oslanjanje gornje strane čeličnog profila na presu je preko sferičnog ležišta. Sila je praćena na kontrolnom pultu prese i pomoću dozne za merenje sile pritiska proizvođača "Hottinger" opsega do 1000 kN. Tokom ispitivanja kontinualno je praćeno pomeranje čeličnog profila u odnosu na betonsku ploču u četiri tačke, u dve tačke na svakoj betonskoj ploči, LVDT senzorima (br. 1, 2, 6, 7 sa slike 2.24). Takođe je kontinualno praćeno i poprečno pomeranje (odvajanje) betonskih ploča od čeličnog profila u dve tačke (LVDT senzori br. 3 i 4). Položaj mernih mesta 3 i 4 je

približno na mestu grupe moždanika. Tokom ispitivanja praćeno je horizontalno razmicanje betonskih ploča. Jedan senzor za praćenje razmicanja ploča postavljen je približno na mestu grupe moždanika (senzor 8) dok je drugi, senzor broj 5, postavljen na 15 cm od donje ivice uzorka. Šema mernih mesta prikazana je na slici 2.24. Pomeranja su praćena induktivnim ugibomerima "Hottinger". Snimanje podataka je raćeno kontinualno pomoću akvizicionog urećaja MGC+ "Hottinger" sa frekvencijom snimanja podataka od 0,5Hz ili 1,0 Hz.



- 1,2,6,7 – LVDT sensor - vertikalno pomeranje
- 3,4 – LVDT sensor za praćenje odvajanja betonske ploče od čelićnog profila
- 5,8 – LVDT sensor za praćenje razmicanja betonskih ploča



Slika 2.24: a) Raspored mernih mesta, b) Uzorak na presi sa mernom opremom

3. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

U ovom delu rada prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja. U drugom delu poglavlja analizirani su rezultati i data su zapažanja o ponašanju uzorka pri opterećenju do loma. Rezultati su prikazani za kompletne uzorke, dok će se kasnije u analizi rezultata preći na vrednosti koje odgovaraju grupi moždanika. Takođe, dobijene vrednosti granične nosivosti grupe su upoređene sa preporukama za nosivost grupe moždanika koje su dali Okada i dr. [40].

3.1 Prikaz rezultata ispitivanja

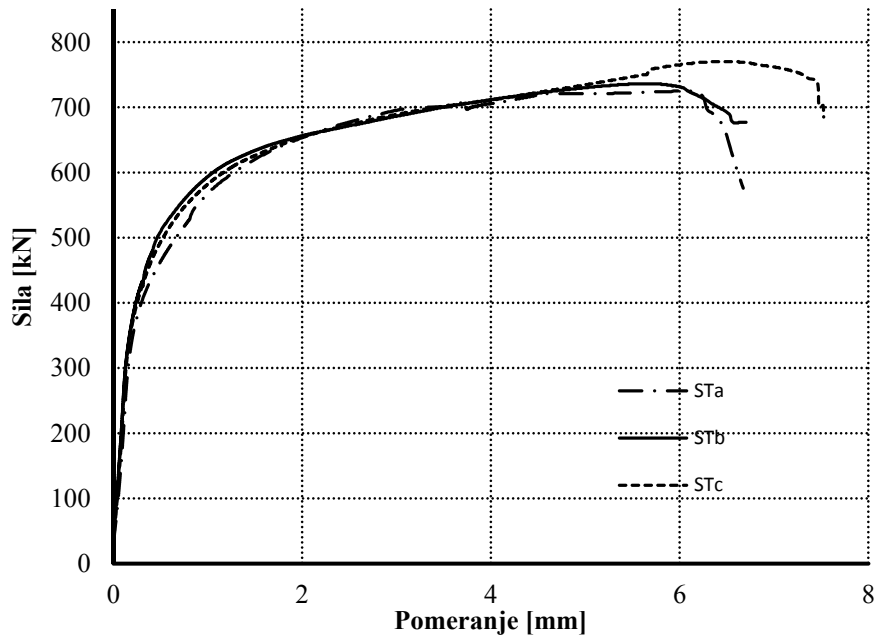
Granična nosivost uzorka, dijagram sila – pomeranje u podužnm smičućem spoju, kao i vrednost klizanja koja odgovara graničnoj nosivosti su osnovni podaci. Međutim, bitno je analizirati i ponašanje, klizanje podužnog spoja pri vrednostima opterećenja koja odgovaraju graničnom stanju upotrebljivosti. Prema Evrokodu 4 klizanje koje odgovara opterećenju pri graničnom stanju upotrebljivosti je klizanje pri opterećenju od $0,7P_{ult}$ (70% vrednosti granične nosivosti). Za sve tipove ispitanih grupa moždanika, za vrednost klizanja podužnog smičućeg spoja, koja odgovara graničnom stanju upotrebljivosti usvojena je vrednost klizanja spoja pri opterećenju uzorka od 500 kN. Sračunata je tangencijalna krutost ϕ_{tan} (početna krutost) za sve ispitane uzorke i data je u tabelama. Pored merenih vrednosti i izvedenih rezultata dat je i izbor iz fotodokumentacije: fotografije ploča nakon ispitivanja kao i poprečni presek ploče neposredno uz grupu moždanika.

U tabealama 3.1 do 3.6 su pored navedenih vrednosti prikazani još i:

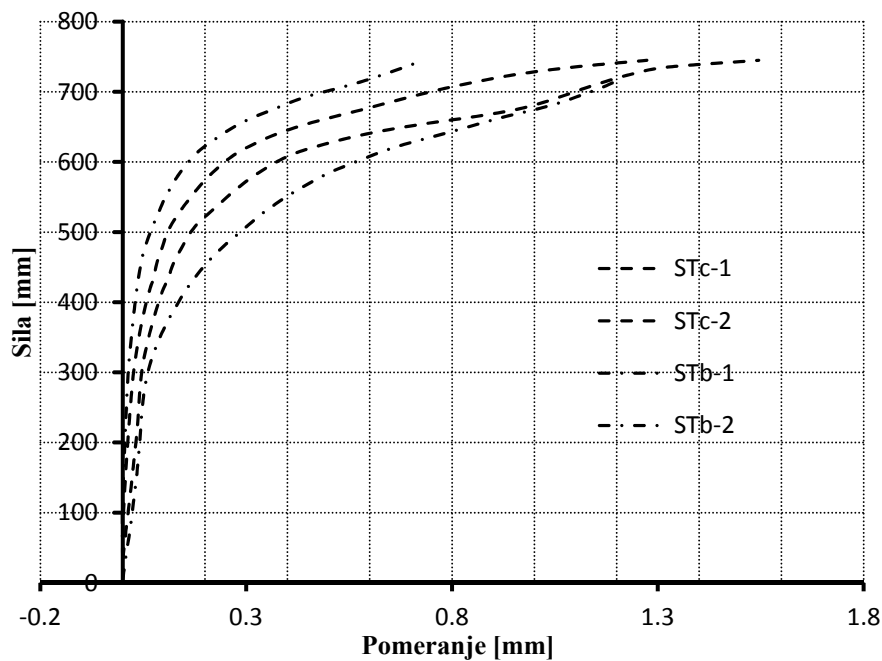
- čvrstoća betona pri pritisku korišćenog za monolitizaciju,
- granična nosivost uzorka P_{ult} koja odgovara dvostrukoj vrednosti nosivosti na smicanje jedne grupe moždanika i
- vrednost maksimalnih merenih pomeranja δ_{max} u podužnom spoju, (srednja vrednost četiri merne vrednosti, po dva za svaku montažnu ploču, videti dispoziciju mernih mesta, slika 2.24).

3.1.1 Standardni uzorci - ST

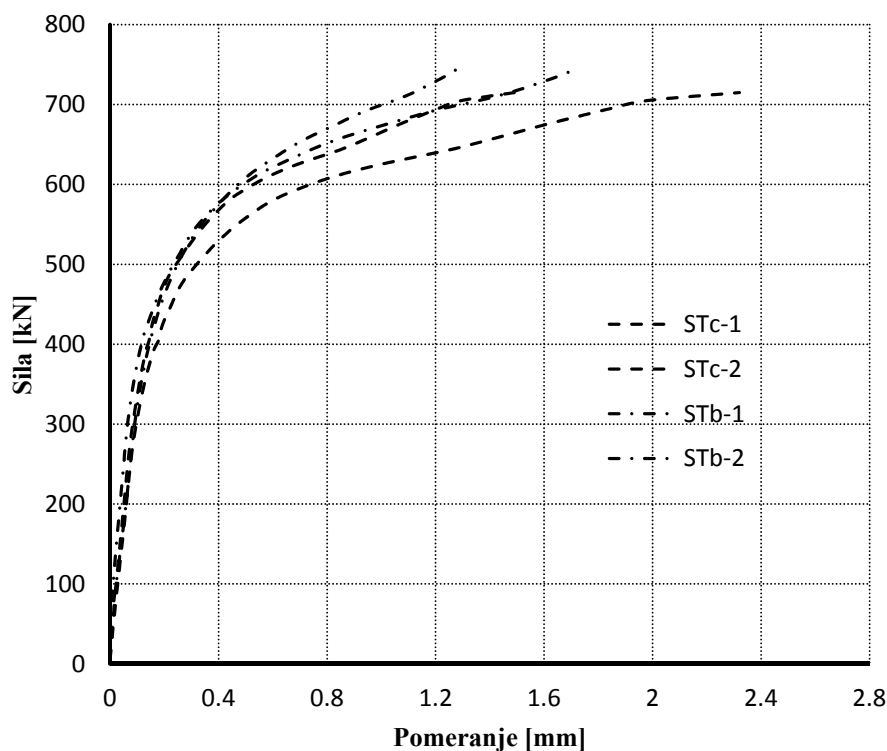
Ispitano je ukupno 3 uzorka. Vrednost čvrstoće pri pritisku betona za monolitizaciju je $f_{ck}=34\text{MPa}$. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3.1 i na dijagramima slike 3.1 do 3.3.



Slika 3.1: Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju



Slika 3.2: Dijagrami sila – odvajanje AB ploče od čeličnog profila



Slika 3.3: Dijagram sila – razmicanje AB ploča

Tabela 3.1: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja – uzorci ST

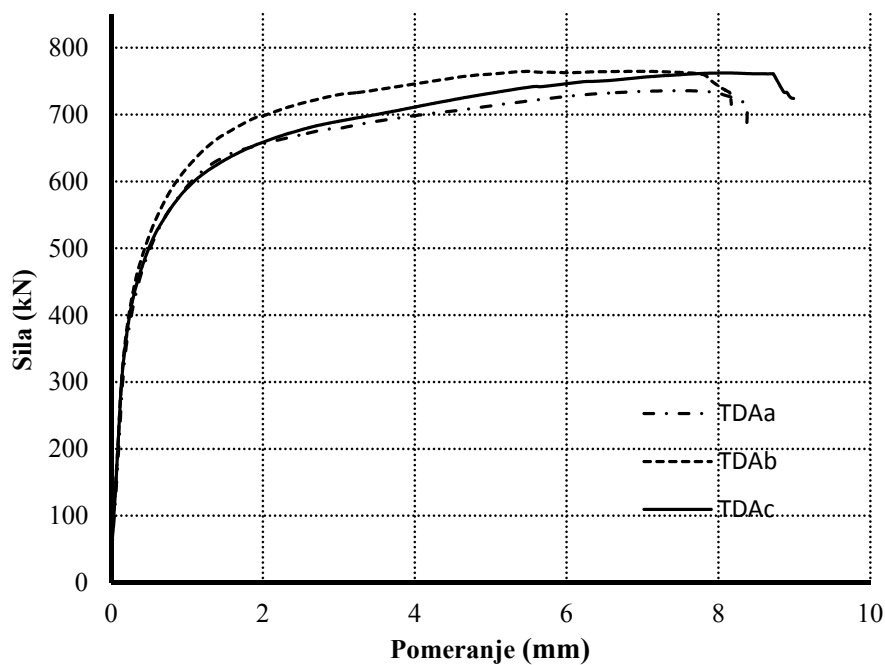
Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{tan} [GPa]
ST a	44.4 / 44.2	34.0	36800	776.8	7.54	0.64	20.1
ST b	44.4 / 44.2	34.0	36800	737.0	5.80	0.47	24.4
ST c	44.4 / 48.6	34.0	36800	770.8	6.60	0.52	22.4

Vrednosti merenja i dobijeni rezultati, poslužili su kao referentne vrednosti za analizu nosivosti ispitanih grupa moždanika.

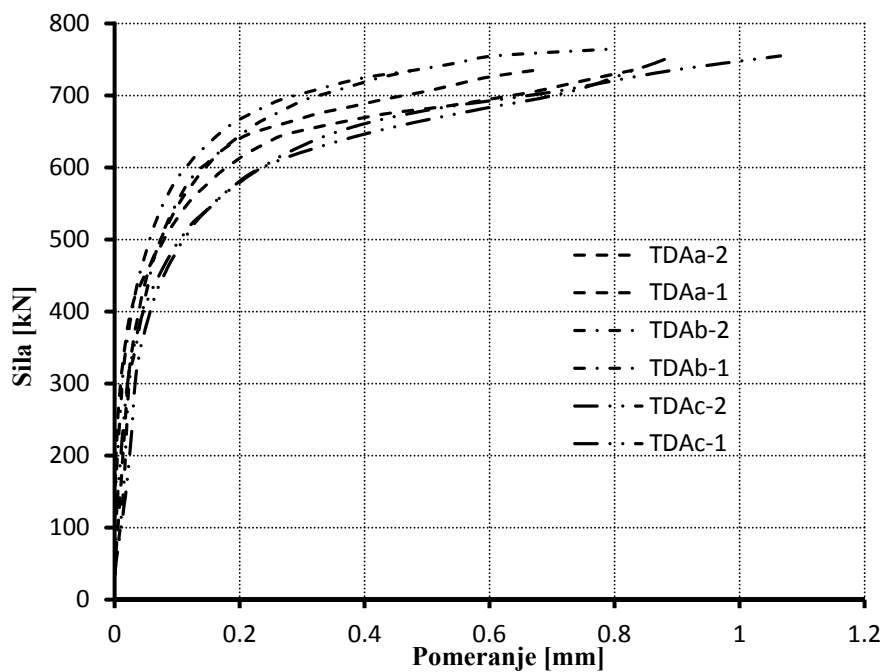
3.1.2 Grupa moždanika – uzorci TDA

Ovu grupu karakterišu 15 % veća pomeranja u podužnom smičućem spoju u poređenju sa standardnim testom. Dobijene vrednosti granične nosivosti su očekivane i ne razlikuju se od merenih vrednosti uzoraka ST. Na dijagramima 3.4 do 3.6 i u tabeli 3.2 prikazani su eksperimentalni rezultati. Razmicanje montažnih AB ploča kao i odvajanje ploče od čeličnog profila je isto kao za uzorke tipa ST. Rezultate razmicanja

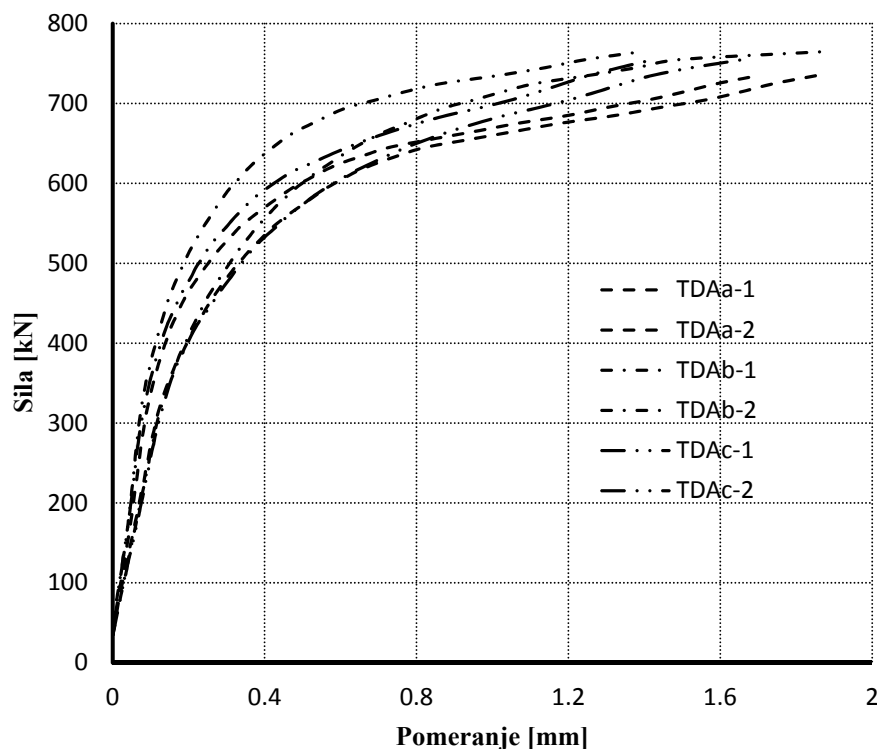
ploča, uzoraka TDA, karakterišu manje razlike između merenih vrednosti na različitim uzorcima nego što je to slučaj sa uzorcima ST.



Slika 3.4: Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju



Slika 3.5: Dijagrami sila – odvajanje AB ploče od čeličnog profila



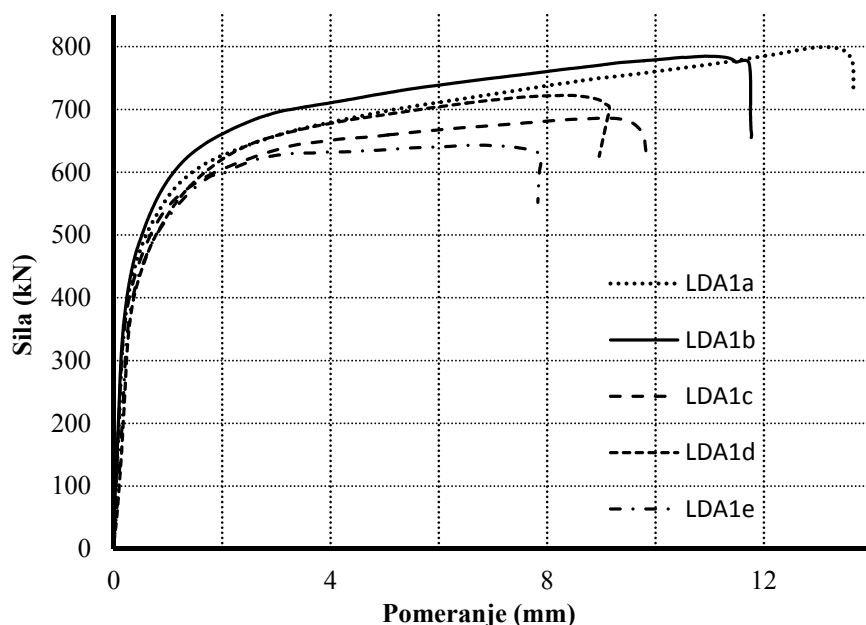
Slika 3.6: Dijagrami sila – razmicanje AB ploča

Tabela 3.2: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja – uzorci TDA

Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{an} [GPa]
TDA a	44.2 / 48.5	34.0	36800	735.6	7.76	0.52	19.8
TDA b	44.2 / 48.5	34.0	36800	764.7	7.27	0.45	22.4
TDA c	39.2 / 44.8	31.0	36800	762.2	8.22	0.49	22.2

3.1.3 Grupa moždanika - uzorci LDA1

Grupu uzoraka LDA1 sa četiri moždanika sa glavom postavljena u redu, u pravcu delovanja sile prilikom ispitivanja, karakterisalo je najveće rasipanje rezultata. Beton za monolitizaciju uzoraka LDA1d i LDA1e je imao nižu vrednost čvrstoće pri pritisku pa su i očekivane nešto niže vrednosti granične nosivosti.

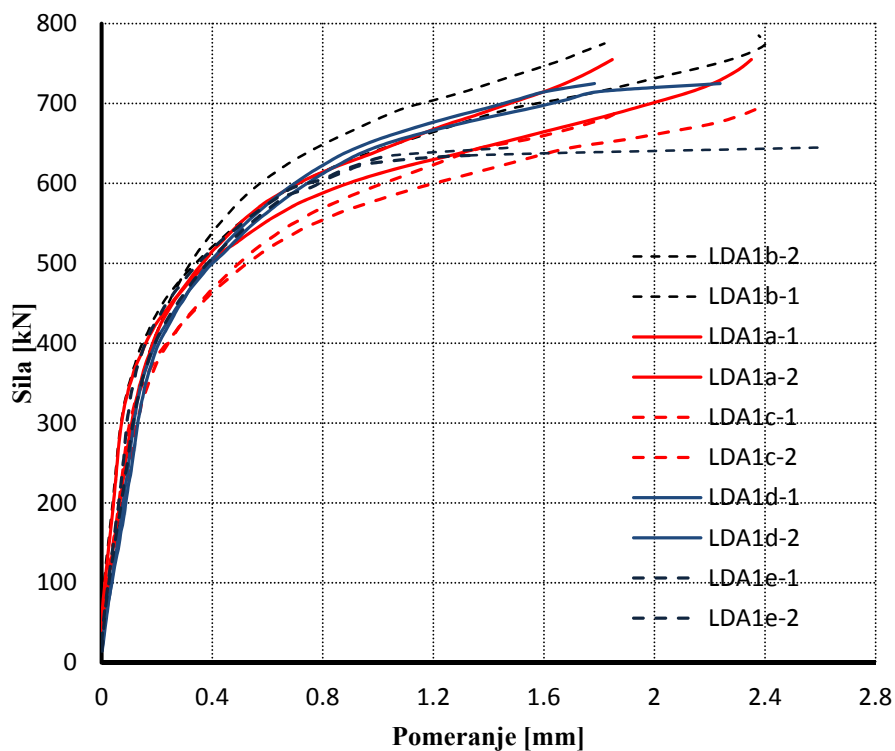


Slika 3.7: Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju

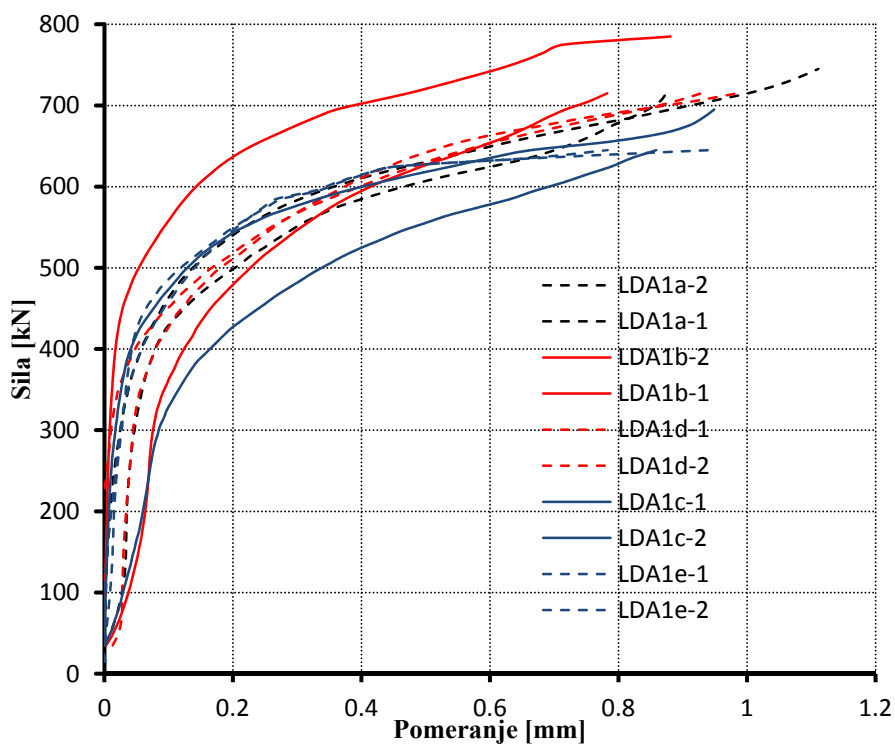
Merene vrednosti razmicanja betonskih ploča i odvajanja ploča od čeličnog profila su u granicama dobijenih vrednosti za uzorke tipa ST i TDA. Ako se analiziraju pomeranja uzoraka za vrednosti sile između 500 i 600 kN, uočava se da uzorak LDA1b ima veću nosivost pri istim vrednostima podužnog pomeranja. Ovakvi rezultati se mogu objasniti većom bočnom krutošću oslonca ploče na presu, uzorka LDA1b. Naime, na slici 3.9 jasno se uočava da je jedan oslonac montažne ploče znatno krući. Ovakvo ponašanje je potvrđeno i kroz numeričku simulaciju eksperimenta pri kalibraciji numeričkog modela. Pri kalibraciji numeričkog modela se uočilo da krutost oslonca utiče na krutost uzorka.

Tabela 3.3: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja–uzorci LDA1

Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{an} [GPa]
LDA1 a	39.2 / 44.2	31.0	36800	799.4	13.0	0.60	21.1
LDA1 b	39.2 / 48.53	31.0	36800	784.7	10.7	0.52	23.6
LDA1 c	39.2 / 48.5	31.0	36800	686.1	9.0	0.68	21.6
LDA1 d	36.9 / 43.5	30.0	34200	722.5	8.16	0.74	11.5
LDA1 e	39.3 / 43.5	31.0	34200	643.2	6.86	0.75	13.4



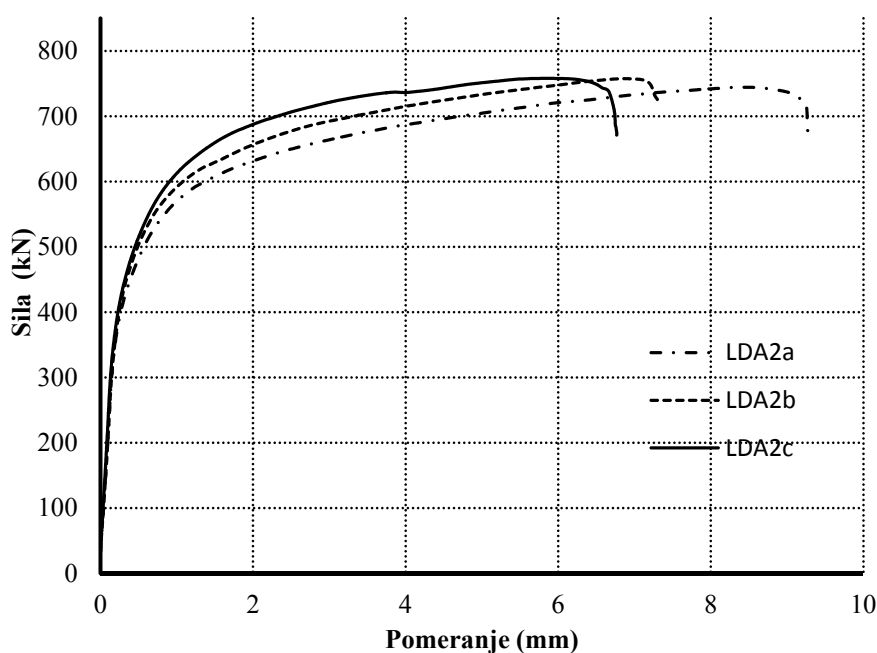
Slika 3.8: Dijagrami sila – razmicanje AB ploča



Slika 3.9: Dijagrami sila – odvajanje AB ploče od čeličnog profila

3.1.4 Grupa moždanika – uzorci LDA2

Rombičan raspored četiri moždanika u grupi, karakterišu slično ponašanje pri opterećenju do loma kao u slučaju uzoraka ST i TDA. Granične nosivosti uzoraka su iste kao i za standardni test, pri čemu su odstupanja merenih vrednosti u odnosu na srednju vrednost merenja minimalna u odnosu na sve ispitane grupe moždanika. Merene vrednosti razmicanja montažnih ploča kao i razdvajanja AB ploče od čeličnog profila su manja nego kod standardnog uzorka.

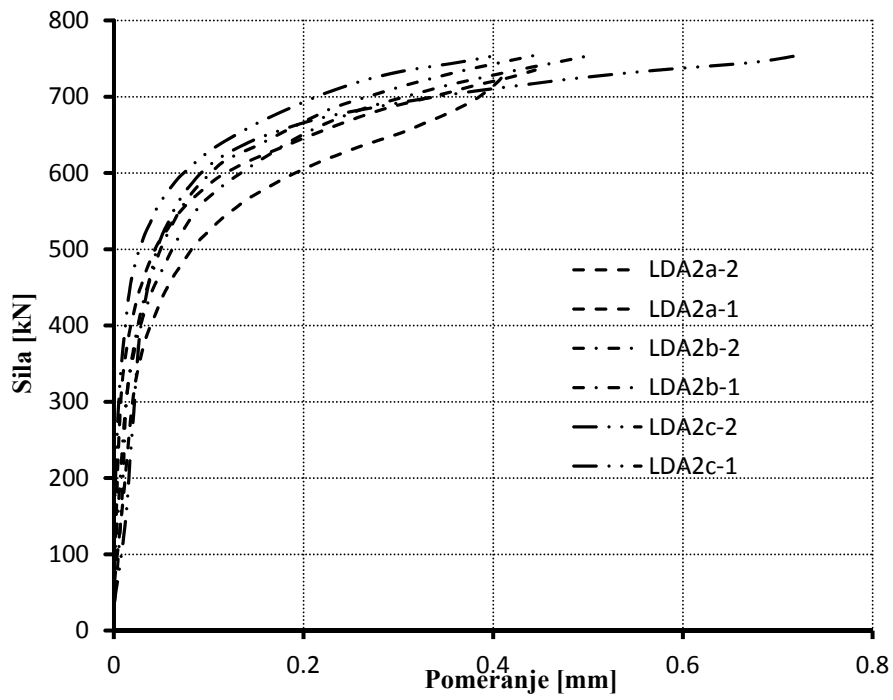


Slika 3.10: Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju

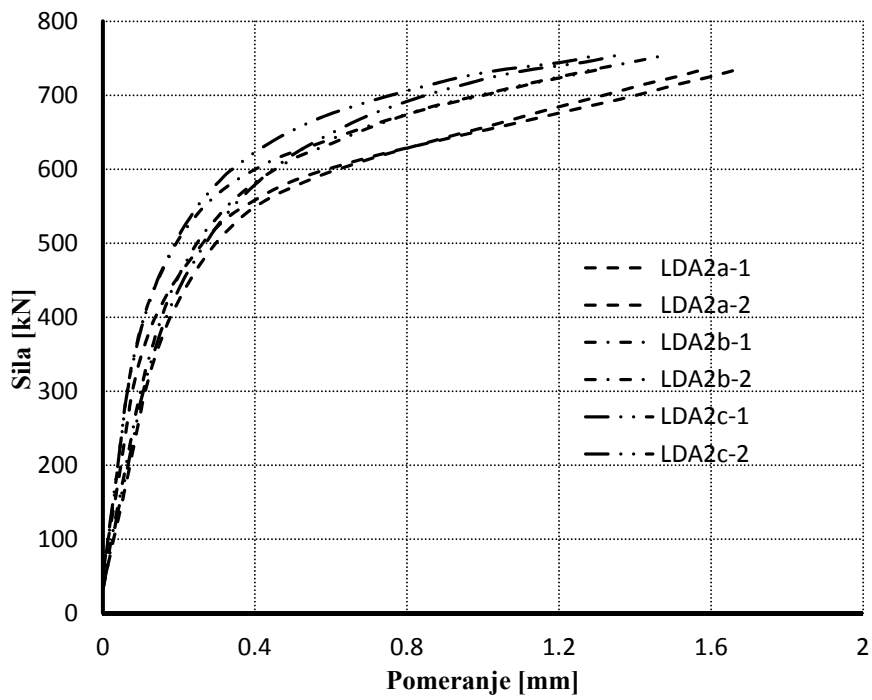
U tabeli 3.4 su prikazane karakterisitčne vrednosti merenih i računatih veličina za uzorke sa grupom moždanika tipa LDA2.

Tabela 3.4: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja–uzorci LDA2

Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{tan} [GPa]
LDA2 a	44.4 / 44.2	34.0	36800	744.5	8.25	0.570	20.7
LDA2 b	39.2 / 44.2	31.0	36800	757.6	6.98	0.520	20.6
LDA2 c	39.2 / 48.5	31.0	36800	758.3	5.94	0.490	23.2



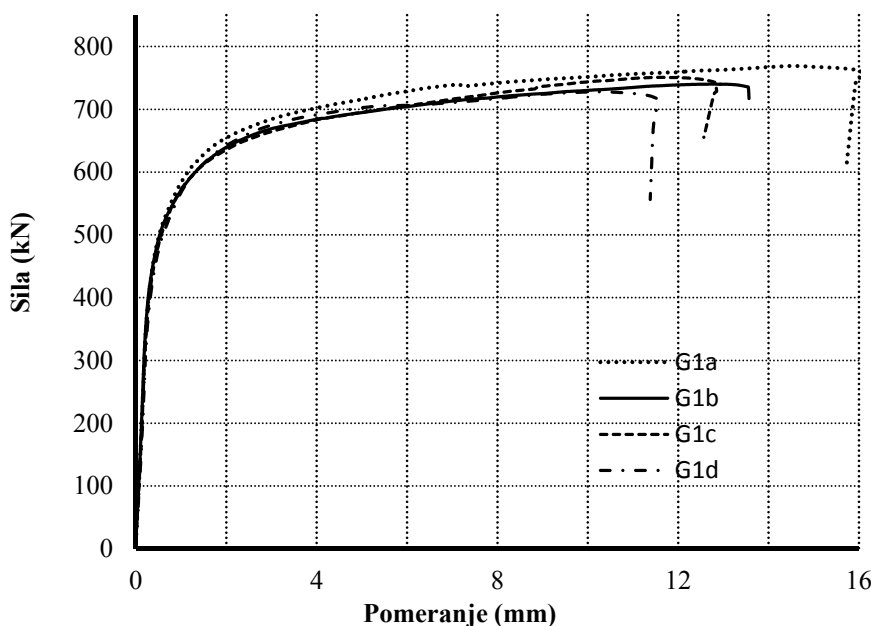
Slika 3.11: Dijagrami sila – odvajanje AB ploče od čeličnog profila



Slika 3.12: Dijagrami sila – razmicanje AB ploča

3.1.5 Grupa moždanika - uzorci G1

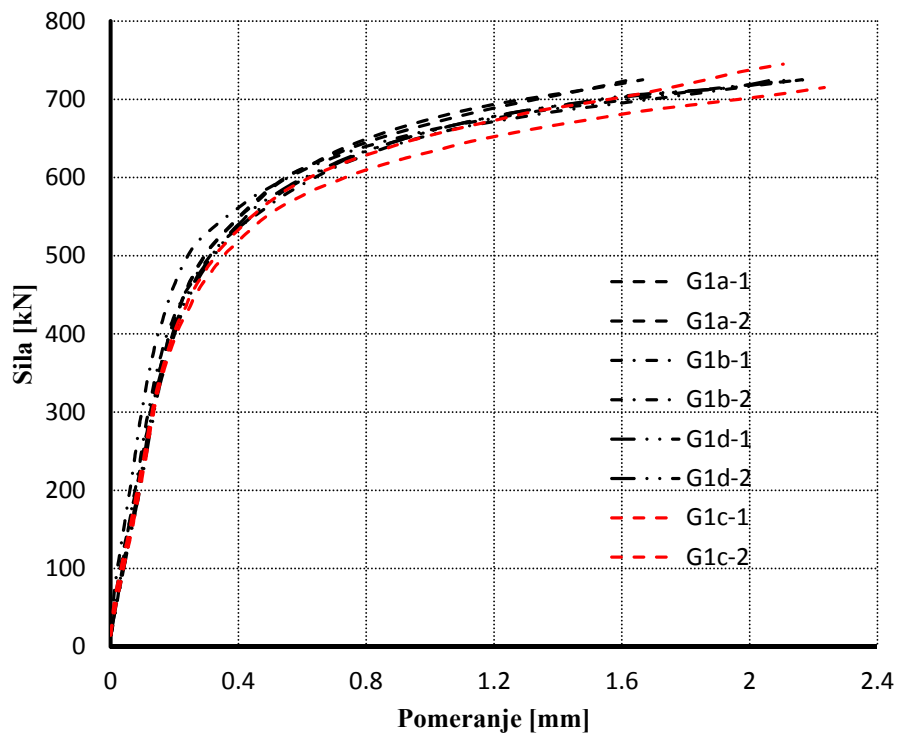
Dijagram sila – pomeranje, uzoraka G1, jasno pokazuju da ovu grupu moždanika karakterišu znatno veće vrednosti podužnog klizanja u smičućem spoju, videti dijagram na slici 3.13. Ako se dijagrami sa slike 3.14 uporede sa rezultatima uzoraka: ST, LDA2 i TDA, vidi se da su vrednosti razmicanja montažnih ploča približno iste.



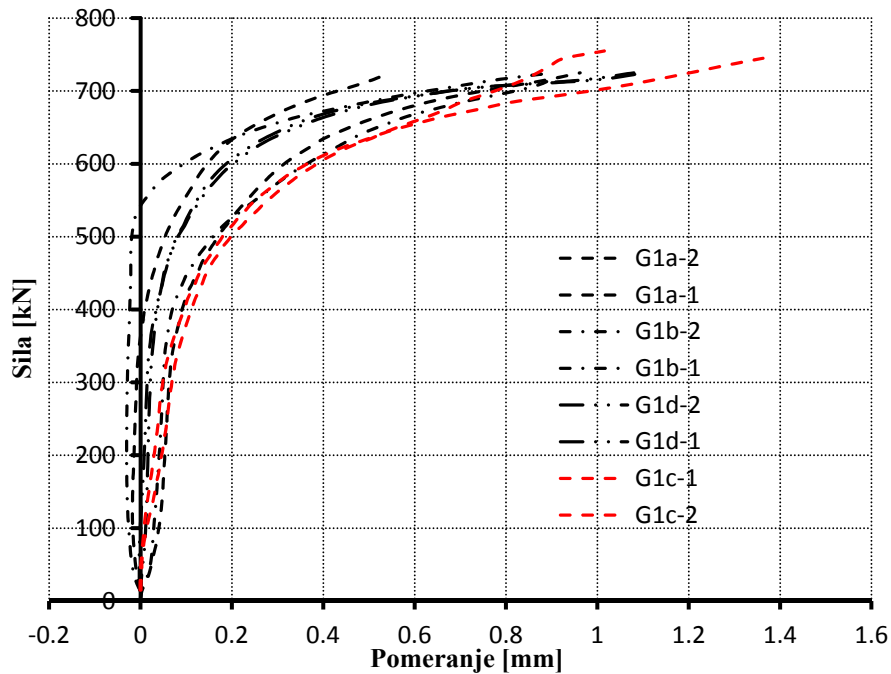
Slika 3.13: Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju

Međutim, ako se dijagrami na slici 3.15, sila – pomeranje pri odvajanju betonske ploče od čeličnog profila, uporede, jasno je pokazuju da se ove vrednosti značajno razlikuju od uzorka do uzorka, ne toliko po konačnoj vrednosti, koliko po obliku. Ova činjenica, kao i znatno veće vrednosti podužnog klizanja smičućeg spoja, ukazuju na pojavu mešovitog loma smičućeg spoja.

U tabeli 3.5 su prikazane karakterisitčne vrednosti merenih i računatih veličina za uzorke sa grupom moždanika tipa G1.



Slika 3.14: Dijagrami sila – razmicanje AB ploča



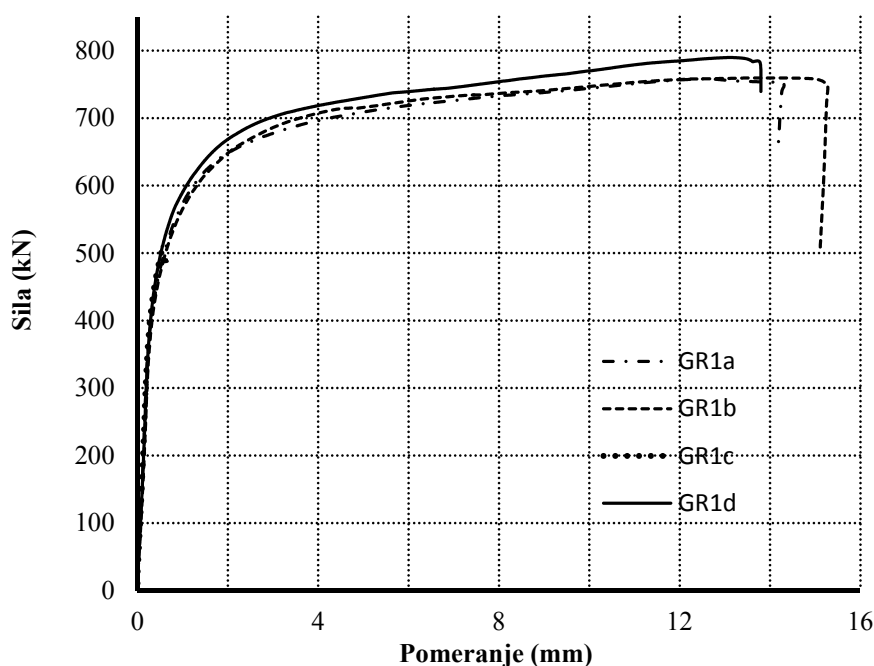
Slika 3.15: Dijagrami sila – odvajanje AB ploče od čeličnog profila

Tabela 3.5: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja – uzorci G1

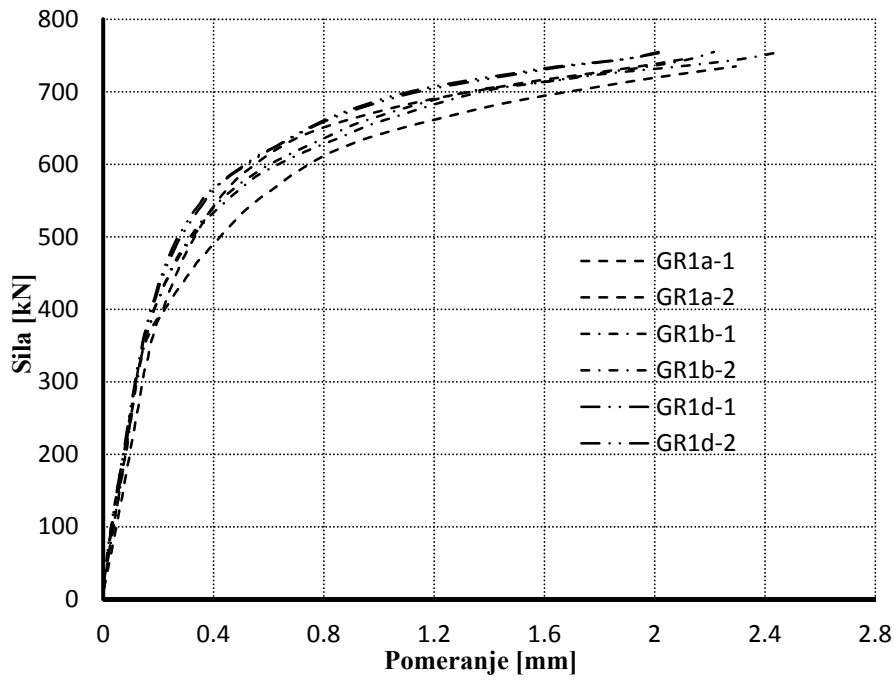
Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{tan} [GPa]
G1 a	39.1 / 43.5	32.0	34200	769.2	13.9	0.56	15.2
G1 b	39.1 / 43.5	32.0	34200	740.2	12.5	0.57	16.2
G1 c	39.1 / 43.5	32.0	34200	750.9	11.2	0.60	14.7
G1 d	39.1 / 43.5	32.0	34200	728.0	9.78	0.63	13.1

3.1.6 Grupa moždanika - uzorci GR1

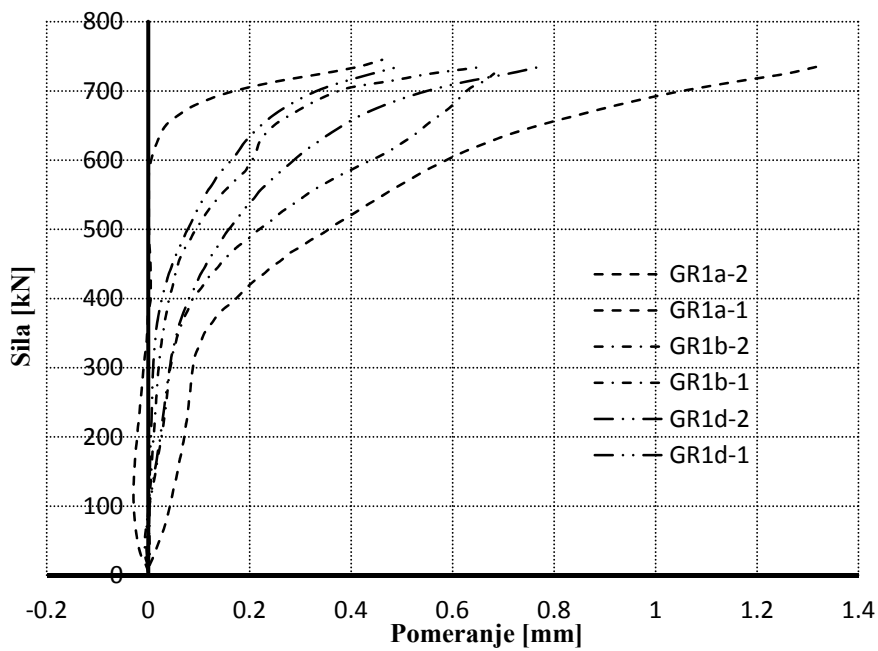
Uzorci GR1 sa grupom od četiri moždanika se u odnosu na uzorke G1 razlikuju samo po tipu korišćene montažne AB ploče. Dobljene vrednosti granične nosivosti kao i karakteristike uzoraka pri opterećenju do loma su potvrdile pretpostavku da armatura neposredno ispred grupe moždanika nema uticaj na ponašanje i nosivost grupe.

**Slika 3.16:** Dijagrami sila – podužno klizanje u smičućem spoju

Analizirajući dijagrame sila – pomeranje sa slika 3.17 i 3.18 mogu se izvesti isti zaključci kao i u slučaju uzoraka tipa G1.



Slika 3.17: Dijagrami sila – razmicanje AB ploča



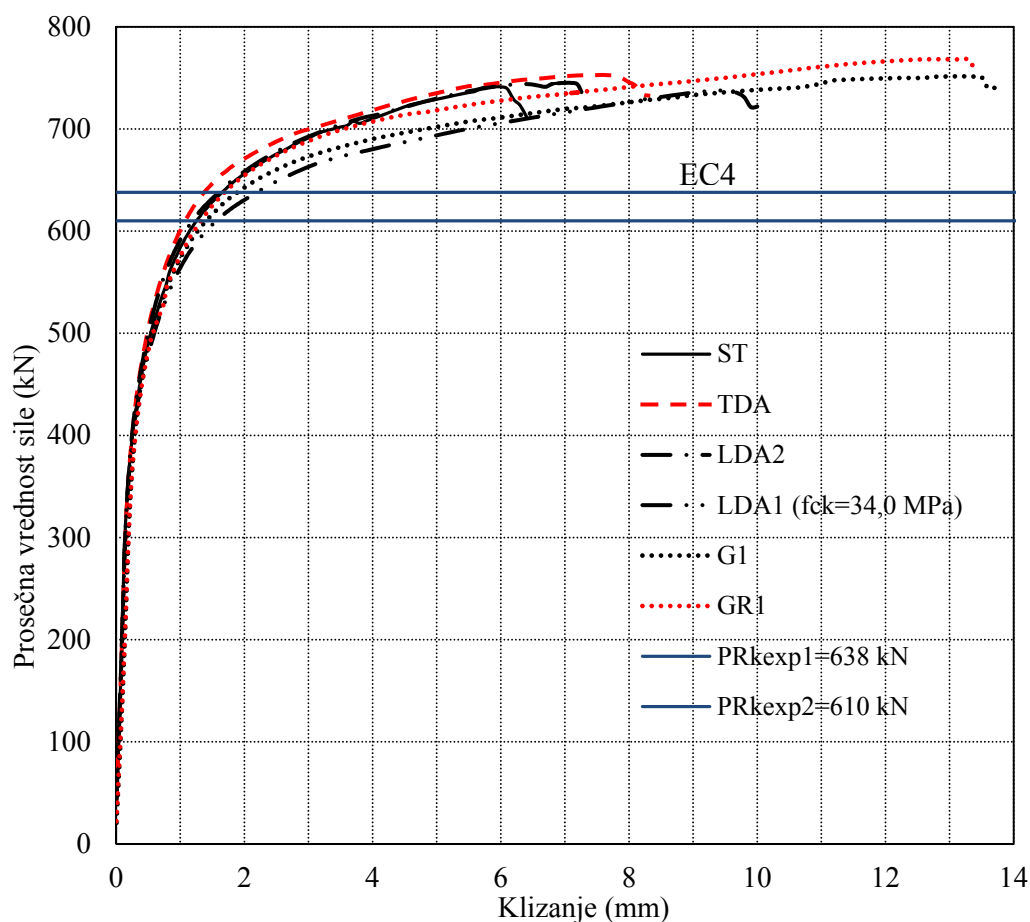
Slika 3.18: Dijagrami sila – pomeranje, odvajanje AB ploče od čeličnog profila

Tabela 3.6: Granična nosivost i deformabilnost podužnog smičućeg spoja – uzorci GR1

Uzorak	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	P_{ult} [kN]	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{tan} [GPa]
GR1 a	39.3 / 43.5	32.0	34200	758.0	12.5	0.64	15.4
GR1 b	39.3 / 43.5	32.0	34200	759.6	13.2	0.65	12.9
GR1 c	39.1 / 43.5	32.0	34200	752.0	/	0.53	15.9
GR1 d	39.3 / 43.5	32.0	34200	789.9	12.8	0.55	14.3

3.2 Analiza eksperimentalnih rezultata i ponašanja uzoraka

Pri analizi rezultata koriste se reprezentativni dijagrami sila – klizanje smičućeg spoja, za jedan tip grupe moždanika. Reprezentativni dijagrami su prikazani na slici 3.19. Prikazani dijagrami predstavljaju srednju vrednost sile svih uzoraka sa istom grupom moždanika, pri istoj vrednosti podužnog klizanja smičućeg spoja.



Slika 3.19: Sila – klizanje smičućeg spoja, reprezentativne krive za grupe uzoraka

Dve referentne vrednosti $P_{Rk,exp1}$ i $P_{Rk,exp2}$ sa slike 3.19, predstavljaju karakteristične proračunske vrednosti granične nosivosti uzorka koje su sračunate sa stvarnim karakterisitkama materijala. Na osnovu eksperimentalnih rezultata karakteristika matrijala određena je nosivost grupe od četiri moždanika kao četverostruka nosivost pojedinačnog moždanika prema izrazima za graničnu nosivost iz Evrokoda 4:

$$P_{Rk,exp} = 2 \cdot 4 \cdot \left[0,29 \cdot 1 \cdot (d)^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} \right] \leq 2 \cdot 4 \cdot \left[0,8 f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] \quad (4.1)$$

$$P_{Rk,exp,1} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 4 \cdot \left[0,29 \cdot 1 \cdot (16\text{mm})^2 \cdot \sqrt{34 \cdot 33000} \right] \\ 2 \cdot 4 \cdot \left[0,8 \cdot 523\text{MPa} \cdot \frac{\pi \cdot (16\text{mm})^2}{4} \right] \end{array} \right. = 638 \text{ kN} \quad (f_{ck}=34\text{MPa}) \quad (4.2a)$$

$$P_{Rk,exp,2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 4 \cdot \left[0,29 \cdot 1 \cdot (16\text{mm})^2 \cdot \sqrt{32 \cdot 33000} \right] \\ 2 \cdot 4 \cdot \left[0,8 \cdot 523\text{MPa} \cdot \frac{\pi \cdot (16\text{mm})^2}{4} \right] \end{array} \right. = 610 \text{ kN} \quad (f_{ck}=32\text{MPa}) \quad (4.2b)$$

Nosivost uzorka jednaka je dvostrukoj vrednosti nosivosti grupe. Granična nosivost svih ispitanih grupa je veća od proračunske karakterisitčne nosivosti. Činjenica da su karakteristične vrednosti nosivosti moždanika prema Evrokodu 4 oko 20% manje od rezultata eksperimenata je poznata i komentarisana, Pallares i Hajjar [43]. Odnos granične nosivost uzorka i karakteristične proračunske vrednosti $P_{Rk,exp}$ prema (4.2) se kreće od 1.02 (LDA1-c i LDA1 d) do 1.20 (uzorci GR1 i GR2). Srednje vrednosti ovog odnosa za sve tipove grupa su prikazane u tabeli 3.7.

3.2.1 Karakteristična vrednost nosivosti na smicanje ispitanih grupa moždanika

Karakteristična vrednost nosivosti na smicanje grupe moždanika je određena u skladu sa Aneksom B, Evrokoda 4 i u skladu sa Aneksom D, Evrokoda 0.

Ako razlika dobijenih vrednosti nosivosti tri ispitana uzorka nije veća od 10% u odnosu na srednju vrednost tri rezultata, karakteristična nosivost grupe moždanika na smicanje može se odrediti prema tački B.2.5, Aneksa B Evrokoda 4 0 kao:

$$P_{Rk,s1} = 0.9 \cdot P_{u,min} \quad (4.3)$$

gde je $P_{u,min}$ minimalna nosivost od tri ispitana uzorka.

Ako navedeni kriterijum nije ispunjen, tada je potrebno ispitati dodatne uzorke, a karakterističnu vrednost nosivosti treba odrediti prema Aneksu D, standarda EN 1990 [5] kao:

$$P_{Rk,s1} = m_X \cdot (1 - k_n V_X) \quad (4.4)$$

gde su:

- m_X srednja vrednost granične nosivosti ispitanih uzoraka,
- k_n koeficijent prema tabeli D1 iz [5] i zavisi od broja ispitanih uzoraka (za 4 uzorka, $k_n=2.63$),
- $V_X=s_X/m_X$ koeficijent varijacije,
- s_X vrednost standardne devijacije.

Sve serije ispitanih uzoraka su zadovoljile kriterijum da je odstupanje pojedinačnih rezultata manje od 10% u odnosu na srednju vrednost rezultata jedne serije. Međutim, karakteristična vrednost nosivosti grupa G1, GR1 i LDA1 određena je prema EN 1990 [5], zbog većeg broja ispitanih uzoraka, a kod uzoraka LDA1 i razlike u vrednostima čvrstoće betona pri pritisku koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka. Vrednosti karakteristične nosivosti su prikazane u tabeli 3.7.

Tabela 3.7: Karakteristična nosivost grupe moždanika na smicanje

Uzorak	P_{av} [kN]	δ_{av} [mm]	$\frac{P_{ult,min}}{P_{ult,max}}$	$P_{Rk,s1}$ [kN]	$P_{Rk,s2}$ [kN]	$P_{Rk,exp}$ [kN]
ST $f_{ck}=34$ MPa	370.6	6.1	0.94	327.0		319.0
TDA $f_{ck}=34$ MPa	376.4	7.6	0.96	331.0		319.0
LDA1 $f_{ck}=34$ MPa	368.8	9.4	0.86	308.7		319.0
LDA1 $f_{ck}=32$ MPa	339.6	7.8	0.89	/	288.5	315.0
LDA2 $f_{ck}=34$ MPa	372.6	7.1	0.98	335.0		319.0
G1 $f_{ck}=32$ MPa	375.7	13.1	0.95	333.1	350.5	315.0
GR1 $f_{ck}=32$ MPa	384.0	12.9	0.95	338.5	360.1	315.0

$P_{Rk,s1}$ – Aneks B – Evrokode 4
 $P_{Rk,s2}$ – Aneks D – Evrokode 0
 P_{av} – Srednja vrednost granične nosivosti ispitanih uzoraka
 δ_{av} – Podužno klizanje koje odgovara prosečnoj vrednosti granične nosivosti na smicanje

Tabela 3.8: Poređenje eksperimentalnih rezultata

Uzorak	$P_{i,av}/P_{ST,av}$	$\delta_{i,av}/\delta_{ST,av}$	$\frac{P_{Rk,s1}}{P_{ST,Rk,s1}}$	$\frac{P_{Rk,s1}}{P_{Rk,exp}}$	$\frac{P_{Rk,s2}}{P_{Rk,exp}}$
ST	1.000	1.00	1.00	1.025	/
TDA	1.016	1.25	1.01	1.040	/
LDA1 $f_{ck}=34$ MPa	0.995	1.56	0.994	0.965	/
LDA1 $f_{ck}=32$ MPa	0.916	1.30	/	/	0.920
LDA2	1.005	1.18	1.024	1.050	/
G1	1.012	2.14	1.018	1.060	1.120
GR1	1.036	2.11	1.034	1.073	1.140

Rezultati uzoraka ST, koji su u potpunosti izvedeni u skladu sa Evrokodom 4, su referentni za analizu nosivosti i ponašanja ostalih ispitanih uzoraka sa grupama moždanika. Na osnovu prikazanih rezultata mogu se izvesti sledeći zaljucci:

- Sve ispitane grupe imaju nosivost veću od četverostruke vrednosti karakteristične proračunske nosivosti pojedinačnog moždanika. Ovim je potvrđena činjenica da su vrednosti nosivosti moždanika prema EC4 manje od vrednosti koje se dobijaju eksperimentalnim putem.
- Dobijene vrednosti granične nosivosti uzoraka tipa G1 i GR1, kao i uzoraka tipa LDA2, (sa dva moždanika u pravcu opterećenja na manjem rastojanju od propisanih 5d) su iste ili veće od dobijenih graničnih vrednosti nosivosti standardnih uzoraka tipa ST, videti tabelu 3.8. Zbog malog međusobnog rastojanja, moždanici u grupi pri opterećenju imaju približno iste vrednosti pomeranja, što ima za rezultat međusobnu preraspodelu uticaja između moždanika u grupi i zajednički rad svih moždanika. Preraspodela opterećenja između blisko postavljenih moždanika rezultirala je manjim razlikama u vrednostima graničnog opterećenja za isti tip grupe moždanika.
- Srednja vrednost granične nosivosti ispitanih grupa tipa G1, GR1 i LDA2 je u granicama od $\pm 3\%$ u odnosu na standardni uzorak ST, dok su karakteristične vrednosti nosivosti ($P_{Rk,s1}$, $P_{Rk,s2}$) ovih grupa moždanika veće od karakteristične nosivosti standardnog uzorka. Treba naglasiti da je za grupe moždanika G1 i GR1 korišćen beton za monolitizaciju sa čvrstoćom na pritisak $f_{ck}=32$ MPa.

- Srednja vrednost sile pri lomu grupe moždanika tipa LDA1 ($f_{ck}=34$ MPa) od 757.0 kN je za 0,6% manja od prosečne vrednosti dobijene za standardne uzorke ST. Sile pri lomu grupe moždanika LDA1 su 2-19 % veće od proračunskih karakterističnih vrednosti. Međutim nosivosti pojedinačnih uzoraka tipa LDA1 je karakterisalo nešto veće odstupanje od prosečne vrednosti za ovaj tip, pa je karakteristična nosivosti za 8.0% manja od karakteristične nosivosti uzoraka ST.
- Grupe G1 i GR1 su po geometriji identične, ali su izvedene sa različitim tipom betonskih ploča. Za oba tipa uzoraka je karakterističan kombinovan tip loma. Srednje vrednosti graničnog opterećenja pri lomu od 747 kN za uzorke tipa G1, odnosno 753 kN za uzorka tipa GR1 pokazuju da poprečna armature u ploči ne utiče na nosivost grupe moždanika. Slična zapažanja o ulozi armature na nosivost moždanika odnosno grupe moždanika navode i Okada i dr. [40] i An i Cederwall [34].
- Srednje vrednosti deformacije pri lomu uzoraka G1 su bile 11.8 mm, dok je prosečna deformacija pri lomu uzoraka GR1 12.8 mm. Iz prikazanih rezultata i oblika dijagrama sila – pomeranje grupa G1 i GR1 može se izvesti zaključak da armatura ploče ne utiče na nosivost i ponašanje grupe moždanika. Ova činjenica je od posebnog značaja za konstruktivno oblikovanje detalja armature u zoni ploče oko otvora.

3.2.2 Ponašanje pri lomu ispitanih grupa moždanika

Analizirajući oblike loma moždanika, prsline u montažnim pločama, zone velikih plastičnih deformacija betona neposredno ispred moždanika, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Kod ispitanih grupa moždanika tipa ST, LDA1, LDA2 i TDA došlo je do loma smicanjem moždanika.
- Veće izmerene vrednosti pomeranja u pravcu opterećenja uzoraka tipa LDA1, (videti tabelu 3.8), u odnosu na merene vrednosti pomeranja uzoraka ST ukazuju da je došlo i do većih plastičnih deformacija betona u zoni betonske ploče neposredno ispod moždanika.
- Kod grupa moždanika tipa G1 i GR1 lom, takođe, nastaje smicanjem moždanika. Međutim, kod ovih grupa izmerene su znatno veće deformacije pri

lomu, što je rezultat primene betona za monolitizaciju manje čvrstoće ($f_{ck}=32.0$ MPa) u odnosu na beton koji je korišćen za monolitizaciju uzoraka prve faze.

- Veće deformacije uzoraka G1 i GR1 su delom i rezultat većih plastičnih deformacija betona u zoni neposredno oko grupe moždanika, što je iniciralo i veću deformaciju moždanika usled savijanja.
- Velike vrednosti klizanja podužnog spoja uzoraka G1 i GR1 kao i pomeranja koja su rezultat razmicanja čelika i betona ukazuju na pojavu kombinovanog modela loma. Ovo se može jasno uočiti i na poprečnom preseku montažne AB ploče gde se u slučaju grupa G1 i GR1 jasno uočava zona zatezanja kao i prslina koja je karakterisitčna za kombinovani model loma.
- Lom uzoraka tipa ST pri srednjoj vrednosti granične sile od 762 kN nastaje smicanjem moždanika pri vrednosti klizanja u smičućem spoju od 6,6 mm. Pri lomu uzoraka nije došlo do pojave prslina u armiranobetonskoj ploči.
- Grupu moždanika TDA karakteriše lom smicanjem moždanika. Srednja vrednost granične nosivosti je 754 kN sa prosečnim pomeranjem pri lomu 7.75 mm. Imajući u vidu da su i uzorci tipa TDA izvedeni u potpunosti u skladu sa zahtevima standarda u pogledu rasporeda moždanika ovakvo ponašanje uzorka je očekivano.
- Prsline u montažnoj armiranobetonskoj ploči, su karakterisale samo uzorke sa grupama moždanika tipa TDA. Pojava prslina u betonskoj ploči se manifestovala pri vrednosti opterećenja od 595 do 620 kN
- U slučaju ostalih ispitanih grupa moždanika, prslina u montažnoj ploči ili nije bilo, ili su se pojavljivale neposredno pre loma pri vrednostima opterećenja većim od 650 kN.
- U kontaknom spoju montažne ploče i betona za monolitizaciju nisu se pojavile prsline, nije uočen lom kontaknog spoja niti odvajanje novog od starog betona. Ovo zapažanje važi za sve ispitane uzorke i od posebne je važnosti kao konstruktivna karakteristika ovako izvedene veze. Fotografije poprečnih preseka armiranobetonskih ploča nakon ispitivanja prikazane su u prilogima.
- Na poprečnim presecima ploča koje su nakon ispitivanja, podužno presečene na dva dela, neposredno uz moždanike jasno se vidi da ne postoji diskontinuitet ni na jednom delu kontaktne površi montažne ploče i betona za monolitizaciju. Na

fotografijama poprečnog preseka ploča uzoraka G1 i GR1 vidi se da je i na mestu pojave prsline usled zatezanje kontinuitet između starog i novog betona potpun.

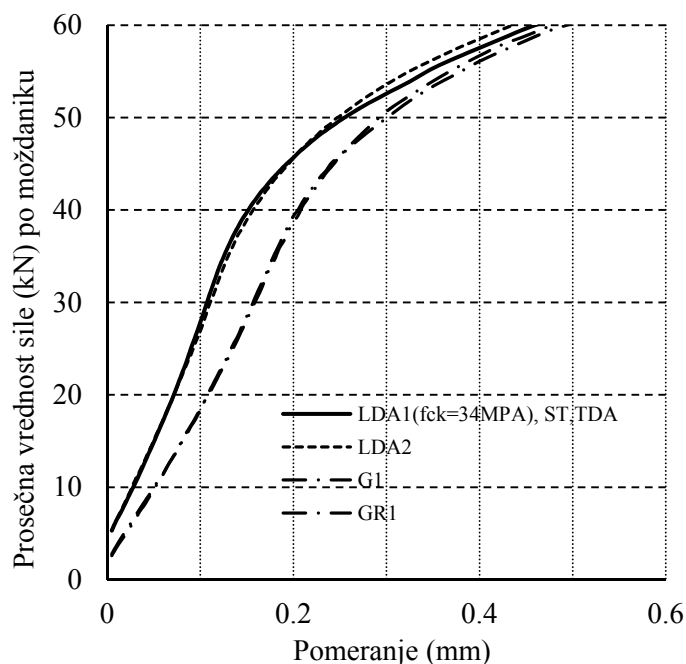
3.3 Analiza deformacija i krutosti

Osim nosivosti i deformabilnost podužnog smičućeg spoja je takođe značajana osobina koju treba analizirati. Deformabilnost podužnog smičućeg spoja može uticati na deformaciju spregnutog elementa. U slučaju kontinualno raspoređenih moždanika, posebno kod spregnutih elemenata sa parcijalnim smičućim spojem, deformabilnost parcijalnog smičućeg spoja može imati uticaj na deformaciju spregnutog elementa. Obzirom da podužni smičući spoj sa grupisanim moždanicima nije standardan analizirana je i deformabilnost tj. krutost podužnog spoja ostvarenog grupom moždanika sa glavom.

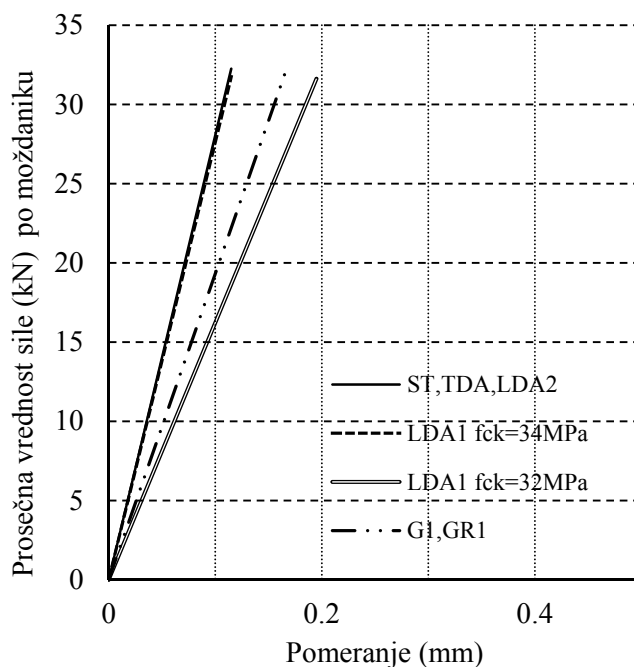
Deformabilnost, odnosno krutost podužnog smičućeg spoja ostvarenog sa grupom moždanika za ispitane tipove grupa je prikazana u tabeli 3.9. I u ovom slučaju dobijeni rezultati za grupe moždanika poređeni su sa rezultatima standardnog uzorka ST. Ako se uporede rezultati pomeranja u smičućem spoju za nivo opterećenja koji odgovara graničnom stanju upotrebljivosti, uočava se da je razlika u pomeranjima oko 0,1mm. Na osnovu ovoga se može se očekivati da je deformacija spregnutog elementa sa grupama moždanika u smičućim spoju ista kao i deformacija spregnutog elmenta sa kontinualno raspoređenim moždanicima u smičućem spoju.

Dominantan uticaj na krutost podužnog spoja ima čvrstoća pri pritisku betona za monolitizaciju. Naime, kao što je poznato primenom viših klasa betona plastične deformacije betona su manje, pa su manje i deformacije moždanika, što za rezultat ima veću krutost spoja. Hegger i dr. [25] analizirali su krutost smičućeg spoja u zavisnosti od čvrstoće primenjenog betona. Prenošnje opterećenja sa moždanika u betonsku ploču pri početnim vrednostima opterećenja je preko sloja betona uz koren moždanika. Primena betona male čvrstoće podrazumeva pojavu plastičnih deformacija i prsline u sloju betona uz koren moždanika, već pri malim vrednostima sile, početak savijanja moždanika i angažovanje većeg sloja betona za prenos opterećenja. Rane plastične deformacije i prsline u betonskoj ploči, u slučaju betona niže čvrstoće, podrazumevaju i veće početne deformacije spoja kao i veće konačne deformacije pri lomu. Na

dijagramima, slike 3.20 i 3.21, prikazane su početne tangentne krutosti ispitanih grupa moždanika u poređenju sa moždanicima u standardnom rasporedu.



Slika 3.20: Početni deo dijagrama sila – podužno klizanje ispitanih grupa moždanika



Slika 3.21: Početna krutost ispitanih grupa moždanika

Može se uočiti da je tangentni modul elastičnosti ispitanih uzoraka ST, LDA1, LDA2, TDA skoro isti. Takođe, tangentni modul grupa G1 i GR1 je identičan. Ako se

uzme u obzir i prikazani tangetni modul za uzorke LDA1 koji su izvedeni sa betonom čvrstoće na pritisak $f_{ck}=32$ MPa jasno je da početna krutost uzoraka dominantno zavisi od čvrstoće betona pri pritisku koji se nalazi u delu ploče neposredno oko moždanika.

Tabela 3.9: Krutost podužnog smičućeg spoja

Uzorak	δ_{max} [mm]	δ (500 kN) [mm]	ϕ_{an} [GPa]	k_{sc} [MN/mm]
ST a	6.10	0.64	20.1	0.995
ST b	5.80	0.47	24.4	1.308
ST c	6.60	0.52	22.4	1.204
TDA a	7.76	0.52	19.8	1.188
TDA b	7.27	0.45	22.4	1.363
TDA c	8.22	0.49	22.2	1.219
LDA1 a	13.0	0.60	21.1	1.276
LDA1 b	10.7	0.52	23.6	1.400
LDA1 c	9.0	0.68	21.6	1.142
LDA1 d	8.16	0.74	11.5	1.077
LDA1 e	6.86	0.75	13.4	1.121
LDA2 a	8.25	0.570	20.7	1.045
LDA2 b	6.98	0.520	20.6	1.202
LDA2 c	5.94	0.490	23.2	1.302
G1 a	13.9	0.56	15.2	1.137
G1 b	12.5	0.57	16.2	1.137
G1 c	11.2	0.60	14.7	1.059
G1 d	9.78	0.63	13.1	1.013
GR1 a	12.5	0.64	15.4	0.973
GR1 b	13.2	0.65	12.9	0.927
GR1 c	/	0.53	15.9	1.127
GR1 d	12.8	0.55	14.3	1.100

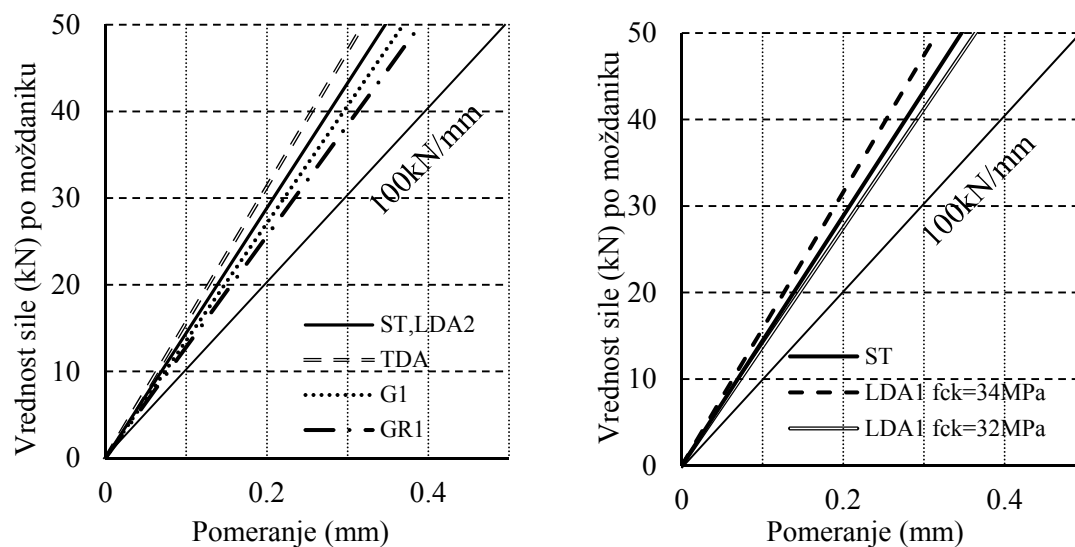
U tabeli 3.9 prikazane su i vrednosti krutosti moždanika k_{sc} . Prema Aneksu A Evrokoda 4 krutost moždanika jednaka je:

$$k_{sc}=0,7 P_{Rk} / s \quad (4.5)$$

gde su:

- P_{Rk} karakteristična nosivost,
- s pomeranje u smičućem spoju pri vrednosti opterećenja $0,7 P_{Rk}$.

Dobijene vrednosti krutosti su prikazane i na dijagramima na slici 3.22. Krutost moždanika u ispitanim grupama k_{sc} je u granicama ± 10 kN/mm, u odnosu na srednju vrednost svih ispitanih uzoraka sa istom čvrstoćom betona pri pritisku. Sve ispitane grupe imaju krutost veću od 100 kN/mm što je orjentaciona vrednost definisana u Evrokodu 4 za moždanike prečnika 19 mm u punoj betonskoj ploči.

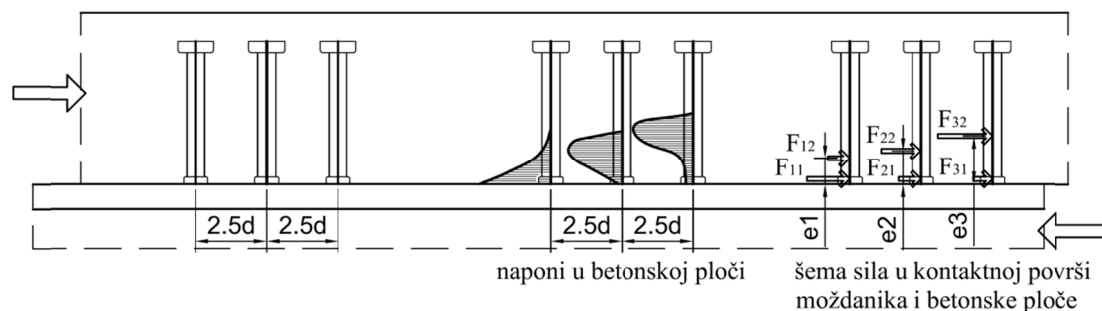


Slika 3.22: Krutost k_{sc} ispitanih grupa moždanika

Iz predstavljenih rezultata, uočava se da je krutost grupa G1 i GR1 identična, što pokazuje da armatura koja se nalazi neposredno ispred moždanika nema uticaj na krutost podužnog smičućeg spoja.

3.4 Nosivost grupe moždanika

Nosivost na smicanje grupe moždanika sa glavom jednaka je sumi nosivosti pojedinačnih moždanika u grupi. Da bi se odredila nosivost pojedinačnog moždanika mora se uzeti u obzir položaj moždanika unutar grupe, kao i ukupan broj moždanika u grupi. Na slici 3.23 prikazan je model nosivosti na smicanje grupe moždanika.



Slika 3.23: Model prenošenja opterećenja za grupu moždanika sa glavom

Prvi moždanik u redu može da prenese punu smičuću silu i i ponaša se kao moždanik u punoj betonskoj ploči. Može se smatrati da se sila kojom moždanik deluje na betonsku ploču, prenosi pritiskom na sloj betona visine približno jednake prečniku moždanika. Drugi moždanik u redu se ponaša kao moždanik ispred koga se nalazi prostor bez betona (videti sliku 3.23), slično kao moždanik postavljen u spregnutu ploču na profilisanom limu. U ovom slučaju rezultujuća sila pritiska kojom moždanik deluje na beton je u zonama betona koje su dalje od korena moždanika. Na isti način se može opisati i nosivost trećeg i ostalih moždanika u redu. Drugi, treći i ostali moždanici mogu imati nešto manju nosivost na smicanje, što direktno zavisi od visine zone betona preko kojih se opterećenje unosi u betonsku ploču. Ove moždanike karakteriše istovremeno smicanje i savijanje. Prema slici 3.23 može se definisati sledeća zakonitosti: $F_{11} > F_{21} > F_{31}$, $F_{12} < F_{22} < F_{32}$ i $e_1 < e_2 < e_3$. Veće vrednosti sile F_{2i} i ekscentriciteta te sile u odnosu na gornju nožicu nosača e_i rezultuju većim momentima savijanja moždanika. Usled većih vrednosti momenata savijanja očekuje se drugačije ponašanje drugog, trećeg i ostalih moždanika u redu. Sile F_{ij} su direktno zavisne od prečnika moždanika, međusobnog rastojanja između moždanika i nosivosti na savijanje moždanika. Čvrstoća pri pritisak betona dominantno utiče na nosivost grupe. Debljina zone betona i udaljenost zone betona od korena, preko koga se sila unosi u betonsku

ploču zavisi od rastojanja između moždanika i čvrstoće betona pri pritisku. U slučaju spoja sa jednim moždanikom, oblik loma koji se može očekivati definisali su Lam i dr. [33] i Oehlers [39].

Sličnu interpretaciju nosivosti na smicanje dva moždanika u redu dali su i Hegger, Sedlacek i dr. [25].

Dobijeni rezultati i zaključci upoređeni su sa preporukama i zapažanjima drugih autora koji su se bavili sličnom problematikom.

Josef Hegger i dr. [25] su koristili betone sa velikim vrednostima čvrstoće pri pritisku i ispitivali su uzorke sa dva moždanika u redu ($h_{sc}/d = 80/19 \text{ mm} = 4.21$) na međusobnom rastojanju $2d$ u pravcu opterećenja i dobili su samo 5.4% manju graničnu nosivost od zbira nosivosti dva pojedinačna moždanika. Ispitani uzorci GR1 i GR2 su izvedeni sa dva para moždanika ($h_{sc}/d = 100/16 \text{ mm} = 6.25$) na međusobnom rastojanju od $2.8d$. Granična nosivost ispitanih uzoraka bila je jednaka zbiru graničnih nosivosti četiri pojedinačna moždanika. Za uzorke GR1 i GR korišćen je beton standardnih čvrstoća na pritisak i moždanici veće visine. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je visina moždanika bitan faktor koji utiče na nosivost grupe.

Okada i dr. [40] analizirali su uticaj rastojanja između susednih moždanika na nosivost grupe. U svom radu su prikazali nosivost grupe od devet moždanika ($h_{sc}/d = 150/22 \text{ mm} = 6.81$). Predložili su koeficijent redukcije nosivosti na smicanje grupe moždanika u odnosu na sumu nosivosti pojedinačnih moždanika u grupi. Predloženi koeficijent redukcije je funkcija: čvrstoće betona pri pritisku i rastojanja susednih moždanika koje je izraženo koeficijentom rastojanja $C_1 = d_1/d$ (d_1 – podužno osno rastojanje između susednih moždanika). Prema ovim preporukama za grupe LDA1, G1 i GR1 određena je nosivost i upoređena sa dobijenim rezultatima. Vrednost koeficijenta redukcije prema [40] jednaka je:

Za beton kvaliteta C30/37:

$$P_{Rk} = \eta \cdot P_{Rk,exp} = (0.021 \cdot C_1 + 0.73) P_{Rk,exp} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{za } d_1=45\text{mm} \rightarrow C_1=d_1/d=2.8125 &\rightarrow \eta=0.021 \cdot C_1 + 0.73=0.789 \\ \text{za } d_1=50\text{mm} \rightarrow C_1=d_1/d=3.125 &\rightarrow \eta=0.021 \cdot C_1 + 0.73=0.796 \end{aligned}$$

Za beton kvaliteta C40/50:

$$P_{Rk} = \eta \cdot P_{Rk,exp} = (0.016 \cdot C1 + 0.80) P_{Rk,exp} \quad (4.7)$$

za $d_1=45\text{mm}$ $C1=d_1/d=2.8125 \rightarrow$

$$\eta = 0.016 \cdot C1 + 0.80 = 0.845$$

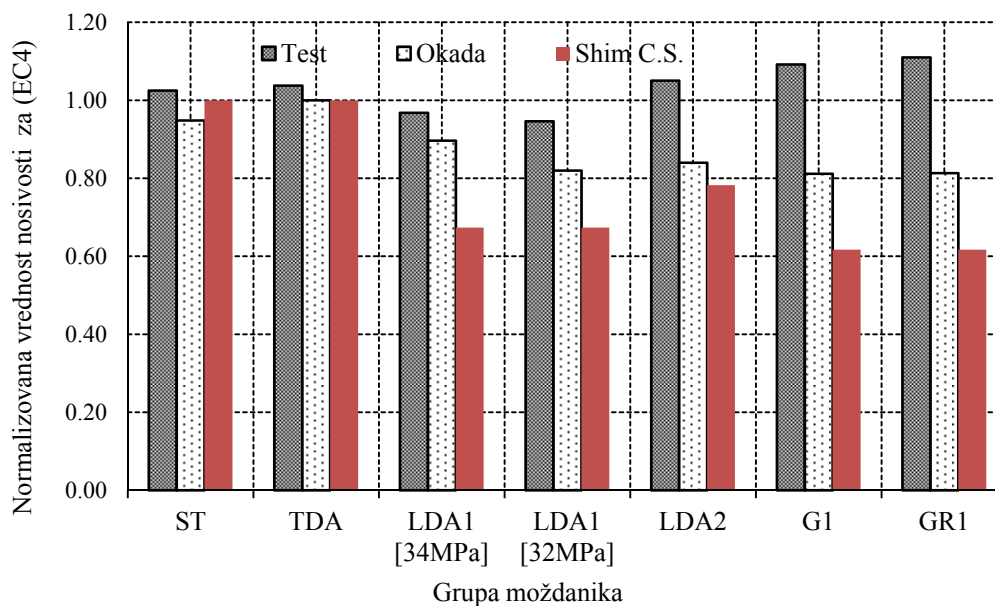
za $d_1=50\text{mm}$ $C1=d_1/d=3.125 \rightarrow$

$$\eta = 0.016 \cdot C1 + 0.80 = 0.85$$

U tabeli 3.10 i na slici 3.24 prikazani su dobijeni rezultati nosivosti za grupe LDA1, G1 i GR1 prema preporukama koje su dali Okada i dr. [40]. Takođe su navedeni i rezultati nosivosti grupe moždanika prema izrazu (2.1) koji su predložili Shim C.S. i dr. [45]. Najbolji rezultati se dobijaju za grupu LDA1. Međutim, u slučaju grupa G1 i GR1 dobijeni rezultati su konzervativni. Okada i dr. [40] su analizirali nosivost grupe od devet moždanika (u rasporedu 3x3). Razlika između ovih vrednosti ukazuje da su za nosivost grupe na smicanje, pored međusobnih rastojanja između moždanika, od značaja: veličina grupe i raspored moždanika unutar grupe. Okada je u svom radu predložio i redukciju nosivosti za moždanike na međusobnom rastojanju manjem od $5d$, što je prema većini aktuelnih propisa dozvoljeno rastojanje između moždnika. Analizirajući rezultate može se zaključiti da veći broj moždanika koji su na malim međusobnim rastojanjima u poprečnom pravcu u odnosu na pravac sile može uticati na redukciju nosivosti grupe. Odnosno potrebno je definisati nosivost grupe na smicanje uzimajući u obzir interakciju između susednih redova u grupi moždanika.

Tabela 3.10: Poređenje nosivosti na smicanje ispitanih uzoraka sa preporukama Okade i dr. [40] i Shim C.S. i dr [45]

Uzorak	$P_{Rk,exp}$ prema EC4 [kN]	$P_{Rk,s1}$ [kN]	$P_{Rk,s2}$ [kN]	e_1	Okada i dr. [40] [kN]	Shim C.S. i dr. [45] [kN]
ST $f_{ck}=34\text{ MPa}$	319.0	327.0		100 mm $6.25d$	302.5	319.0
LDA1 $f_{ck}=34\text{ MPa}$	319.0	308.7		50 mm $3.125d$	286.0	213.7
LDA1 $f_{ck}=32\text{ MPa}$	315.0		288.5	50 mm $3.125d$	250.0	211.0
LDA2	319.0	335,0		60 mm $3.75d$	267,0	248.8
G1 $f_{ck}=32\text{ MPa}$	315.0	331.1	350.5	45 mm $2.8d$	247.5	195.3
GR1 $f_{ck}=32\text{ MPa}$	315.0	338.4	360.0	45 mm $2.8d$	247.5	195.3



Slika 3.24: Ispitani uzorci u poređenju sa EC4 i preporukama u [40] i [45]

Veće vrednosti koeficijenta redukcije za betone nižih klasa čvrstoće, prema Okadi, se slažu sa pretpostavkom da se u slučaju primene betona visokih čvrstoća na pritisak, sila iz drugog i trećeg moždanika u grupi unosi u betonsku ploču preko slojeva betona koji su bliži korenu moždanika.

3.5 Zaključci eksperimentalnog istraživanja

Ekperimentalnim istraživanjem je dokazano da se grupe moždanika mogu efikasno koristiti i u slučaju kada su rastojanja između susednih moždanika u pravcu sile manja od propisanih minimalnih vrednosti ($5d$). Na osnovu prethodno iznetih rezultata karakterističnih vrednosti nosivosti, grupa moždanika prečnika 16 mm visine $h_{sc}/d=6.25$ može se konstatovati:

- Nosivost grupe od četiri moždanika je bliska zbiru nosivosti pojedinačnih moždanika.
- Nosivost grupe od četiri moždanika u redu orijentisanih u pravcu sile sa rastojanjem između moždanika $3d$, jednaka je 92% od četverostruke nosivosti jednog moždanika sračunate prema odredbama Evrokoda 4.

- Dva moždanika postavljena u pravcu delovanja smičuće sile na rastojanju od $3d$ imaju istu nosivost kao i dva pojedinačna moždanika, ako je čvrstoća betona pri pritisku $f_{ck} > 32$ MPa.
- „Rombičan“ raspored moždanika, grupa LDA2, ima nosivost na smicanje jednaku zbiru nosivosti na smicanje pojedinačnih moždanika. Nije potrebna redukcija nosivosti grupe, ako je rastojanje između moždanika u pravcu sile veće ili jednako $3.5d$ a upravno na pravac sile $2.5d$ i kada se koristi beton za monolitizaciju sa čvrstoćom na pritisak $f_{ck} > 32$ MPa.
- Redukciju nosivosti koju je predložio Okada sa dr. [40] mogu se koristiti ali su na strani sigurnosti.
- Defomabilnost i krutost spoja zavise pre svega od čvrstoće betona na pritisak.
- Krutost smičućeg spoja izvedenog sa betonom za monolitizaciju čvrstoće $f_{ck} = 32$ MPa je za oko 10% manja od krutosti spoja ako je on izveden sa betonom čvrstoće na pritisak $f_{ck} = 34$ MPa.
- Grupa od četiri moždanika na međusobnim rastojanjima manjim od $5d$ može uspešno zameniti jedan kruti moždanik velike nosivosti.
- Smičući spoj sa grupom od četiri moždanika karakteriše duktilno ponašanje, sa pomeranjima pri lomu većim od 6 mm.
- Poprečna armatura u otvoru ploče ispred grupe moždanika ne utiče na ponašanje smičućeg spoja, pa se može izostaviti, što je bitno sa aspekta praktične primene.

4. SIMULACIJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Za potrebe analize rezultata eksperimentalnog istraživanja izvedena je simulacija ispitivanja primenom metoda konačnih elemenata (MKE). Numerička simulacija ispitanih uzoraka primenom MKE izvedena je pomoću programa "ABAQUS" verzija 6.12 [15]. Analiza je sprovedena primenom „Explicit“ modula za dinamičku analizu. Da bi se vreme proračuna skratilo može se koristiti: „time scaling“ ili „mass scaling“ opcija proračuna. Primena „time scaling“ opcije podrazumeva primenu istih parametara proračuna na sve elemente modela sa skraćivanjem vremenskog inkrementa. Primena opcije proračuna „mass scaling“ sa različitim parametrima proračuna „non uniformly mass scaling“ za svaki konačni element, omogućava optimalno korišćenje računarskih resursa za proračun. Za zadati inkrement vremena, proračunski modul određuje parametre za „mass scaling“ za svaki konačni element modela. Čelik i beton su materijali sa različitom gustinom, a zbog optimizacije modela veličina konačnih elemenata varira od 1.2 mm do 24.0 mm, pa su razlike u masama konačnih elemenata značajne. Prednosti „non uniformly mass scaling“ opcije u odnosu na „time scaling“ u slučaju složenih proračunskih modela opisali su u svom radu Pavlović i dr [44].

Za pouzdanost i tačnost rezultata proračuna od značaja su: primenjeni modeli za materijale, granični uslovi, primenjeni kontaktni uslovi između elemenata modela, tip korišćenih konačnih elemenata, način i brzina nanošenja opterećenja. Imajući u vidu da model ima dve ravni simetrije, za analizu je korišćen numerički model koji potpuno simulira jednu četvrtinu eksperimentalno analiziranih uzoraka.

4.1 Modeli materijala

Na osnovu eksperimentalnih rezultata ispitivanja kvaliteta materijala, definisana su četiri modela materijala: moždanik sa glavom, beton za monolitizaciju, armatura i čelični profil.

Za čelične materijale: moždanika, konstrukcionog čelika i armature usvojene su jedinstvene karakteristike:

- modul elastičnosti $E=210$ GPa
- Poasonov koeficijent $\nu=0.3$
- masa $\gamma=7850$ kg/m³

4.1.1 Čelik moždanika sa glavom

Za simulaciju nelinearnog ponašanja materijala moždanika korišćen je „damage plastic“ model materijala. Na osnovu rezultata ispitivanja zatezanjem materijala moždanika, definisani su parametri modela (videti Pavlović i dr. [44]). Kriterijume za početak oštećenja materijala definisan je vrednošću parametra prostornog stanja napona „stress triaxiality“ pri odgovarajućoj vrednosti ekvivalentne plastične dilatacije. Parametar prostornog stanja napona η „stress triaxiality“ je definisan kao odnos hidrostatičkog pritiska i ekvivalentnog Mises-og napona $\eta=p/q$ pri čemu su:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.1)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{0.5} \quad (4.2)$$

u prethodnim izrazima $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ su vrednosti glavnih napona.

U slučaju jednosonog zatezanja ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), parametar prostornog stanja napona ima vrednost $\eta=0.33$. Odgovarajuća vrednost dilatacije je određena sa dijagrama napon-dilatacija (slika 2.10) kao dilatacija koja odgovara maksimalnoj vrednosti napona i predstavlja dilataciju pri početku oštećenja materijala. Za materijal moždanika ova vrednost je $\varepsilon_{pl,0} = 0.048$. Nakon dostizanja kriterijuma za pojavu oštećenja materijala vrednost tenzora napona je definisana kao:

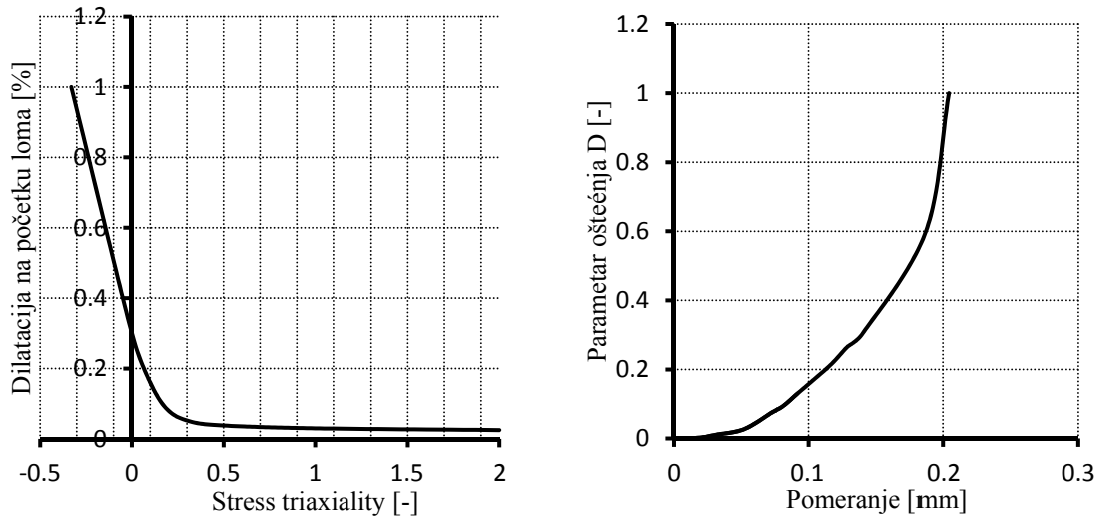
$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (4.3)$$

gde su:

- σ tenzor napona pri ekvivalentnoj plastičnoj dilataciji većoj od dilatacije koja odgovara početku oštećenja,
- D parametar oštećenja koji zavisi od vrednosti plastičnog pomeranja i može imati vrednost između 0 i 1
- $\bar{\sigma}$ tenzor napona koji bi odgovarao materijalu bez oštećenja.

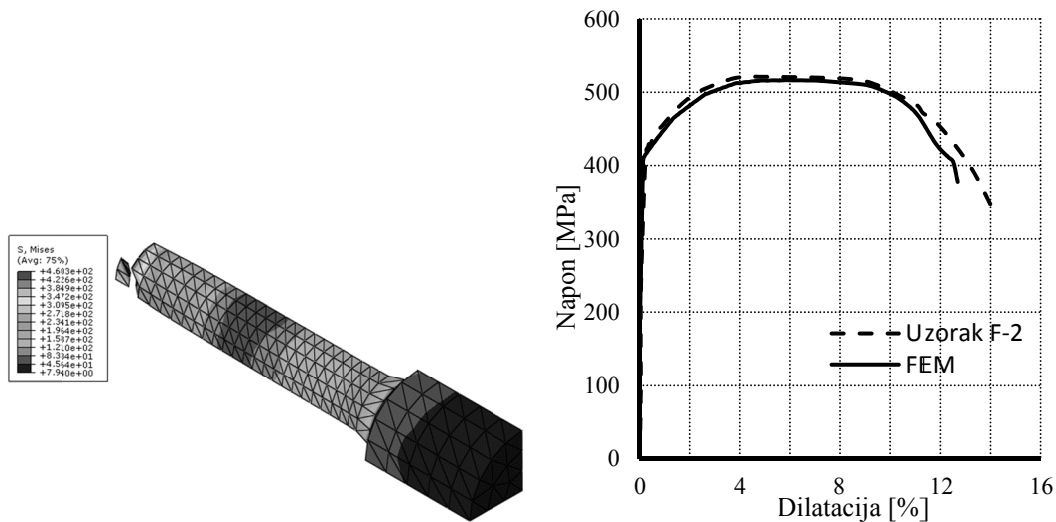
Pavlović i dr. [44] u svom radu su opisali postupak određivanje parametra oštećenja D . Na dijagramima na slici 4.1 prikazane su usvojene vrednosti parametra

prostornog stanja napona η u funkciji ekvivalentne dilatacije i parametra oštećenja D u funkciji plastične deformacije.



Slika 4.1: Usvojene vrednosti: Stress triaxiality, parametar oštećenja

Usvojeno je da pri vrednosti plastične deformacije od 0.2 mm dolazi do loma, odnosno da je to vrednost plastične deformacije za koju je parametar oštećenja $D=1$. Na slici 4.2 prikazani su rezultati simulacije testa zatezanja za materijal moždanika.



Slika 4.2: Rezultati numeričke simulacije testa zatezanja i poređenje sa uzorkom

Pored „damage plastic“ modela korišćen je i „shear damage“ model koji definiše oštećenje i ponašanje materijala pri smicanju. Slično kao i za prethodni model definisani su kriterijumi za početak oštećenja materijala usled napona smicanja. Početak oštećenja

smicanjem je definisan vrednošću „shear stress ratio“ pri dilataciji koja odgovara početku oštećenja materijala. „Shear stress ratio“ je definisan kao:

$$\theta_s = \frac{q + k_s \cdot p}{\tau_{\max}} \quad (4.4)$$

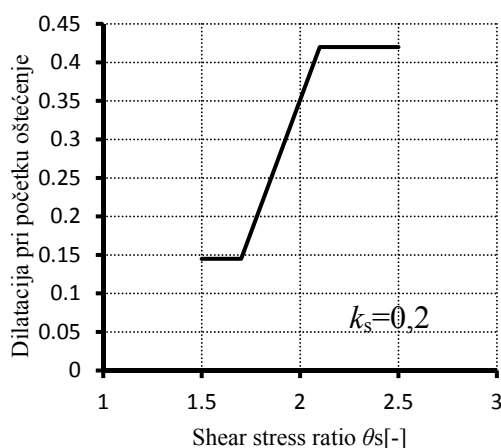
gde su:

k_s – koeficijent materijala, usvojena vrednost $k_s=0,2$

τ_{\max} – vrednost maksimalnog napona smicanja,

q, p – napred definisane vrednosti:hidrostatički pritisak i ekvivalentni Mises-ov napon.

Vrednosti dilatacije pri kojima dolazi do početka oštećenja smicanjem, su usvojene pri kalibraciji modela kojim je simulirano ponašanje uzoraka. Usvojene vrednosti dilatacija pri početku oštećenja materijala od 0.15 je vrednost koja odgovara vrednosti „shear stress ratio“ pri čistom smicanju $\theta_s=1.7$. Vrednost je kalibrisana prema modelima kojim se simulira ispitivanje grupa moždanika. Dilatacija pri početku oštećenja od 0.42 je usvojena za vrednost „shear stress ratio“ $\theta_s=2.1$. Promena parametra oštećenja pri smicanju D_s je definisana linearnom zavisnošću parametra oštećenja smicanjem D_s i pomeranja. Vrednost pomeranja 0.6 mm, koje odgovara lomu smicanjem $D_s=1.0$ je usvojena za sve modele.



Slika 4.3: Početku oštećenja u funkciji vrednosti „shear stress ratio“

4.1.2 Beton

Za modeliranje betona korišćen je model za materijal „concrete damage plasticity“, videti upustvo za ABAQUS 6.12 [15]. Na osnovu ispitanih uzoraka iz betonskih mešavina za monolitizaciju uzoraka i preporuka EN1992-1 (Evrokoda 2) [7] definisan je dijagram napon-dilatacija betona koji je koršćen za nelinearnu analizu. Izvedeni modeli betona su korišćeni i za modeliranje montažnih betonskih ploča. Naime, eksperimentalni rezultati, kao i rezultati numeričke simulacije su potvrdili da na ponašanje grupe moždanika, ne utiču karakteristike betona montažnih ploča.

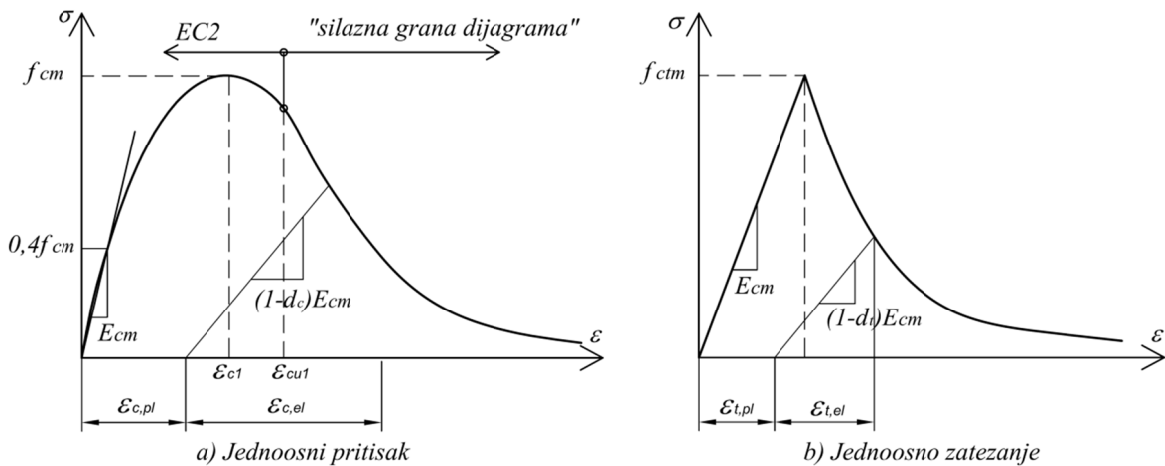
Polazeći od nelinearne veze napon – dilatacija prema Evrokodu 2 (izraz 5.5), a usvajajući vrednosti za $\varepsilon_{cl}=2.25 \text{ ‰}$, $\varepsilon_{cu1} = 3.5 \text{ ‰}$ prema tabeli 3.1 Evrokoda 2 [7] izveden je dijagram napon – dilatacija za deo dijagrama do vrednosti dilatacije od 3.5‰ .

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (4.5)$$

U prethodnom izrazu je:

$$\begin{aligned} \eta &= \varepsilon_c / \varepsilon_{cl} , \\ \varepsilon_{cl} &\text{ dilatacija pri najvećem naponu,} \\ k &= 1.05 E_{cm} \times |\varepsilon_{cl}| / f_{cm} . \end{aligned}$$

Zone betona ispred moždanika su zone materijala sa velikim vrednostima plastične dilatacije. Upravo je opadajući deo dijagrama napon – dilatacija betona od značaja za ponašanje zone betona ispred i oko moždanika. U literaturi postoje predlozi za formulaciju opadajućeg dela dijagrama za dilatacije veće od $\varepsilon_{cu1} = 3.5 \text{ ‰}$, međutim dosta izvora među kojima i FIB Model Code [12] potvrđuju da je svaka definicija opadajućeg dela dijagrama napon – dilatacija za beton nepouzdana i zavisi od mnogo faktora: stanja napona u betonu, čvrstoće na pritisak betona, agregata, itd. Stoga je praktično jedini način za definisanje opadajućeg dela dijagrama, napon - dilatacija betona za monolitizaciju, kalibrisanjem prema eksperimentalnim vrednostima rezultatima ispitanih uzoraka.



Slika 4.4: Šematski prikaz dijagrama napon dilatacija za beton

Pri kalibraciji modela, deo dijagrama napon – dilatacija koji odgovara velikim vrednostima plastičnih dilatacija u betonu $\varepsilon_c > 3.5 \text{ ‰}$, konstruisan je prema preporukama datim u standardu GB 50010-2002 [11] i u radovima Pavlovića i dr. [44] i Carreira i Chu [19]. Kineski standard GB 50010-2002 [11] definiše dijagram napon dilatacija na sledeći način:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cm} [\alpha_a \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}) + (3 - 2\alpha_a)(\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2 + (\alpha_a - 2)(\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^3] & \text{za } (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}) \leq 1 \\ f_{cm} (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}) / [\alpha_d \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1} - 1)^2 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})] & \text{za } (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}) > 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Cheng Xu i dr. [21] su koristili predloženu vezu napon dilatacija, ali su umesto standardom GB 50010-2002 [11] definisanih vrednosti koeficijenata $\alpha_a = 1.5$ i $\alpha_d = 2.8$ usvojili vrednosti koeficijenata $\alpha_a = 2.0$ i $\alpha_d = 1.0$.

Pavlović i dr. [44] u svom radu su predložili i koristili vezu napon - dilatacija za velike vrednosti plastične dilatacije u betonu prema izrazu:

$$\sigma_c = f_{cm} \left[\frac{1}{f_{cm} / f_{cu1}} - \frac{\sin(\mu^{\text{atD}} \cdot \alpha_{tE} \cdot (\pi / 2))}{\beta \cdot \sin(\alpha_{tE} \cdot \pi / 2)} + \frac{\mu}{\alpha} \right] \quad \text{za } (0,035 \geq \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu1}) \quad (4.7)$$

gde su:

- koeficijenti $\alpha = 20$; $\alpha_{tE} = 1.0$; $\alpha_{tD} = 0.5$,
- koeficijent $\mu = (\varepsilon_c - \varepsilon_{cu1}) / (0,03 - \varepsilon_{cu1})$

O.Mirza i B.Uy [37] u svom radu su koristili vezu koju su predložili Carreira D. i Chu K.[19]:

$$\sigma_c = \frac{f_{cm} \cdot \gamma \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{cl})}{\gamma - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cl})^\gamma} \quad (4.8)$$

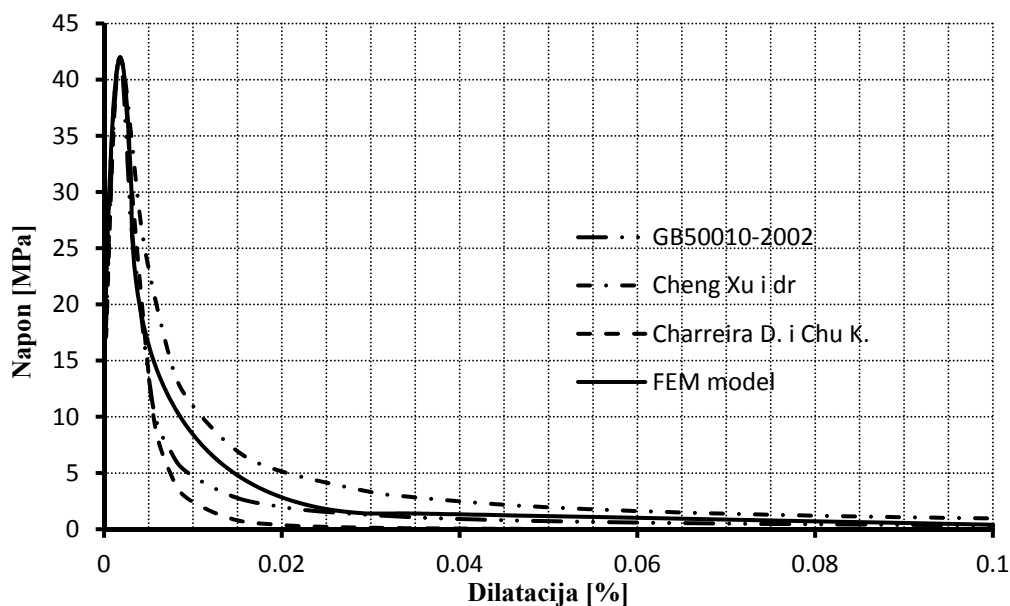
U prethodnom izrazu vredost koeficijenta γ jednaka je:

$$\gamma = \left| \frac{f_{cm}}{32.4} \right|^3 + 1.55 \quad (4.9)$$

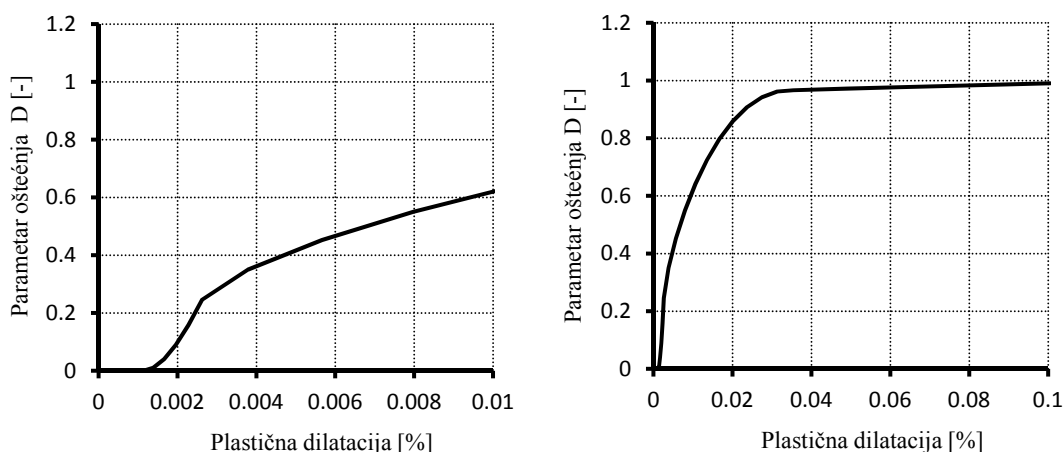
Nakon analize dobijenih rezultata za različite vrednostima napona u betonu, pri velikim vrednostima plastičnih dilatacija, usvojena je veza napon – dilatacija za ($\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cul}$) koju su predložili Pavlović i dr., pri čemu su usvojene sledeće vrednosti koeficijenata: $\alpha=20$; $\alpha_{tE} = 1.05$; $\alpha_{tD} = 0.45$ i $\mu = (\varepsilon_c - \varepsilon_{cul}) / (0.035 - \varepsilon_{cul})$. Na slici 4.5 prikazani su dijagrami napon – dilatacija koji su analizirani pri kalibraciji numeričkog modela.

Rezultati analize modela sa vezom napon-dilatacija prema O.Mirza i B.Uy [37] ili standardu GB50010-2002 [11] dali su rezultate nosivosti grupe moždanika koji su bili oko 15% manji od eksperimentalnih vrednosti rezultata.

Usvojena vrednost parametra oštećenja za beton D_c prema slici 4.4. prikazna je na dijagramima na slici 4.6.



Slika 4.5: Analizirani dijagrami napon-dilatacija za beton



Slika 4.6: Usvojene vrednosti parametra oštećenja za beton

Pored veze napon dilatacija za jednoosno naprezanje betona, analizirani su i parametri modela „concrete damage plastic“ kojima se definiše ponašanje materijala pri dvoosnom i troosnom stanju napona, pri velikim vrednostima dilatacija. Duktilni materijali u svom ponašanju pri troosnom stanju napona ne izražavaju veliku zavisnost od vrednosti hidrostatičkog pritiska. Međutim, ponašanje zrnastih materijala kao što su: tlo, rastresiti materijali, pesak, beton sa prslinama u velikoj meri je zavisno od vrednosti hidrostatičkog pritiska. Ovakvi materijali imaju znatno veću otpornost na smicanje pri većim vrednostima hidrostatičkog pritiska.

Pri izradi modela kalibracijom prema eksperimentalnim rezultatima određeni su i sledeći parametri modela materijala:

- ugao dilatacija ψ ,
- ekscentricitet e ,
- koeficijenti f i K .

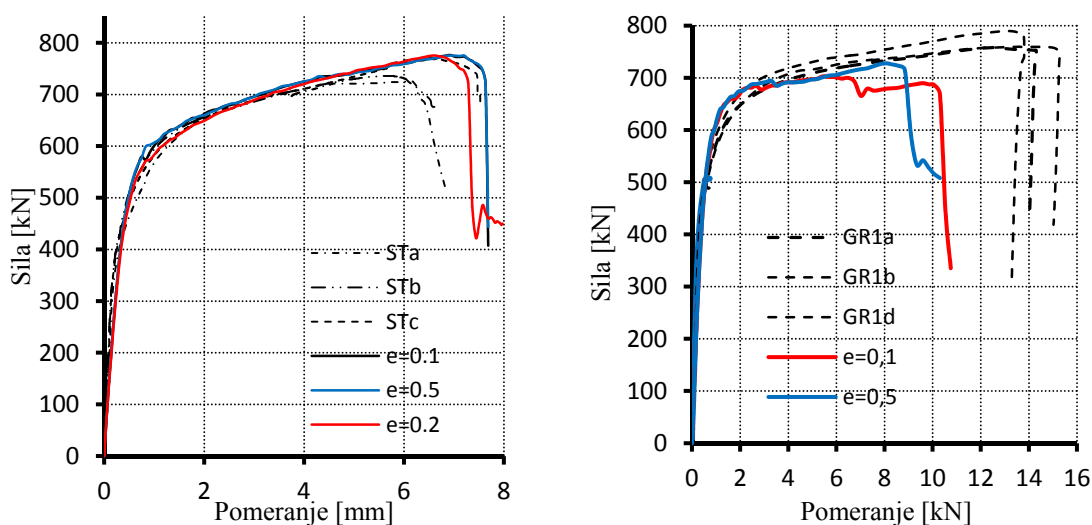
kojima se definiše ponašanje betona pri prostornom stanju napona. Ove parametre su opisali Bompa i Onet [18] na osnovu podataka u: Jankowiak i Lodygowski [27], Malm R. [35], Grassl i Jirasek [24] i Jirasek M. [28].

Uglom dilatacija ψ se kontroliše vrednost plastične dilatacije usled napona smicanja pri vrednostima dilatacija koje su veće od granice plastičnosti. Ugao predstavlja odnos zapreminske i smičuće dilatacije $\psi = -(\delta\varepsilon_v)/(\delta\gamma)$. Vrednost ovoga ugla je oko 12°. Međutim, eksperimentalno je dokazano da ugao može biti i višestruko veći,

(između 12° i 40°), pri prostornom stanju napona, kada su vrednosti hidrostatičkog pritiska velike. Jankowiak i Lodygovski [27] u svom radu su preporučili vrednost ugla od 38° što je i usvojena vrednost koja je korišćena u numeričkom modelu. Analizirajući dobijene rezultate, numeričke simulacije ponašanja grupe moždanika, za neke modele rezultati su bili bliži eksperimentalnim za vrednost ugla od 36°. Međutim usvojena je jedinstvena vrednost od 38° za sve modele. Na osnovu dobjenih rezultata može se zaključiti da su vrednosti ugla za stanje napona ispred i oko moždanika u analiziranim modelima u granicama između 36° i 38°.

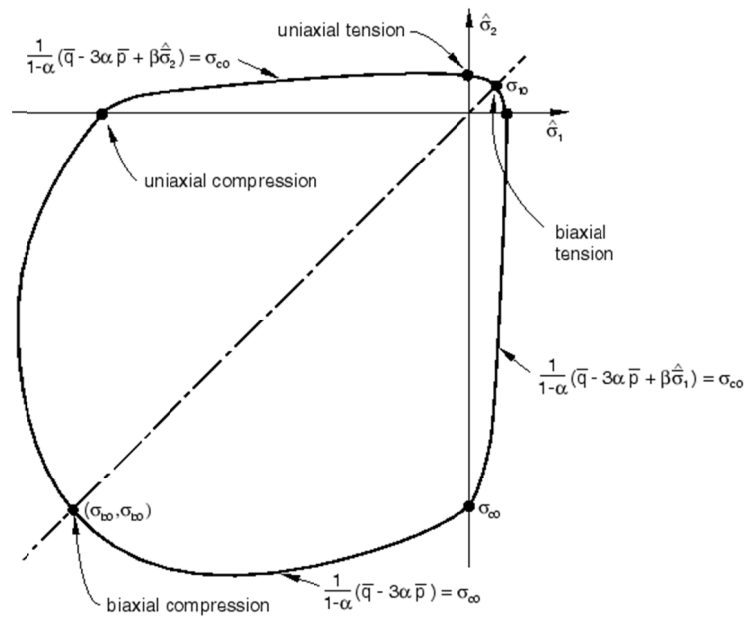
Vrednost ekscentriciteta e kontroliše oblik devijatorske ravni napona koja je upravna na pravac hidrostatičkog pritiska. M.Jirsak i Ž.Bažant [28] su predložili izraz za sračunavanje vrednosti ekscentriciteta na osnovu srednjih vrednosti čvrstoće betona pri pritisku i zatezanju:

$$e = \frac{1 + E}{2 - E} \quad \text{gde je} \quad E = \frac{f_{ctm}}{f_{b0}} \cdot \frac{f_{b0}^2 - f_{ctm}^2}{f_{cm}^2 - f_{ctm}^2}$$



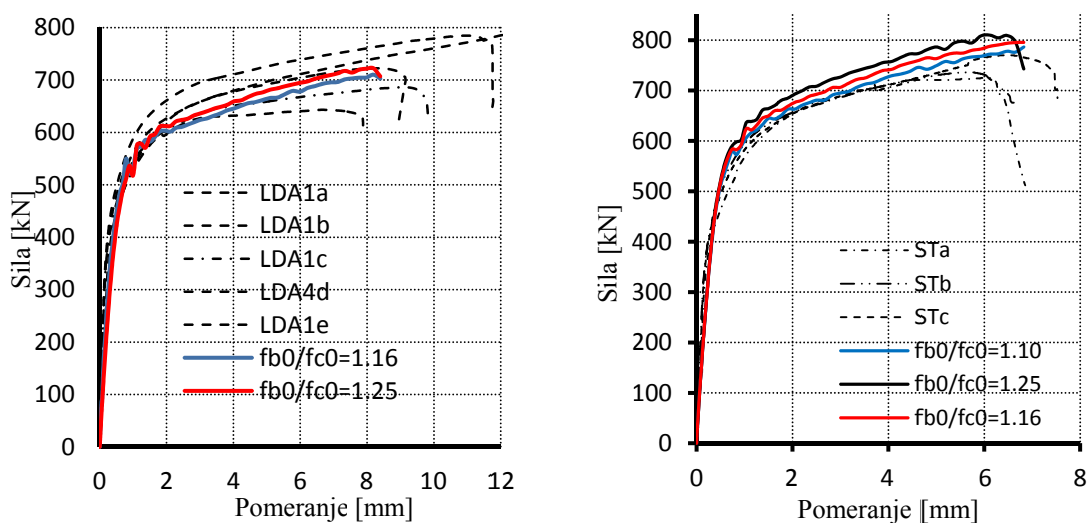
Slika 4.7: Uticaj parametra e – FEM modeli ST i GR1

Usvojena je vrednost ekscentriciteta 0.55. Za vrednosti ekscentriciteta veće od 0.5, vrednosti dobijenih rezultata konvergiraju i povećanjem vrednosti ekscentriciteta preko vrednosti od 0.55 nema promene u vrednostima rezultata numeričkog modela. Treba naglasiti da vrednost ekscentriciteta nema jednak kvalitativni i kvantitativni uticaj kod svih analiziranih modela. Uticaj parametra je ilustrovan na dijagramima na slici 4.7 na kojima su prikazani izabrani međurezultati pri kalibrisanju modela.



Slika 4.8: Čvrstoća pri pritisku za dvoosno stanje napona u betonu
 ,slika preuzeta iz [15]

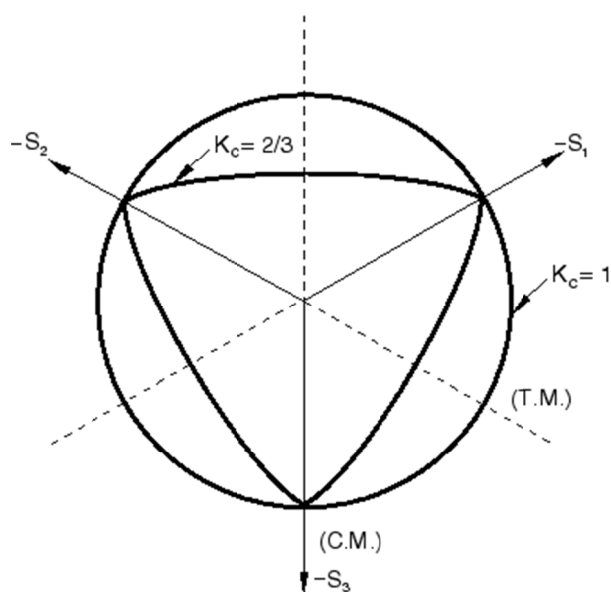
Koeficijent f definiše ponašanje betona pri dvoosnom stanju napona i predstavlja odnos $f = f_{bo}/f_{co}$. Kupfer [32] je eksperimentalno pokazao da su vrednosti čvrstoće pri dvoosnom pritisku betona za oko 16% veće od vrednosti čvrstoće pri jednoosnom pritisku. Na slici 4.8 prikazan je dijagram na osnovu koga algoritam programa ABAQUS [15], na osnovu zadatih čvrstoća betona za jednoosno stanje napona, određuje čvrstoće betona za dvoosno stanje napona.



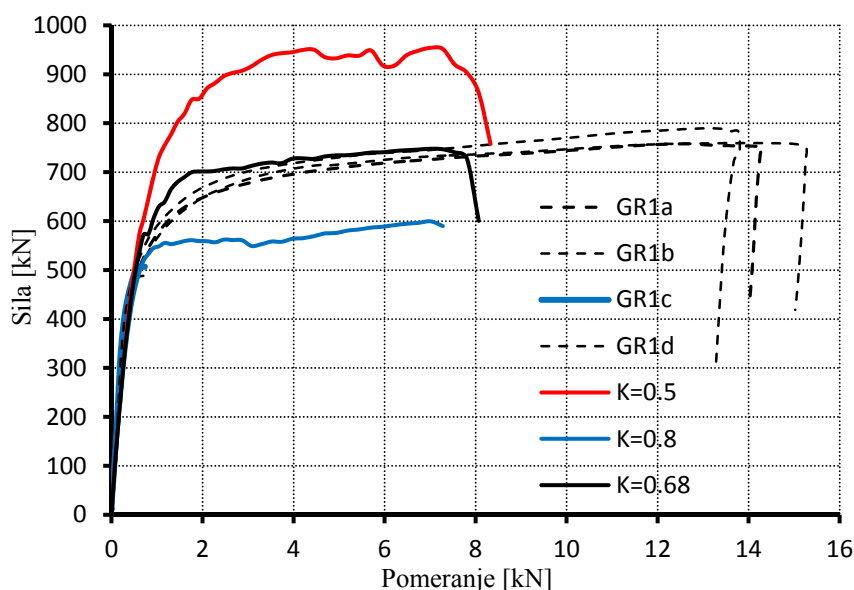
Slika 4.9: Uticaj parametra f – FEM modeli ST i LDA1

U literaturi se većina autora slaže da je vrednost koeficijenta f između 1.1 i 1.25. Prema nekim izvorima iz literature ova vrednost može biti i veća. Vrednost koeficijenta je veća za betone koji imaju veće vrednosti čvrstoće pri pritisku. Takođe, vrednost koeficijenta je značajno veća pri velikim vrednostima hidrostatičkog pritiska. Usvojena vrednost koeficijenta za korišćeni model betona je 1.19. Međurezultati pri kalibrisanju modela su prikazani na slici 4.9.

Oblik granice plastičnih dilatacija u devijatorskoj ravni je definisan koeficijentom K . Vrednost koeficijenta može imati vrednost između 0.5 i 1.0. Jankowiak i Ludigowski [27] su dali način izračunavanja koeficijenta K . Vrednost koeficijenta K zavisi od stanja napona. U literaturi se navodi da je vrednost koeficijenta između $2/3$ i 0.8, a da izvan ovih vrednosti nema značajnog uticaja na ponašanje modela. Usvojena vrednost koeficijenta $K=0.68$ koja je bliska vrednosti od $2/3$, što je najčešća vrednost koja se pominje u literaturi, kao i podrazumevana vrednost u programu ABAQUS [15]. Na slici 4.10 prikazan je oblik granice plastičnosti u devijatorskoj ravni u funkciji koeficijenta K . Ovaj parametar ima značajan uticaj na rezultate FEM modela. Uticaj parametra na rezultate numeričkog modela je ilustrovan na slici 4.11.



Slika 4.10: Granica plastičnosti u devijatorskoj ravni, slika preuzeta iz [15]



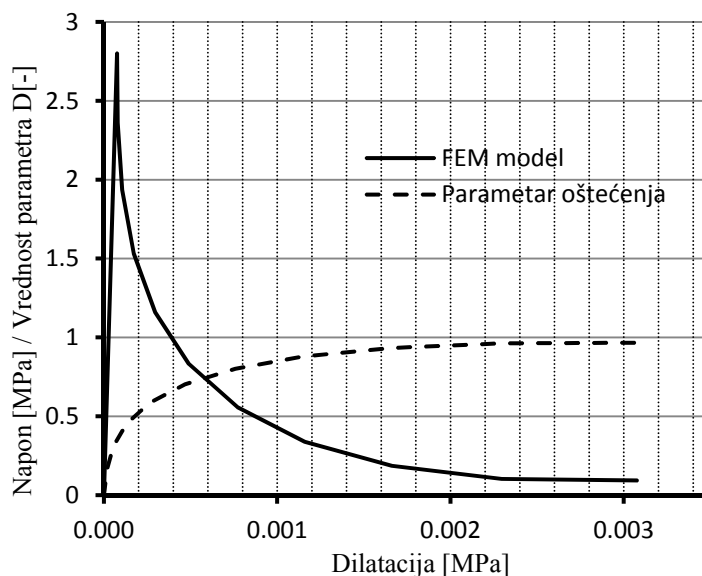
Slika 4.11: Uticaj parametra K – FEM model GR1

Uticaj nosivosti pri jednoosnom zatezanju betona na ponašanje uzoraka je zanačajan. Međutim, samo vrednost nosivosti na zatezanje je podatak koji je od značaja za ponašanje i nosivost numeričkog modela. Usvojena vrednost čvrstoće pri jednoosnom zatezanju betona $f_{ctm}=2.88$ MPa je srednja vrednost dobijena ispitivanjem prizmi napravljenih od mešavina betona za monolitizaciju. Rezultati nosivosti na zatezanje savijanjem $f_{ctm,fl}$ su prema preporukama Evrokoda 2 prevedeni u rezultate koji odgovaraju jednoosnom zatezanju betona. Lam i El-Lobody [33] su koristili linearan i bilinearan oblik opadajućeg dela dijagrama napon – dilatacija betona pri jednoosnom zatezanju. Mnogi autori koriste linearan dijagram koji za rezultat ima sporiji pad nosivosti pri dostizanju čvrstoće pri zatezanju betona, što je sa stanovišta stabilnosti proračuna bolje rešenje. Dijagram napon – dilatacija pri jednoosnom zatezanju je prikazan na slici 4.12. Izabrani oblik dijagrama je sličan sa dijagramom koji je dat u upustvu i primerima u [15].

4.1.3 Čelik za armiranje i čelični profil

Model materijala čelika za armiranje i čelika od koga je izveden vruće valjani profil HEB 260 je elastoplastični model materijala bez oštećenja. Dijagram napon – dilatacija čelika za armiranje i konstrukcionog čelika definisani su kao elasto – idealno plastični dijagrami. Za ova dva materijala modela usvojene su nominalne vrednosti

granica razvlačenja čelika za armiranje usvojena je $f_{ys} = 500$ MPa, dok je za granicu razvlačenja konstrukcionog čelika usvojena vrednost $f_{ya} = 275$ MPa. U svim analiziranim modelima rezultati napona u čeliku za armiranje i konstrukcionom čeliku su bili u elastičnoj oblasti znatno manji od granice razvlačenja ovih materijala.

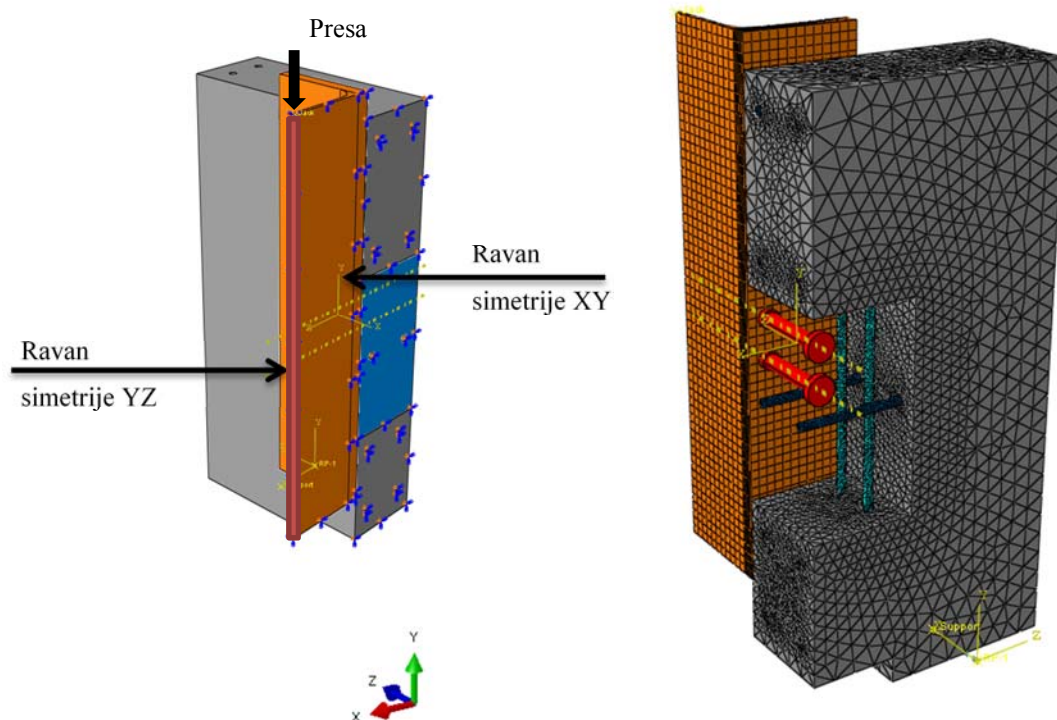


Slika 4.12: Dijagram napon dilatacija betona pri zatezanju, parametar oštećenja

4.2 Granični uslovi i mreža konačnih elemenata

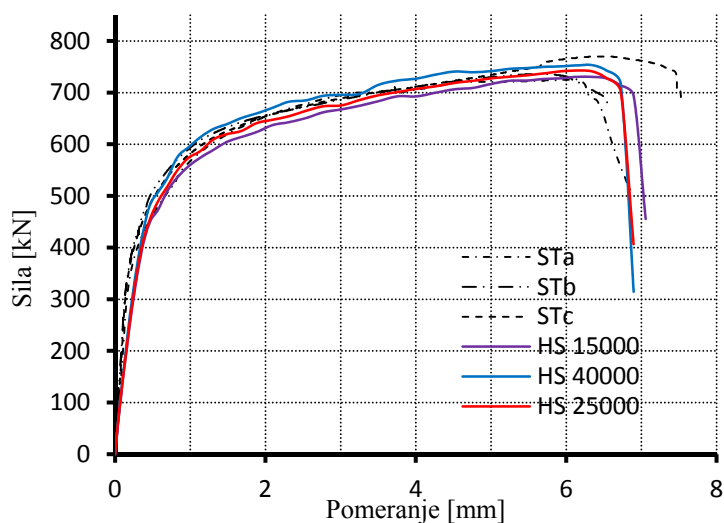
Numerička simulacija je urađena na jednoj četvrtini modela. Iskorišćene su dve ravni simetrije da bi se proračun optimizirao. Za mrežu konačnih elementata korišćeni su prostorni tetraedarski elementi C3D4 sa četiri čvora i to za delove modela: beton, armatura i moždanik. Veličine konačnih elemenata su: 1.2 mm za 7/10 delova visine moždanika uz koren; 2.4 mm preostali deo moždanika (3/10 visine moždanika). Armatura je modelirana sa elementima veličine 8.0 mm. Deo betonske ploče oko moždanika i beton za monolitizaciju, modeliran je sa veličinom konačnog elementa od 2.4 mm neposredno uz moždanike do 8.0 mm na spoljinim ivicama betona za monolitizaciju. Montažna AB ploča je modelirana sa konačnim elementima veličine 8 mm u centralnom delu ploče oko otvora, odnosno, sa elementima veličine 24 mm po obodu ploče. Za modeliranje čeličnog profila korišćeni su konačni elementi C3D8 sa osam čvorova. Najveća dimenzija elementa je 10 mm. Ukupan broj konačnih elemenata

je između 600.000 i 1.000.000 u zavisnosti od tipa modela. Na slici 4.13 prikazan je prostorni numerički model korišćen za simulaciju eksperimenta.



Slika 4.13: Numerički model

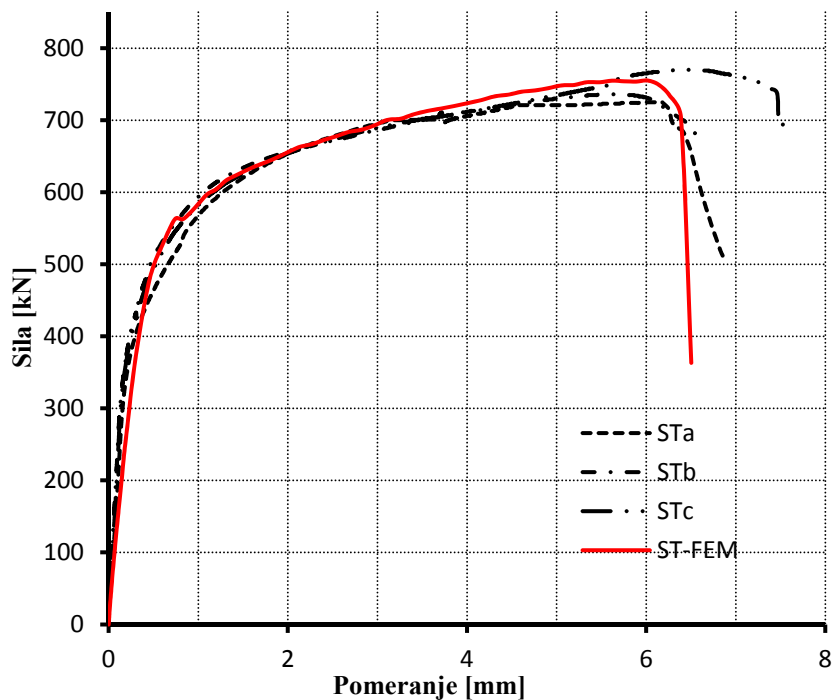
Dve ravni simetrije su iskorišćene pri izradi modela, pa su granični uslovi definisani na način da je sprečeno pomeranje upravno na ravan simetrije i dve rotacije u ravni simetrije. Oslonac betonske ploče je modeliran kao zglobni oslonac u dva pravca dok je za pravac upravno na ravan ploče usvojen elastičan oslonac sa krutošću oko 25000 N/m. Za ovako izabranu krutost oslonca razmicanje betonskih ploča je oko 2.2 do 2.4 mm, što je isto ili za oko 10 % veće od eksperimentalno dobijenih rezultata. Veće krutosti oslonca odgovarale su pomeranjima dobijenim u eksperimentu, ali su istovremeno rezultirale većim vrednostima nosivosti nego što je to slučaj kod eksperimentalnih rezultata. Uticaj horizontalne krutosti oslonca na nosivost i ponašanje modela ilustrovan je na modelu uzoraka tipa ST, videti sliku 4.14.



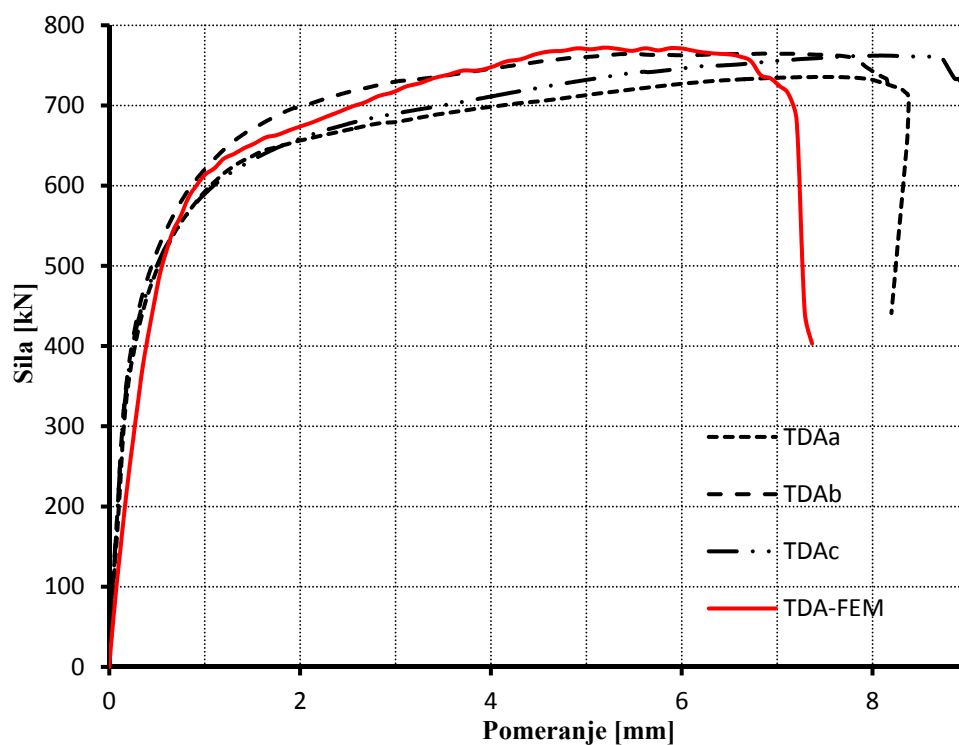
Slika 4.14: Uticaj horizontalne krutosti oslonca – FEM model ST

4.3 Prikaz rezultata

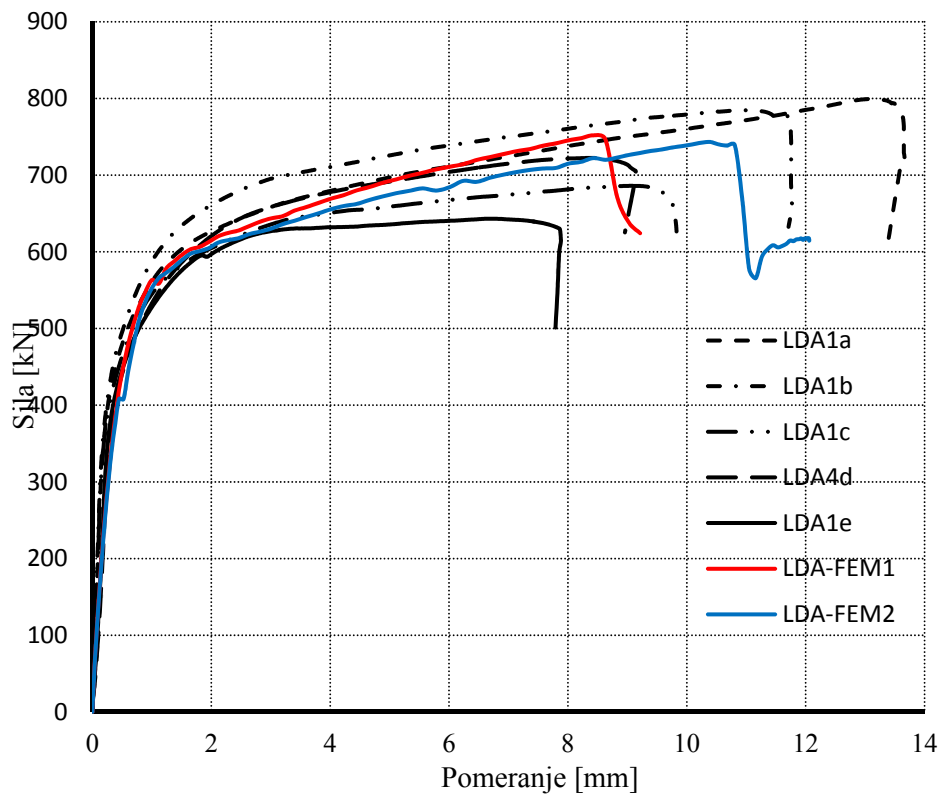
Dobijeni rezultati iz numeričkih modela upoređeni su sa vrednostima dobijenim eksperimentalnim putem. Svi numerički modeli su izvedeni sa istim parametrima materijala. Naime, finalna kalibracija je podrazumevala izbor jedinstvenih parametara za sve analizirane uzorke. Na slikama su prikazani dijagrami sila-pomeranje dobijeni pomoću numeričkih modela zajedno sa eksperimentalnim rezultatima.



Slika 4.15: Dijagrami sila – podužno klizanje, poređenje uzorci ST i FEM rezultati

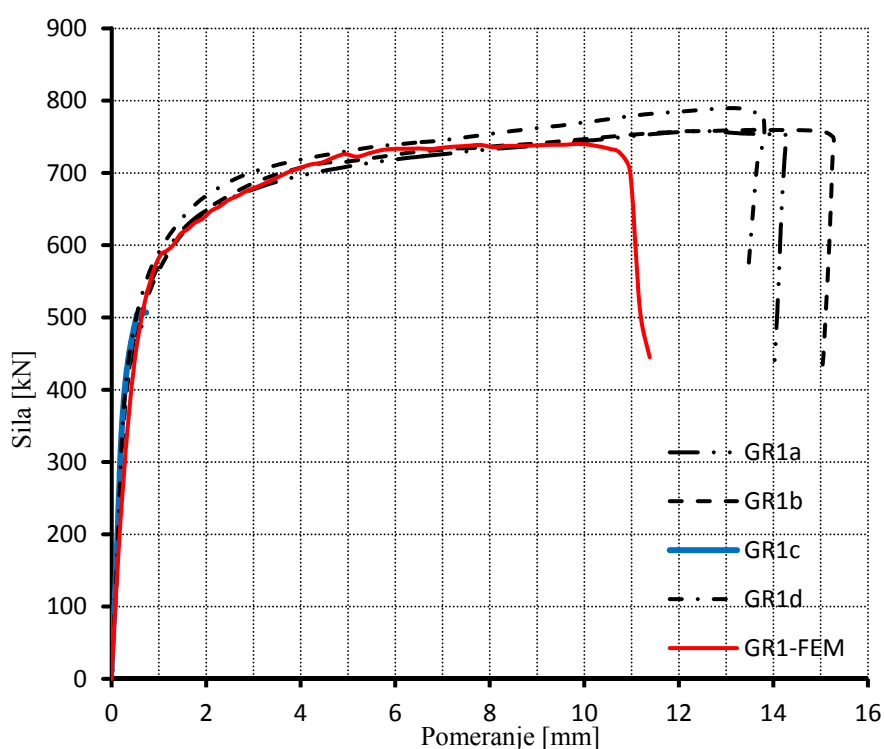


Slika 4.16: Dijagrami sila – podužno klizanje, poređenje uzorci TDA i FEM rezultati



Slika 4.17: Dijagrami sila – podužno klizanje, poređenje uzorci LDA1 i FEM rezultati

Na slici 4.17 prikazana su dijagrami dva numerička modela uzoraka LDA1. Rezultat LDA1-FEM1 je međurezultat pri kalibrisanju modela. Osnovna razlika je u rezultatima pomeranja pri graničnoj vrednosti smičućeg opterećenja. Pri analizi rezultata korišćena su oba modela i upoređene su vrednosti sila i napona, u betonu oko moždanika i u samim moždanicima. Na ovaj način je proverena osetljivost dobijenih vrednosti napona i sila u modelu u odnosu na dijagram sila podužno klizanje za ceo model. Vrednosti dobijenih rezultata iz ova dva modela su praktično jednake sa istu vrednost smičućeg opterećenja.



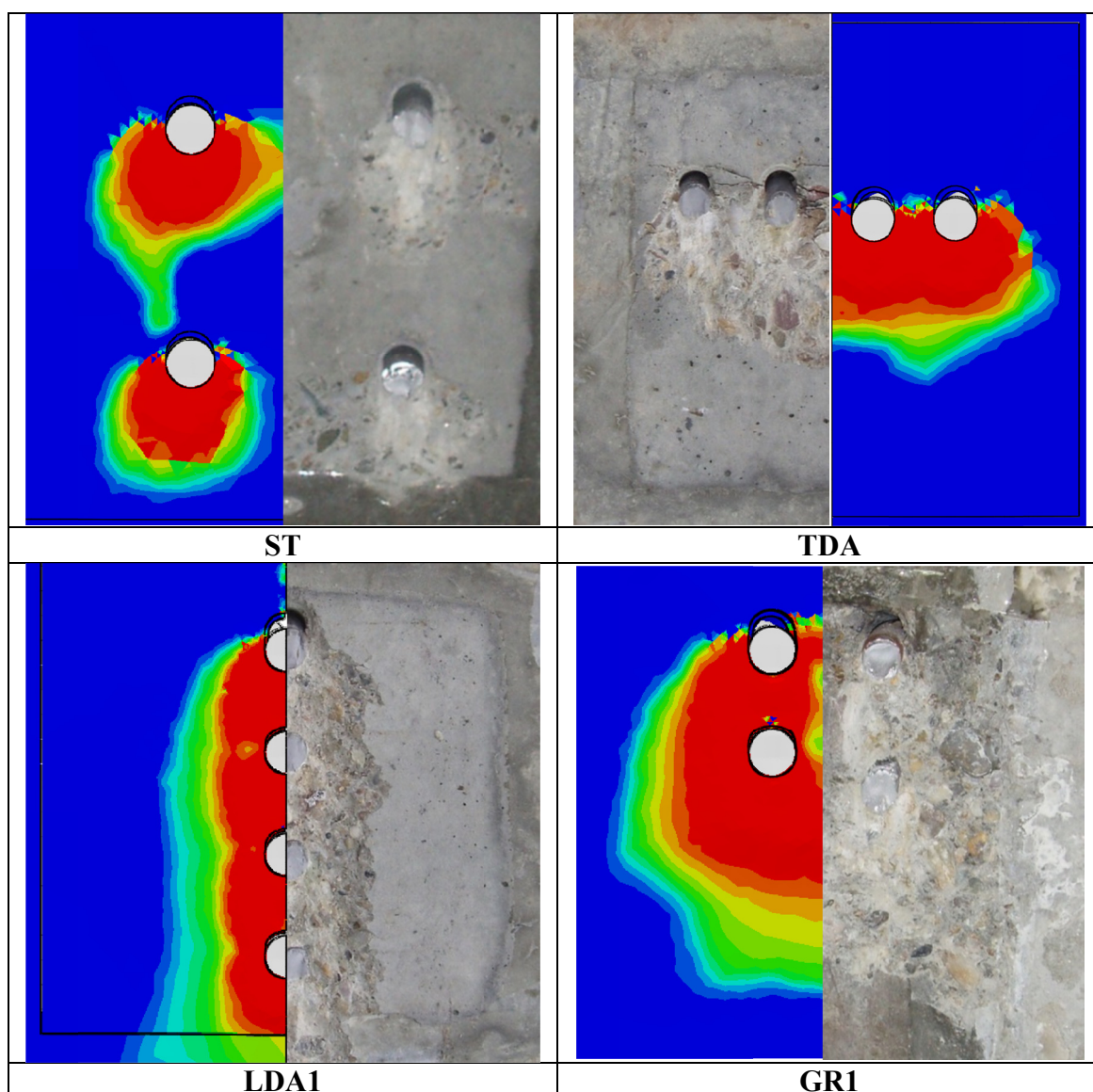
Slika 4.18: Dijagrami sila – podužno klizanje, poređenje uzorci GR1 i FEM rezultati

Analizirajući prikazane rezultate, (dobijene vrednosti graničnih nosivosti, konačnih pomeranja u podužnom smičućem spoju), uočava se da se rezultati FEM modela i eksperimentalno merenih vrednosti dobro slažu. Treba naglasiti da su parametri materijala, krutosti itd. koji su korišćeni u svim numeričkim modelima jednaki, ili u granicama $\pm 3\%$ u odnosu na srednju vrednost parametra. Treba naglasiti da je ponašanje numeričkog modela, standardnog testa u odnosu na numeričke modele sa grupama moždanika, za inicijalno korišćene vrednosti parametara bilo značajno različito. Tek konačnom kalibracijom parametara se postiglo da se svi numerički modeli

dosta dobro poklapaju sa eksperimentalnim rezultatima za iste vrednosti parametara koji su varirani u okviru numeričke analize.

Numerički modeli koji su razvijeni i kalibrisani na osnovu jednog eksperimentalnog testa mogu biti nepouzdana. Na osnovu iskustva tokom izrade modela, može se izvesti preporuka da je za pouzdan numerički model kojim se želi analizirati spoj, potrebno minimum dva eksperimentalna rezultata sa bitno različitim parametrima spoja čiji se uticaj želi analizirati.

Na slici 4.19 prikazano je poređenje zona oštećenja u betonskoj ploči ispitanih uzoraka i zona betonske ploče u FEM modelu neposredno pre loma (sa visokim vrednostima parametra oštećenja).



Slika 4.19: Oblik zone oštećenja u betonskoj ploči, ispitani uzorci i FEM modeli

Za potrebe parametarske analize urađeno je šest numeričkih simulacija. Prva tri modela sa grupom od četiri moždanika izvedena su sa različitim prečnicima moždanika (12 mm i 19 mm). Druga grupa modela obuhvatila je tri različite grupe moždanika izvedene sa moždanicima prečnika $d=16$ mm visine $h_{sc}=100$ mm. Analiza dobijenih rezultata u numeričkim modelima prikazana je u narednom poglavlju.

5. NOSIVOST GRUPE MOŽDANIKA

U ovom poglavlju analizira se nosivost grupe moždanika i izvešće se zaključci i preporuke za proračun nosivosti grupe moždanika. Analizom vrednosti sila u elementima veze definisan je model prenosa sila između konstrukcionog čelika i montažne armiranobetonske ploče. Prikazana su tri moguća modela loma. Razmatranja su ograničena na grupe moždanika koje su eksperimentalno i pomoću numeričkih modela analizirane u prethodnim poglavljima.

5.1. Mehanizmi loma grupe moždanika pri graničnom stanju nosivosti

Definisana su tri moguća mehanizma loma: lom moždanika, lom pritisnutog betona i lom zatezanjem piramide betona („concrete cone failure“). Koji od modela loma spoja će biti merodavan za određenu grupu moždanika zavisi od: geometrije moždanika, klase betona, broja moždanika i rasporeda moždanika u grupi.

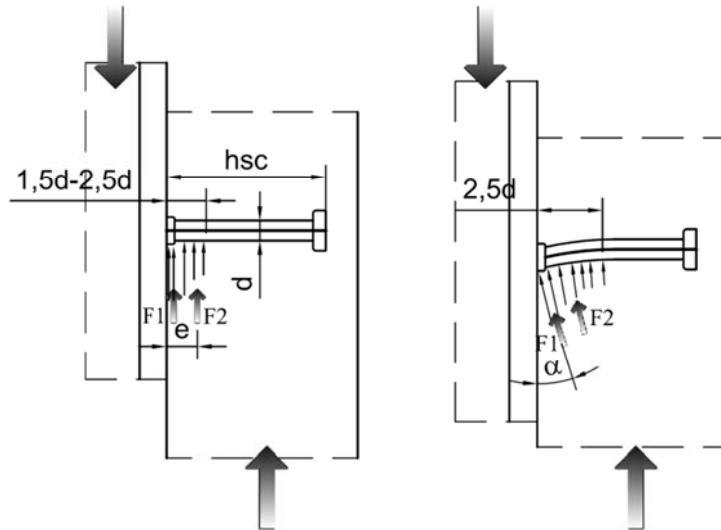
5.1.1 Lom betona zatezanjem

Pri graničnom stanju nosivosti moždanika, u stablu moždanika se javljaju smičuća sila i sila zatezanja. Pri malim vrednostima smičuće sile rezultanta sila koje deluju u kontaktnim površima između betona i moždanika je približno paralelna sa kontaktnom površinom. Povećanjem vrednosti smičuće sile dolazi do velikih plastičnih deformacija betona, prvo neposredno uz koren moždanika, a kasnije i po visini stabla do visine oko 1,5 prečnika moždanika. Ovo ima za rezultat deformaciju moždanika i promenu pravca kontaktnih sila u kontaktnim površima između moždanika i betona. Rezultanta sila menja pravac sa povećanjem opterećenja. Ugao rezultante sa kontaktnom površi zavisi od nivoa opterećenja. Aksijalna sila zatezanja koja se javlja u moždaniku je posledica:

- Globalnog modela prenosa smičuće sile između čeličnog profila i betonskog dela poprečnog preseka.
- Deformacije moždanika, tj. promene pravca rezultante sila u kontaktnoj površi moždanika sa betonom, što za rezultat ima „utezanje“ betona između

korena i glave moždanika. „Utegnuti“ beton u kome se javlja hidrostatičko stanje napona ima znatno veću nosivost pri pritisku.

Na slici 5.1 ilustrovane su sile u korenu moždanika za granično stanje upotrebljivosti i granično stanje nosivosti.



Slika 5.1: Rezultanta kontaktnih sila u kontaktnoj površi moždanika sa betonom

Intenzitet aksijalne sile u moždaniku zavisi od ugla rezultantante u odnosu na kontaktnu ravan između konstrukcionog čelika i betonske ploče. Ovaj ugao je funkcija dva parametra: čvrstoće betona na pritisak i krutosti moždanika na savijanje (prečnika moždanika). Ovaj vid loma su opisali Olgard i dr. [41], Oehlers [39]. Oehlers u svojoj tezi [39] je pokazao da je vrednost aksijalne sile od 15 % do čak 40% od vrednosti smičuće sile. Da li će usled smičuće sile doći do loma betona usled zatezanja ili do loma moždanika na smicanje, direktno zavisi od granične nosivosti moždanika na zatezanje po kriterijumu loma piramide betona na zatezanje. Jedan od načina za proračun nosivosti na zatezanje naveden je i u tehničkom upustvu ETAG 001 aneks C [10]. Prema ovim preporukama nosivost na zatezanje grupe ankera, jednaka je manjoj od sledećih vrednosti:

$$N_{Rk,s} = A_s f_y$$

$$N_{Rk,c} = 1,4 \cdot N_{Rk,c}^0 \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \quad (5.1)$$

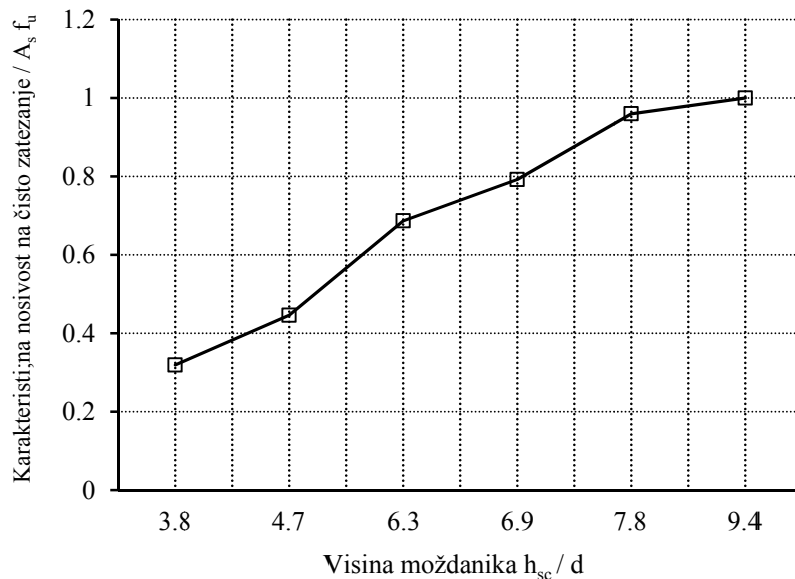
Gde su:

- A_s površine stabla moždanika
- $A_{c,N}$ i $A^0_{c,N}$ površine definisane na slici (5.2)
- $N^0_{Rk,c}$ karakteristična inicijalna nosivost na zatezanje prema izrazu (5.2)

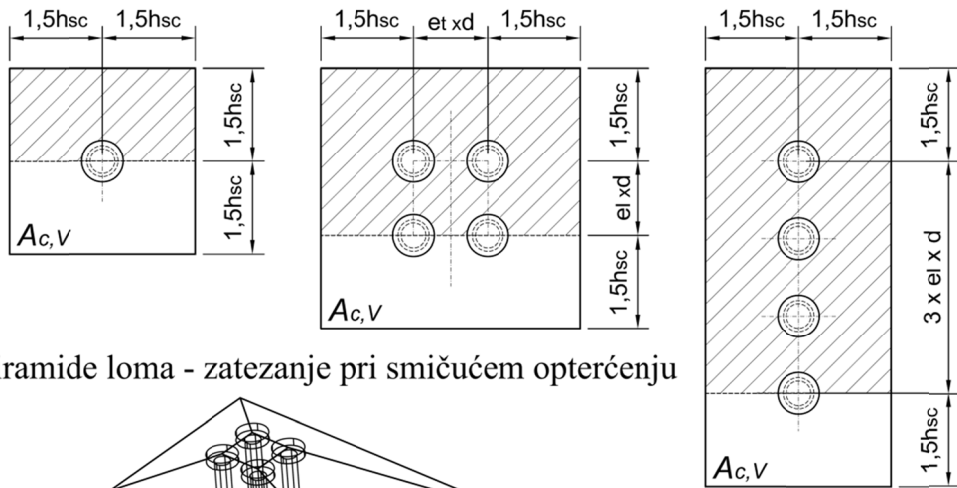
$$N^0_{Rk,c} = 7.2 \cdot \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{sc}^{1.5} \quad (5.2)$$

Na slici 5.3 definisane su površine baze piramide loma betona za jedan moždanik kao i za analizirane grupe moždanika LDA1 i GR1. Na slici su prikazane površine koje odgovaraju čistom zatezanju odnosno zatezanju koje je posledica smičućeg opterećenja.

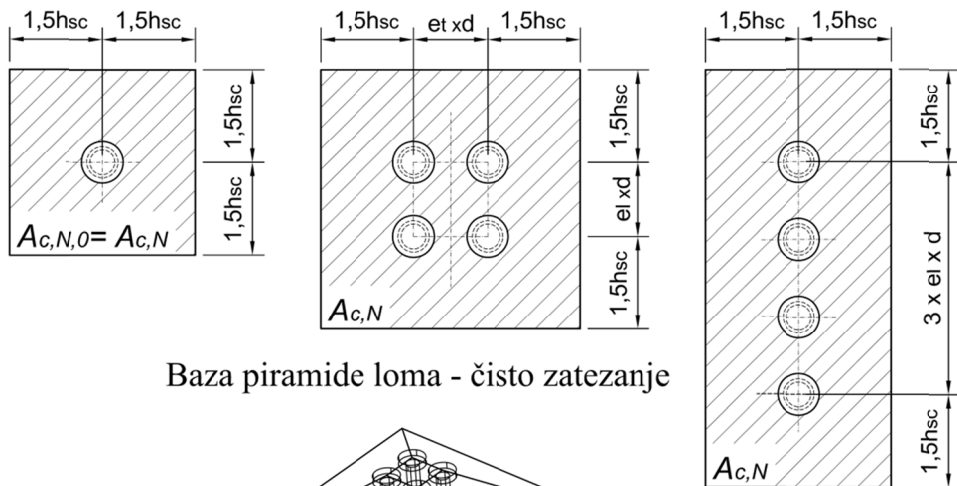
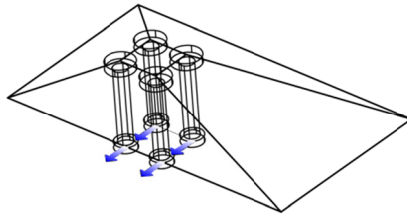
Na sličan način je definisana nosivost moždanika na zatezanje u preporukama PCI [13]. Na dijagramu, slika 5.2, prikazana je karakteristična nosivost na zatezanje pojedinačnog moždanika sa glavom u zavisnosti od visine moždanika nakon zavarivanja h_{sc} za beton kvaliteta $f_{ck}=35$ MPa.



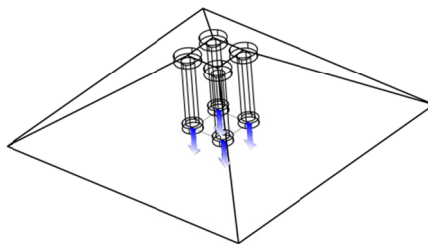
Slika 5.2: Nosivost na zatezanje u funkciji visine moždanika



Baza piramide loma - zatezanje pri smičućem opterećenju



Baza piramide loma - čisto zatezanje



Slika 5.3: Površine betona za proračun nosivosti moždanika na zatezanje

U literaturi koja se bavi problematikom nosivosti ankera na čisto zatezanje ili nosivošću moždanika sa glavom na čisto zatezanje Pallares i Hajjar [42] definisana je granična visina sredstva za vezu za koju se pouzdano može reći da lom betona na zatezanje nije merodavan kriterijum loma. Preporučene visine sredstva za vezu su $7.5d$

za betone normalne težine i 9.0d za betone težine manje od 1750 kg/m³ u slučajevima čistog zatezanja, odakle se može izvesti zaključak da se definisanjem minimalne potrebne visine moždanika može isključiti lom betona usled zatezanja moždanika koji se javlja usled smičućeg opterećenja.

U slučaju grupe moždanika dolazi do preklapanja piramida loma betona oko pojedinačnih moždanika. Blisko postavljeni moždnici imaju znatno manju nosivost na zatezanje po kriterijumu loma betonske prizme na zatezanje. Međutim sile zatezanja u moždanicama u slučaju smičućih spojeva nisu velike. Da bi se izbegao lom piramide betona zatezanje potrebno je u slučaju grupisanih moždanika koristiti moždanike veće visine. Ukoliko bi konstruktivno bilo moguće usvojiti moždanik dovoljne visine ovaj vid loma grupe moždanika bi se mogao isključiti.

5.1.2 Lom moždanika usled kombinovanog naprezanja zatezanjem i smicanjem

U literaturi se može naći nekoliko interakcionih izraza za nosivost moždanika na kombinovano naprezanje zatezanjem i smicanjem. Svi izrazi su zasnovani na interakcionoj formuli za nosivost ankera koju su predložili McMackin i dr. [36]. Interakcioni izraz je uvršćen i u PCI preporuke [13] i glasi:

$$\left(\frac{Z_{Ed}}{Z_{Rd}}\right)^{5/3} + \left(\frac{V_{Ed}}{P_{Rd}}\right)^{5/3} \leq 1 \quad (5.3)$$

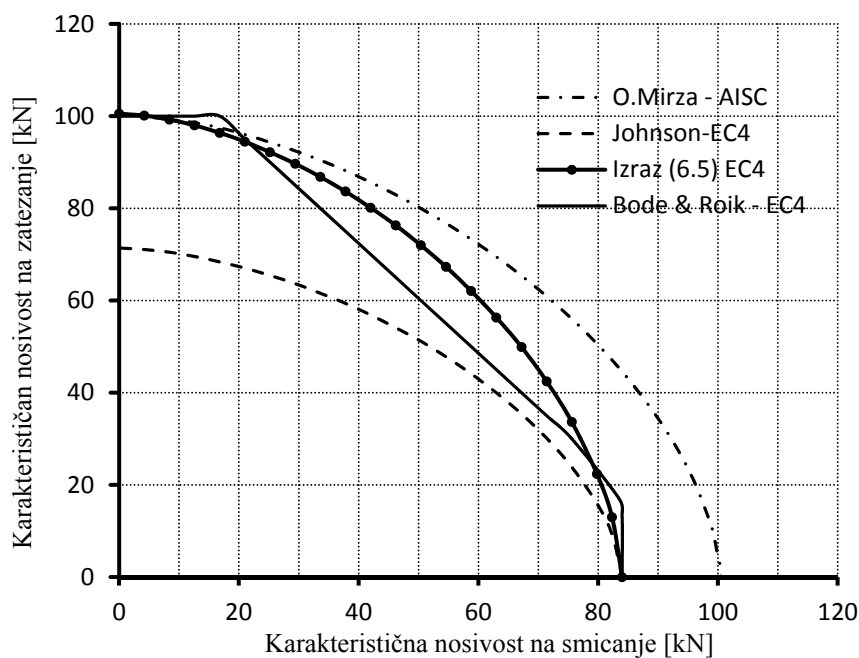
R.P. Johnson je predložio interakcionu formulu za nosivost moždanika pri kombinovanom naprezanju zatezanjem i smicanje na sledeći način:

$$\left(\frac{Z_{Ed}}{0,85P_{Rd}}\right)^{5/3} + \left(\frac{V_{Ed}}{P_{Rd}}\right)^{5/3} \leq 1 \quad (5.4)$$

Ovako formulisan interakcioni izraz daje konzervativne vrednosti u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Ovo je posebno izraženo u slučajevima ankera – moždanika veće visine pa kriterijum loma betona pri zatezanju nije merodavan kriterijum. Ukoliko bi se definisala minimalna visina moždanika, tako da je za kriterijum loma zatezanjem moždanika merodavan lom moždanika a ne lom betona izraz bi se mogao formulisati na sledeći način:

$$\left(\frac{Z_{Ed}}{A_s \cdot f_u / \gamma_v}\right)^{5/3} + \left(\frac{V_{Ed}}{P_{Rd}}\right)^{5/3} \leq 1 \quad (5.5)$$

U literaturi O.Mirza i dr. [37] na sličan način formulišu nosivost moždanika na kombinovano naprezanje. Interakcioni dijagrami prema izrazima (5.4) i (5.5) i predloženom rešenju O.Mirze i dr. [37] prikazani su na slici 5.4. Interakcioni dijagrami su izvedeni sa karakterističnim vrednostima nosivosti za moždanike prečnika 16 mm. U ovom slučaju podrazumeva se da je visina moždanika dovoljno velika da kriterijum loma piramide betona na zatezanje nije merodavan kriterijum loma.



Slika 5.4: Grafički prikaz interakcionih dijagrama zatezanje-smicanje

Bode i Roik [17] su definisali i predložili trilinearan interakcioni dijagram za nosivost moždanika na kombinovano naprezanje. Interakcioni dijagram koji je definisan izrazom (5.6) takođe je prikazan na slici 5.4:

$$\left(\frac{Z_{Ed}}{Z_{Rd}}\right) + \left(\frac{V_{Ed}}{P_{Rd}}\right) \leq 1.20 \quad (5.6)$$

Analizirajući interakcione dijagrame posebno izraz (5.6) može se zaključiti da u slučaju interaktivnog delovanja, smicanja i sile zatezanja, nije potrebna redukcija

nosivosti na smicanje pri vrednosti sile zatezanja do 20% nosivosti moždanika na zatezanje. Ako se analizira predloženi izraz (5.5) može se zaključiti da se definisanjem potrebne visine moždanika može postići, da redukcija nosivosti pri smicanju bude samo 5-10%, pri vrednosti sile zatezanja čija je vrednost do 40% od vrednosti granične nosivosti na zatezanje.

Na osnovu ovoga može se zaključiti da za vrednosti sile zatezanja koja se javlja u moždanicima (15-40% vrednosti smičuće sile) usled smičućg opterećenja nije potrebna značajna redukcija nosivosti na smicanje moždanika.

5.1.3 Lom betona usled lokalnog pritiska

Lom betona usled lokalnog pritiska može se definisati u zonama betona van gabarita moždanika. Naime, poznato je da se u delu betona neposredno oko moždanika javljaju naponi znatno veći, (i do 10 puta), od karakteristične čvrstoće betona na pritisak. Ovo je rezultat prostornog stanja napona u zoni betona oko moždanika. Ova činjenica je objašnjena u radu Pavlovića i dr. [44] i u radu Oehlers-a [39]. Evrokod 2 definiše graničnu nosivost betona na lokalni pritisak kao:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (5.7)$$

U prethodnom izrazu su:

- A_{c0} površina betona izložena lokalnom pritisku,
- A_{c1} površina mogućeg rasprostiranja lokalnog pritiska betona ista po obliku kao i površina betona koja je izložena lokalnom pritisku,
- f_{cd} proračunska čvrstoća betona pri pritisaku.

Lokalni pritisak se prostire kroz beton pod nagibom 1:5 u odnosu na izloženu površinu betona. Za moždanike koji se nalaze u punoj betonskoj ploči, granična nosivost na lokalni pritisak se može definisati kao:

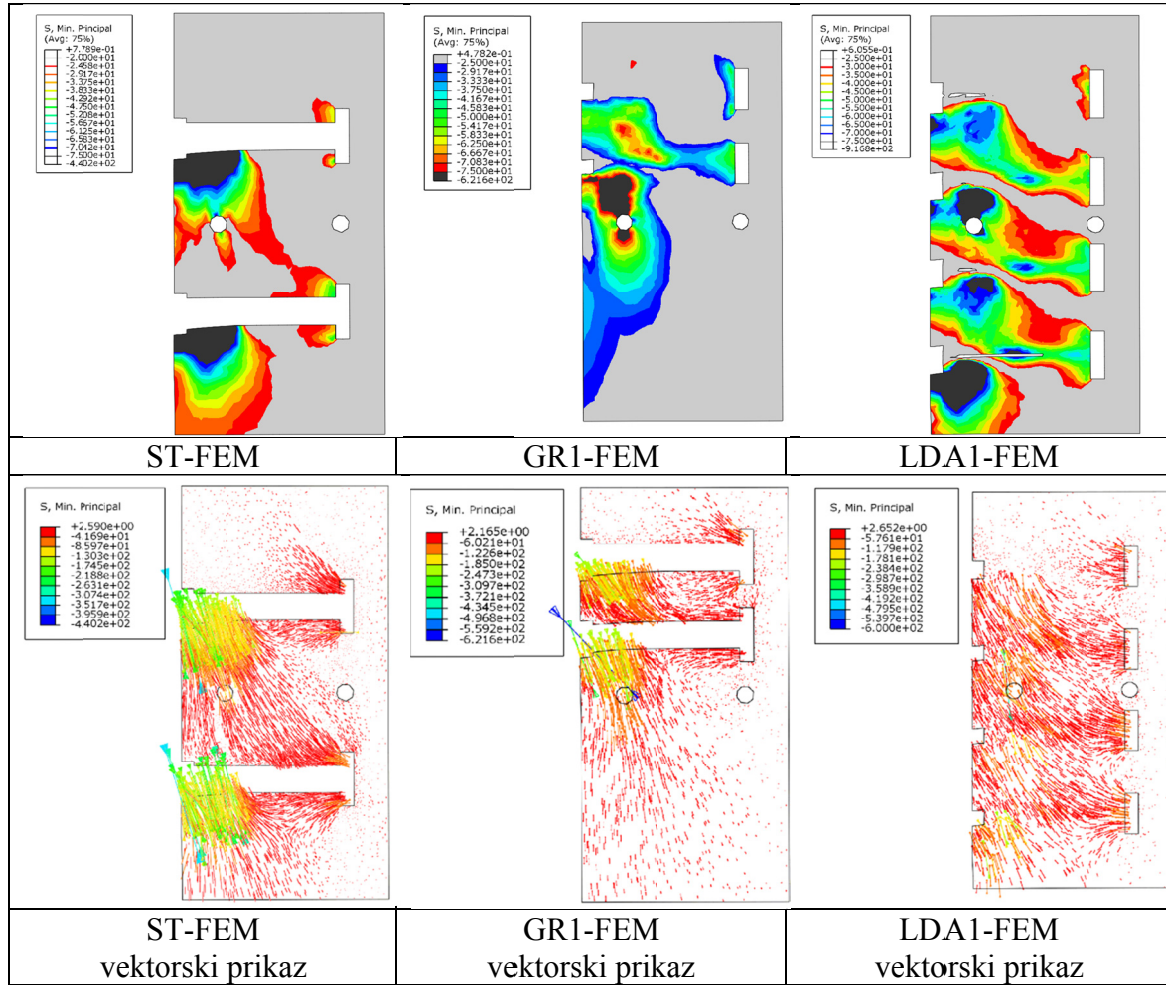
$$F_{Rdu} = 3 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (5.8)$$

Ovo važi za deo betonskog elementa koji nije u zoni neposredno oko moždanika. Analizirajući numeričke modele uočeno je da već na 15-20 mm od kontaktne površi moždanika i betona, napon pritiska u betonu ima vrednost manju od trostruke karakteristične čvrstoće na pritisak.

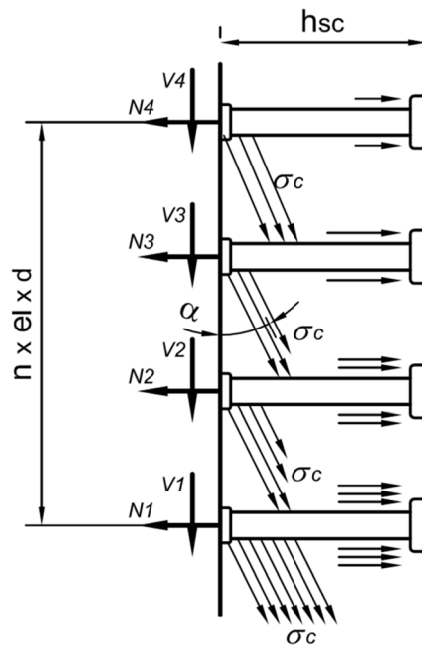
Imajući u vidu da su naponi pritiska u betonu u delu neposredno oko moždanika višestruko veći, usled hidrostatičkog stanja napona u betonu, rezultirala je da se u literaturi opisuju modeli loma kvalitativno. Svi izvedeni izrazi za nosivosti su rezultat statističke obrade eksperimentalnih rezultata. Analitički model nosivosti koji bi se zasnivao na vrednostima napona u betonu koji su veći od trostruke vrednosti karakteristične čvrstoće pri pritisku, morao uzeti u obzir velike vrednosti hidrostatičkog pritiska u betonu.

5.2. Granično stanje nosivosti grupe moždanika

Granična nosivost grupe moždanika definisana su na osnovu modela prenošenja smičuće sile iz čeličnog profila u armiranobetonsku ploču. Model sa pritisnutim dijagonalama u betonu i zategnutom armaturom je opšte poznat model za prenos smičućih sila u armiranobetonskim konstrukcijama. Analizirajući stanje napona i pravce glavnih napona u vezi između čelika i betona koja je ostvarena moždanicima može se takođe uočiti pomenuti model. U ovom slučaju ulogu zategnute armature preuzimaju moždanici. Da bi se ovakav model realizovao neophodno je da se koriste moždanici sa glavom. Svi savremeni propisi definišu geometriju moždanika sa glavom, sa geometrijom glave moždanika koja je izvedena iz uslova da pri graničnom opterećenju nikada ne dođe do loma glave moždanika. Na slici 5.5 prikazani su glavni naponi pritiska u betonu dobijeni u numeričkim modelima. Jasno se mogu uočiti pritisnute dijagonale u betonu. Analizom sila koje su dobijene integracijom napona u poprečnom preseku moždanika, u moždanicima se javljaju sile zatezanja inteziteta od 10 do 35 kN, pri vrednosti smičuće sile od 90% od vrednosti granične smičuće sile. Na osnovu ovih činjenica može se definisati model prenosa smičuće sile između čeličnog profila i betonske ploče. Model je ilustrovan na slici 5.6.



Slika 5.5: Glavni naponi pritiska u betonu



Slika 5.6: Model prenosa smičuće sile

Analiza nosivosti grupe moždanika bazira se na rezultatima numeričkih modela LDA1 i GR1. Prvo će se analizirati vrednosti aksijalne sile u moždanicima. Vrednost sile zatezanja u spojnom sredstvu je rezultat geometrije standardnog testa (spregnute grede). Na osnovu dimenzija i oblika armiranobetonske ploče, ispitanih uzoraka, sračunat je ugao pritisnute dijagonale u armiranobetonskoj ploči $\theta=28^\circ$ (videti sliku 5.7). U spregnutom nosaču sila zatezanja u spojnom sredstvu prema [31] a izvedena u skladu sa oznakama na slici 5.7 jednaka je:

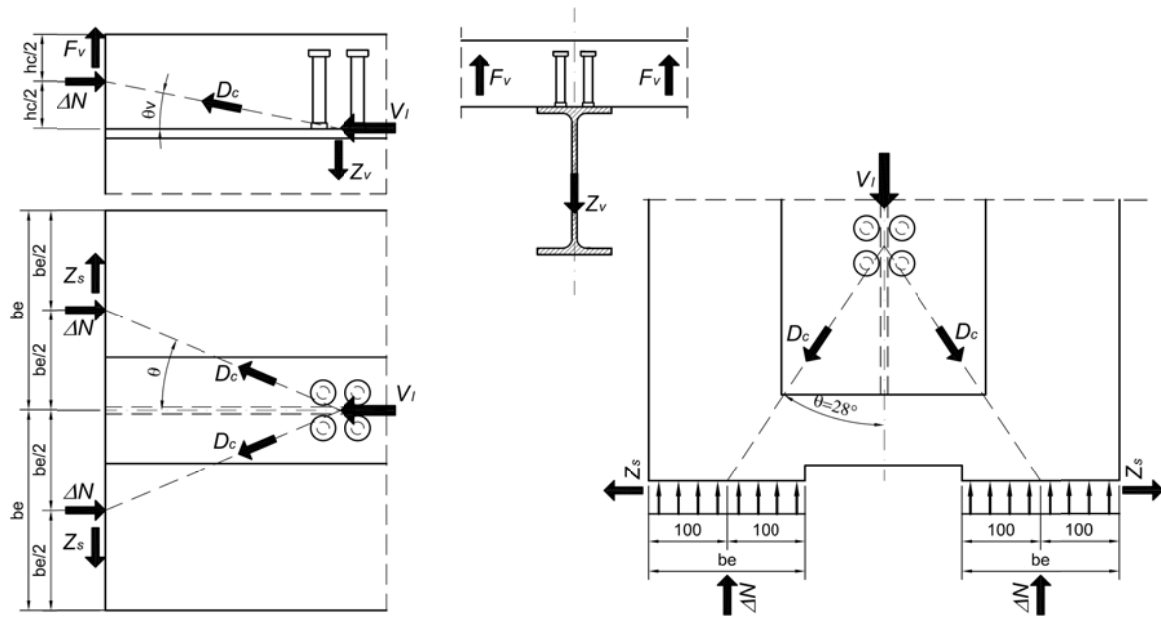
$$Z_v = V_L \frac{h_c / 2}{b_e / 2} \tan(\theta) = \frac{P_{ult}}{2} \cdot \frac{6 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \cdot \tan(28) = 0.159 \cdot \frac{P_{ult}}{2}$$

U predhodnom izrazu su:

- V_L – podužna sila smicanja,
- h_c debljina armiranobetonske ploče,
- b_e „angažovana“ širina armiranobetonske ploče,
- θ ugao pritisnute dijagonale u betonskoj ploči.

Vrdnost sile zatezanja jednake je 16% vrednosti smičuće sile. Ovo je upravo i minimalna vrednost (15%) koju Oehlers navodi u svom radu [39]. Međutim konstatuje takođe da vrednost sile u moždanicima može biti i do 40% vrednosti smičuće sile. Ova razlika je posledica hidrostatičkog stanja napona u betonu oko moždanika. I što su uslovi za održanje hidrotatičkog stanja napona (nosivost piramide betona na zatezanje) bolji to je sila zatezanja u moždanicima veća.

Na slikama 5.8 i 5.10 prikazana je promena aksijalne sile u moždanicima u zavisnosti od nivoa smičućeg opterećenja. U slučaju grupe LDA1 jasno se može uočiti da se lom dešava u prvom moždaniku (videti slike 5.6 i 5.8). Dolazi do plastifikacije prvog moždanika, pri vrednostima smičuće sile koja je veća od 70% vrednosti granične smičuće sile. Za veće vrednosti opterećenja sila zatezanja u moždaniku ostaje konstantna. Maksimalna vrednost sile zatezanja do 40 kN, u slučaju četiri moždanika u redu u prcu smičuće sile, rezultira redukcijom nosivosti na smicanje do maksimalno 10% u skladu sa objašnjenjem datim u delu 5.1.2.



Slika 5.7: Šematski prikaz prenošenja smičuće sile između čeličnog profila i betonskog dela preseka prema [31]

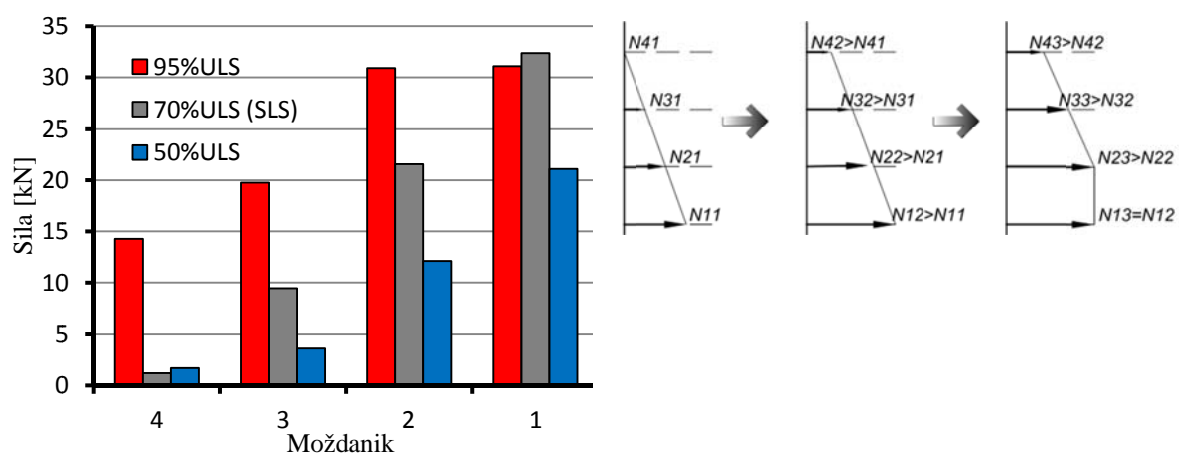
U slučaju uzoraka GR1, takođe dolazi do loma moždanika smicanjem pri граниčnom opterećenju, ali dolazi i do pojave prslina u betonu. Prsline koje se formiraju u armiranobetonskoj ploči odgovaraju početku loma zatezanjem prizme betona što je karakteristika kombinovanog loma spoja sa moždanicima. Vrednost aksijalne sile u moždanicima raste do vrednosti smičućeg opterećenja od 90% vrednosti граниčne smičuće sile. Za veće vrednosti smičućeg opterećenja sila zatezanja u svim moždanicima ostaje konstantna. Ovo je rezultat pojave prsline u betonskoj ploči.

Vrednost rezultante aksijalnih sila u moždanicima su:

- Za grupu moždanika tipa LDA1 je 95.0kN
- Za grupu moždanika tipa GR1 vrednost je 84.0 kN.

U oba ova slučaja, lom pri граниčnoj vrednosti smičuće sile je smicanjem moždanika. Izneto objašnjenje, potvrđeno je na fotografijama poprečnog preseka armiranobetonske ploče, neposredno uz moždanike. Na slici 5.9 jasno se vidi da ne postoje prsline u betonskoj ploči. Oštećenje betonske ploče je praktično minimalno. Međutim, na slici 5.11 može se uočiti karakterističana prslina u betonskoj ploči koja je

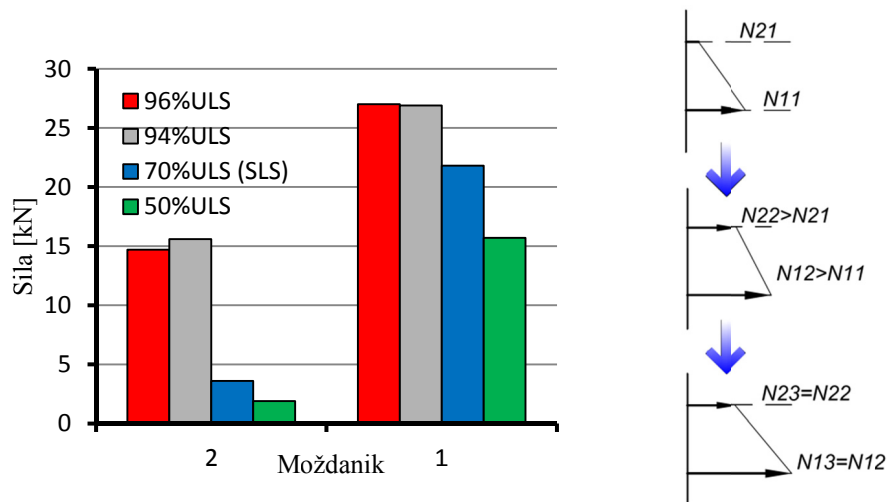
posledica sile zatezanja. Ovo jasno ukazuje na pojavu mešovitog loma kod grupe moždanika tipa GR1.



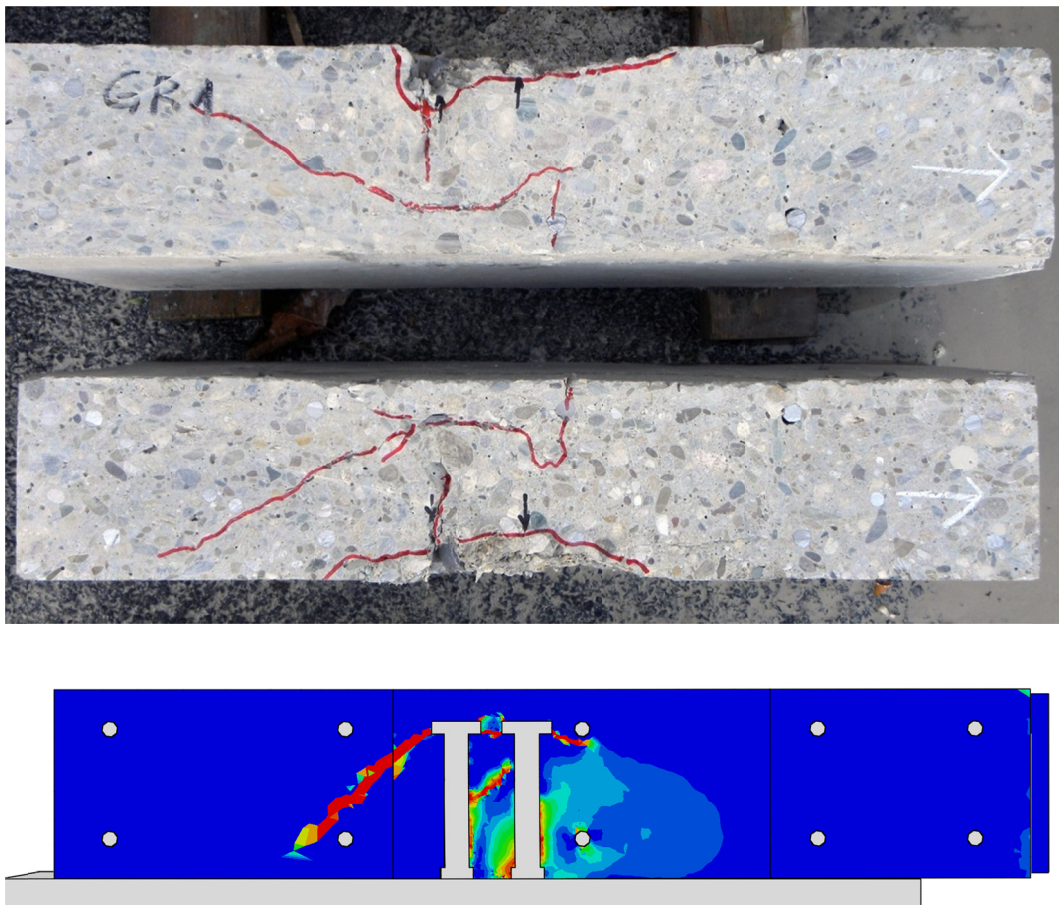
Slika 5.8: Vrednost aksijalne sile u moždanicima, grupa LDA1



Slika 5.9: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka LDA1 nakon ispitivanja



Slika 5.10: Vrednost aksijalne sile u moždanicima, grupa GR1



Slika 5.11: Poprečni presek kroz armiranobetonsku ploču uzorka GR1 nakon ispitivanja, poprečni presek - FEM model

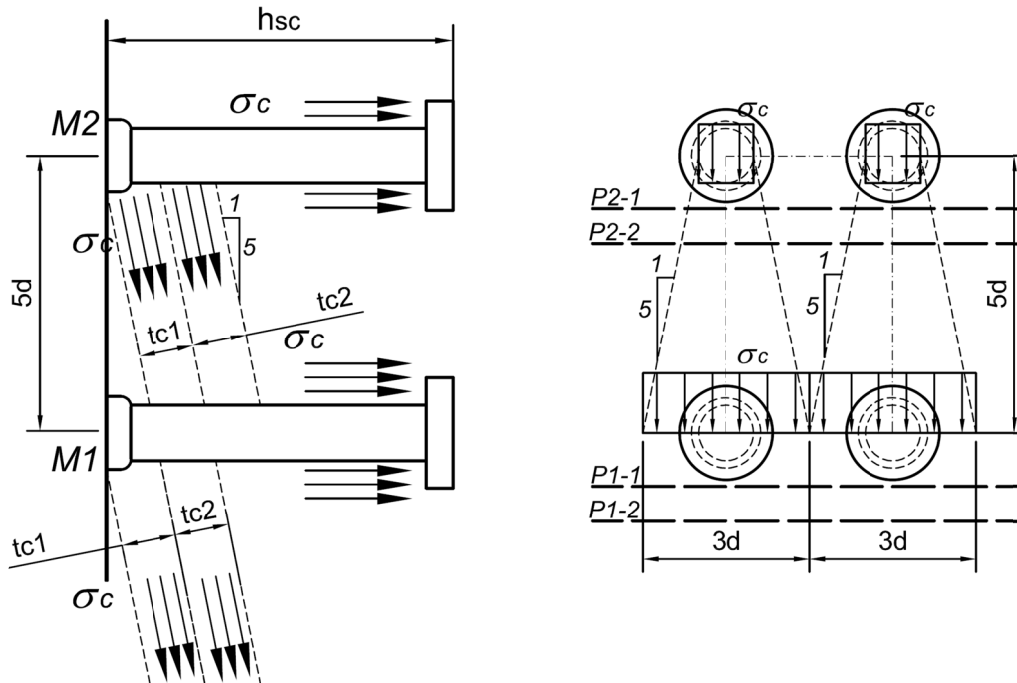
Lom betona usled zatezanja kod uzoraka GR1 je posledica dva fenomena. Prvi je da je nagib pritisnute dijagonale u betonu veći zbog smanjenog rastojanja između moždanika. Drugi je da ovakva dispozicija moždanika podrazumeva manju bazu piramide loma betona usled zatezanja pri smičućem opterećenju prema slici 5.3.

Lom betona zatezanjem koje je posledica smičuće sile, je karakterističan kod moždanika male visine. Naime, kratki moždanici zbog malog odnosa visine i prečnika se ponašaju kao „trn“ u betonu. Uticaj visine moždanika na nosivost kako je ranije objašnjeno utiče posredno preko nosivosti na zatezanje piramide loma betona na zatezanje. Rezultat male visine moždanika je mala nosivost betona na zatezanje. Stoga visina moždanika se mora uzeti u obzir prilikom definisanja nosivosti grupe moždanika.

Nosivost moždanika na smicanje u značajnoj meri je rezultat prostornog stanja napona u zoni betona ispred moždanika. Hidrostatičko stanje napona se ostvaruje deformacijom moždanika i „utezanjem“ dela betona između korena i glave moždanika. Da bi se ovakvo stanje napona ostvarilo, ne sme se pojaviti lom betona usled zatezanja u zoni oko glave moždanika. U slučaju kratkih moždanika hidrostatičko stanje napona u betonu je teško ostvarivo. Ovo za posledicu ima visok nivo plastičnih deformacija zone (sloja) betona uz koren moždanika pri znatno nižim nivoima napona. Veći procenat smičuće sile se u slučaju kratkih moždanika prenosi stablom. Zbog ovoga napon u višim „slojevima“ betona, ispred moždanika, ima veće vrednosti, pa su i plastične deformacije viših slojeva betona takođe veće. Nema savijanja stabla moždanika zbog velikih deformacija betona. Moždanik se neznatno savija u korenu, a zatim dolazi do loma „otkidanja“ piramide betona. Evrokod 4, kao jedini propis koji dozvoljava primenu kratkih moždanika visine $3d$, predviđa redukciju nosivosti moždanika na smicanje u slučaju primene moždanika visine manje od $4d$.

Pored nosivosti na zatezanje, za definisanje ponašanja i nosivosti grupe moždanika, neophodno je da se analizira i stanje napona u betonu neposredno ispred moždanika. U slučaju standardnog rasporeda moždanika, kada su rastojanja između susednih moždanika u pravcu smičuće sile veća ili jednaka $5d$, šema napona pritiska u betonu je prikazana na slici 5.12. U skladu sa Evrokodom 2 usvojeno je da su pravci napona pritiska usled lokalnog opterećenja u nagibu $1/5$ u odnosu na pravac delovanja sile pritiska. Shodno šemi globalnog prenosa opterećenja u smičućem spoju spregnute

grede, prema slici 5.7 naponi pritiska se prostiru ka težištu betonskog dela spregnutog poprečnog preseka. Odnosno, lokalni naponi pritiska se prostiru levo i desno od spojnog sredstva odnosno od korena moždanika ka sredini visine betonskog elementa.



Slika 5.12: Šematski prikaz napona pritiska u betonu oko moždanika

Na slici 5.12 definisani su „slojevi“ beton debljine t_{ci} na rastojanju z iznad kontaktne ravni između čeličnog profila i betonskog dela spregnute grede. U slučaju kada je rastojanje između redova moždanika $5d$, a imajući u vidu da je nagib pravca glavnih napona ka ravni kontakta čelika sa betonom 1:5, napon ispred moždanika M1 (videti sliku 5.12) se može izraziti kao:

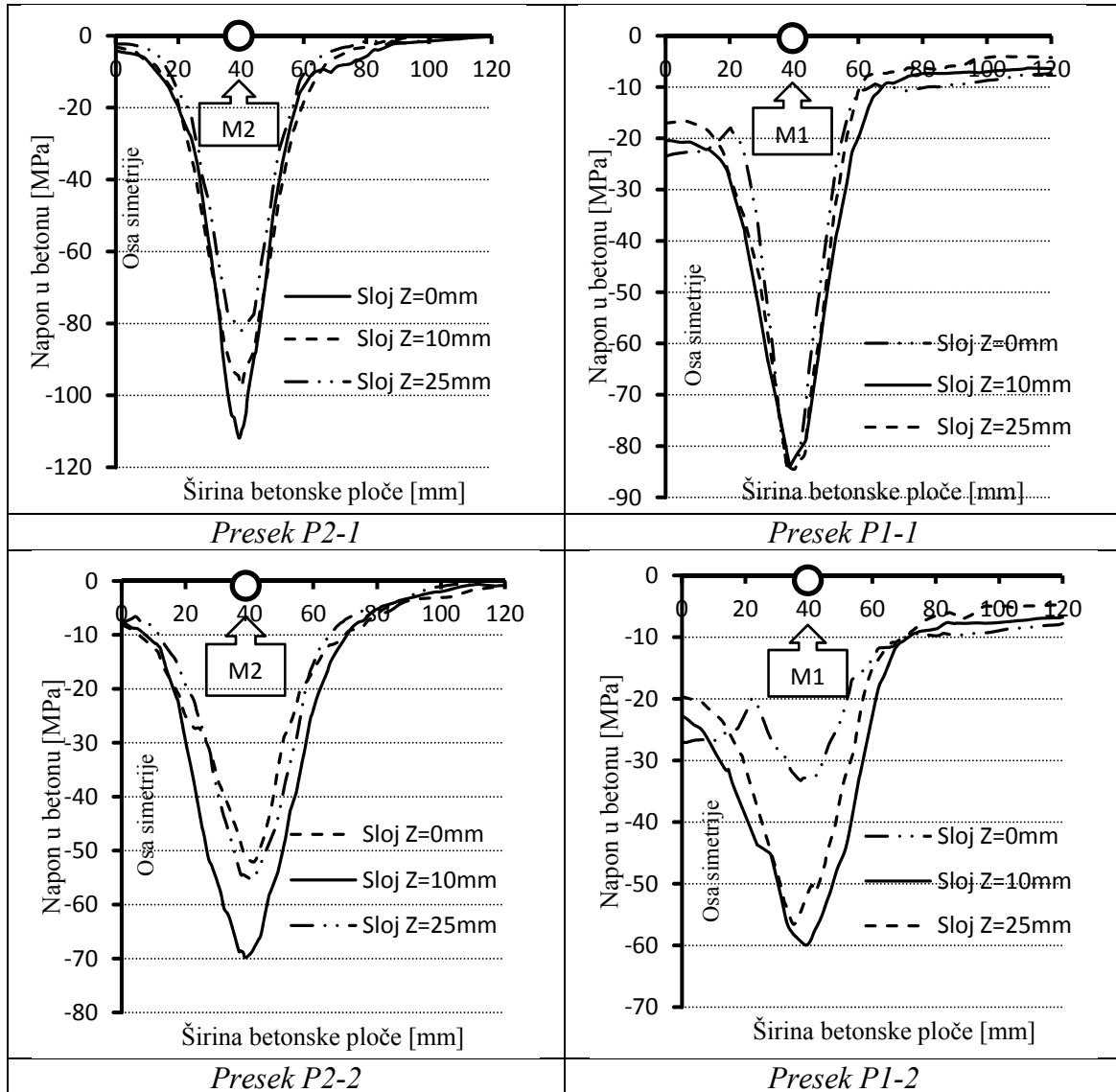
$$\sigma^{M1}(t_{ci}) = \sigma_{tc_i}^{M1} + \sigma_{tc_{i-1}}^{M2} / 3 \quad (5.9)$$

U predhodnom izrazu su:

- M1, M2 – oznaka moždanika u grupi prema slici 5.12,
- t_{ci} – „sloj“ betona prema slici 5.12,
- $\sigma_{tc_i}^{Mj}$ napon pritiska u sliju „i“ u betonu ispred moždanika „j“

Prethodni izraz je izveden uz pretpostavku da je poprečno rastojanje između moždanika jednako ili veće od $3d$. Za ovako definisano poprečno rastojanje moždanika u grupi nema superpozicije lokalnih napona pritiska između susednih moždanika

(upravno na pravac smičuće sile). Rastojanje susjednih moždanika od $3d$, upravno na pravac smičuće sile, usvojeno je u ovom u radu kao minimalno dopušteno rastojanje kada se moždanici koriste u grupama.

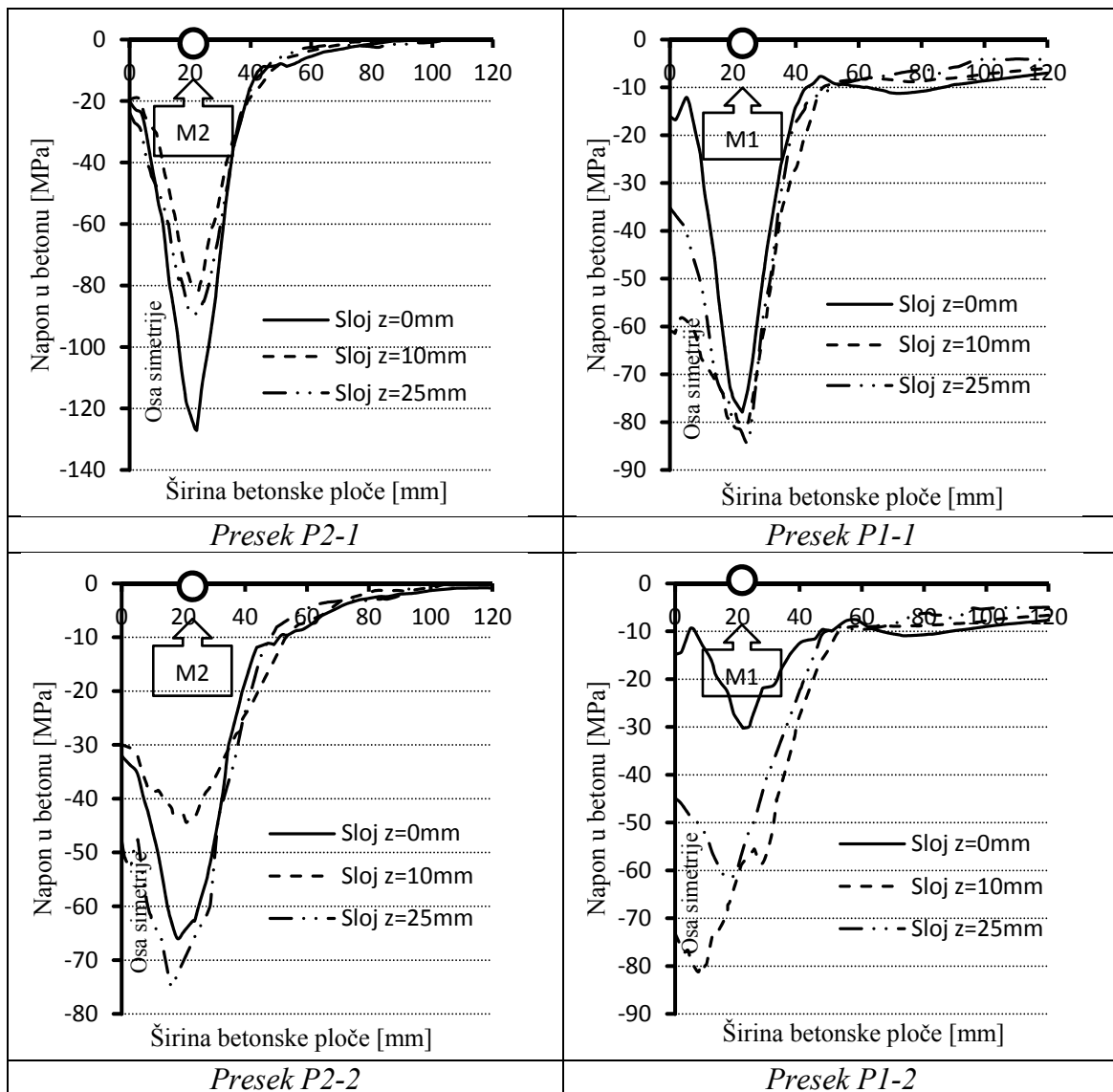


Slika 5.13: Naponi u betonu u presecima prema slici 5.12, grupa ST 80mm

Rezultati napona pritiska u betonu, u pracu smičuće sile, dva numerička modela sa podužnim rastojanjem moždanika od $5d$ prikazani su na slikama 5.13 i 5.14. Prvi model je sa moždanicama na međusobnom rastojanju od 80mm, upravno na pravac sile, dok je kod drugom modela ovo rastojanje 45 mm. Prikazane vrednosti napona pritiska su za nivo opterećenja koji odgovara vrednosti od 90% granične smičuće sile. Prikazane su vrednosti napona u tri nivoa na: 0 mm, 10 mm i 25 mm iznad kontaktne površi čelika i betona. Iz prikazanih vrednosti se jasno vidi da su vrednosti napona pritiska

približno jednake za oba prikazana modela. Na ovaj način je potvrđeno da rastojanje kolona moždanika nema značajan uticaj na nivo lokalnih napona pritiska u betonu u zoni neposredno ispred moždanika.

Na sličan način su analizirani i lokalni naponi pritiska u betonu u slučaju grupe moždanika sa rastojanjima između susednih moždanika manjim od $5d$ (u pravcu delovanja smičuće sile). Rastojanje susednih moždanika $3d$, u pravcu delovanja smičuće sile je usvojeno kao minimalno rastojanje za moždanike u grupi. Ovako definisano minimalno rastojanje je neznatno veće od tehnološki minimalnog rastojanja. Ujedno ovako definisano rastojanje omogućava dovoljan razamak moždanika za kvalitetnu ugradnju betona.



Slika 5.14: Naponi u betonu u presecima prema slici 5.12, grupa ST 45mm

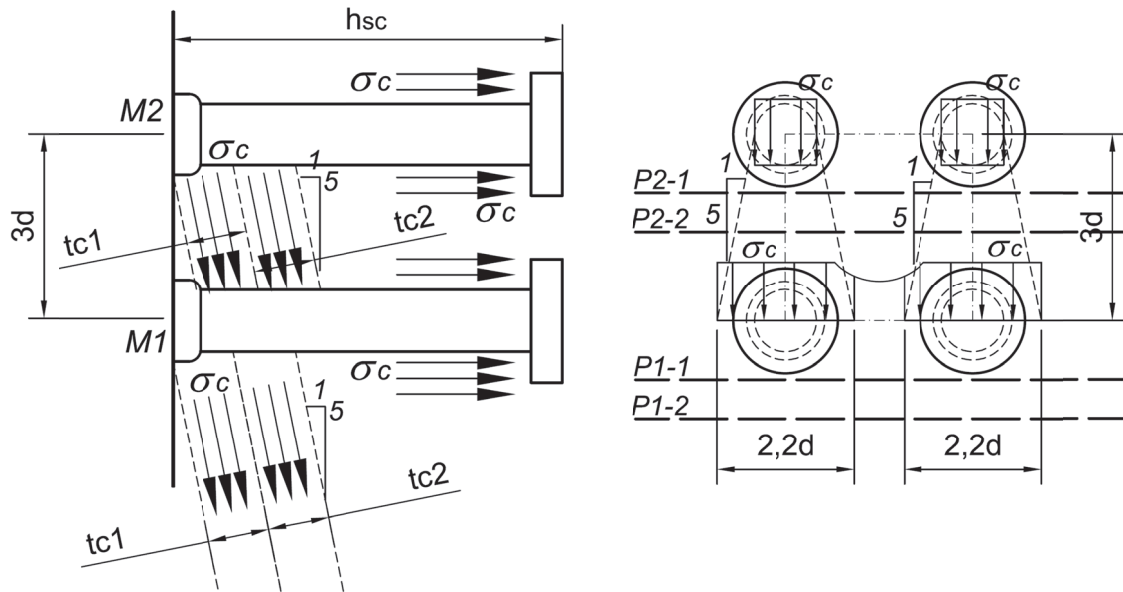
Na skici 5.15 prikazana je šema napona pritiska u betonu u zoni betona neposredno ispred moždanika. Kao i u prethodnom slučaju analiziran je sloj betona t_{ci} na rastojanju z iznad kontaktne ravni čeličnog profila i betonskog dela poprečnog preseka.

Zbog manjeg međusobnog rastojanja između redova moždanika, a usvajajući da se lokalni naponi pritiska prostiru u nagibu 1:5, napon ispred moždanika M1 jednak je:

$$\sigma^{M1}(t_{ci}) = \sigma_{tc_i}^{M1} + \frac{e_1}{5} \sigma_{tc_{i-1}}^{M2} / (2e_1 / 5 + 1) + \frac{5 - e_1}{5} \sigma_{tc_i}^{M2} / (2e_1 / 5 + 1) \quad (5.10)$$

U predhodnom izrazu su:

- M1, M2 – oznaka moždanika u grupi prema slici 5.15,
- t_{ci} – „sloj“ betona prema slici 5.15,
- $\sigma_{tc_i}^{Mj}$ napon pritiska u sliju „i“ u betonu ispred moždanika „j“
- e_1 – podužno rastojanje moždanika podeljeno sa prečnikom moždanika.

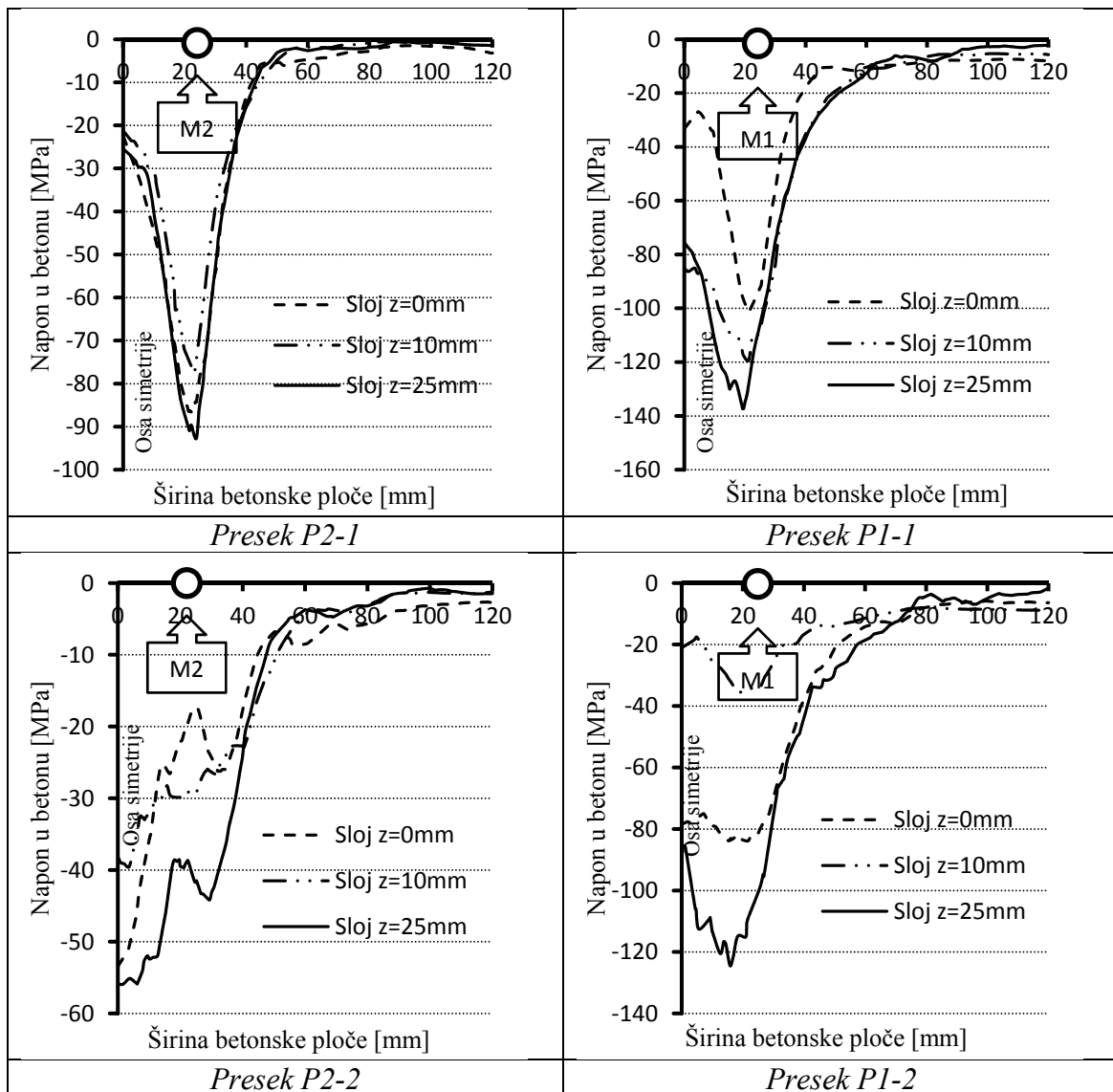


Slika 5.15: Šematski prikaz napona pritiska u betonu oko moždanika

Vrednosti napon pritiska u betonu ispred moždanika, u „slojevima“ betona koji su dalji od korena su manje i važi $\sigma_{tc_{i-1}}^{Mj} > \sigma_{tc_i}^{Mj}$. Na osnovu ovoga a poredeći izraze (5.9) i (5.10), u višim slojevima betona, posmatrano od korena ka glavi moždanika, dobijaju

se veće vrednosti napona ispred moždanika M1, kada je rastojanje između susednih moždanika u pravcu sile manje od $5d$.

Analizirajući pravac napona pritiska u osnovi, lokalni naponi pritiska drugog reda moždanika, moždanika M2, na mestu moždanika M1 deluje na širini od $2.2d$ što je za oko 20% manja širina, u odnosu na standardni raspored moždanika. Ako se analizira presek na mestu moždanika, slika 5.15, može se uočiti da postoji preklapanje lokalnih napona pritiska slojeva betona t^{M_2} i t^{M_1} , što u slučaju kada je rastojanje između moždanika veće ili jednako $5d$ nije slučaj. Na osnovu ovoga, može se očekivati da su lokalni naponi pritisak ispred moždanika M1 veći u zoni stabla moždnika u odnosu na vrednosti napona koje se javljaju kada je rastojanje između moždanika veće.

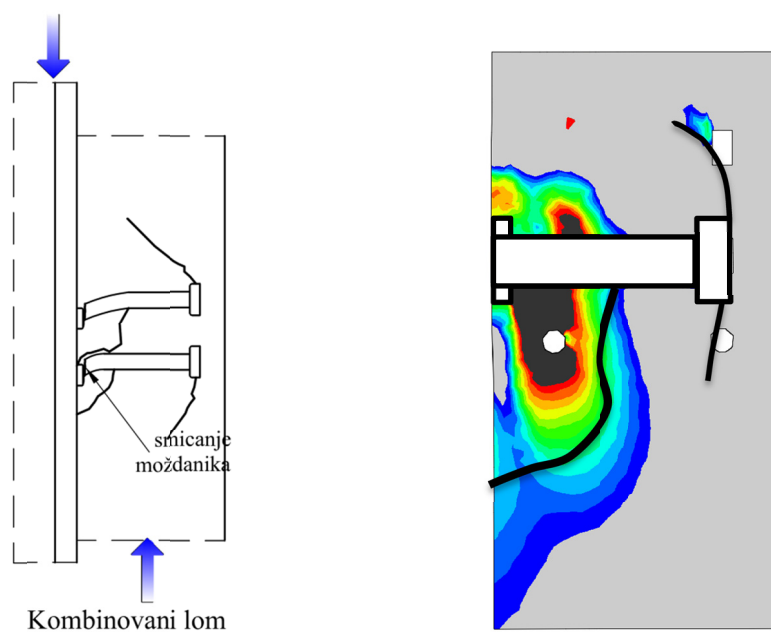


Slika 5.16: Naponi u betonu u presecima prema slici 5.15, grupa GRI

Vrednosti napona dobijeni na osnovu numeričkog modela sa grupom moždanika GR1 prikazani su na slici 5.16. Jasno je da su vrednosti napona usled lokalnog pritiska u betonu znatno veći nego što je to slučaj sa vrednostima lokalnog pritiska između moždanika i betona kod standardnih modela. Takođe se uočava da su maksimalne vrednosti napona, u zoni oko moždanika, deo betona ispod glave moždanika. Zone sa velikim vrednostima hidrostatičkog pritiska su upravo zone oko tela moždanika ispod glave moždanika. Ovo se može uočiti i na slici glavnih napona pritiska koji su prikazani vektorski, videti sliku 5.5.

Standardni raspored moždanika, propisana minimalna visina moždanika i definisana geometrija moždanika sa glavom, obezbeđuju hidrostatičko naponsko stanje u betonu ispred moždanika. Pojava prsline u betonskoj ploči u zoni glave moždanika koja je rezultat „cepanja“ piramide betona pri zatezanju podrazumeva narušavanje hidrostatičkog stanja napona u betonu u zoni korena moždanika. U ovakvom slučaju hidrostatičko stanje napona u betonu se javlja usled savijanja tela moždanika u zoni stabla moždanika između korena i glave moždanika. Vrednosti napona pritiska koje su maksimalne (uzorci GR1) na 25 mm iznad korena moždanika M1 (slike 5.16 i 5.17) ovo potvrđuju.

Pretpostavka izneta u poglavlju 3.4 je potvrđena. Viši slojevi betona su snatno opterećeniji u slučaju veze ostvarene grupama moždanika sa rastojanjima između moždanika manjim od $5d$. Na slici 5.16 su prikazane vrednosti napona pritiska u betonu između moždanika M1 značajno veći nego što je to slučaj kod standardnih uzoraka. Blisko postavljeni moždanici sprečavaju zapreminske dilatacije betona između i oko moždanika što za rezultat ima „utegnut beton“ odnosno u tim zonama se javljaju veći naponi hidrostatičkog pritiska. Ovo za posledicu ima veće vrednosti nosivosti na lokalni pritisak betona ispred i oko moždanika. Ovako stanje napona u betonu između i oko moždanika ima za rezultat da se moždanici u grupi zajedno sa betonom između i neposredno oko moždanika ponašaju kao jedan moždanika velikog prečnika. Imajući u vidu ovako tumačenje, šematski prikaz modela loma grupe od četiri moždanika prikazan je na slici 5.17.



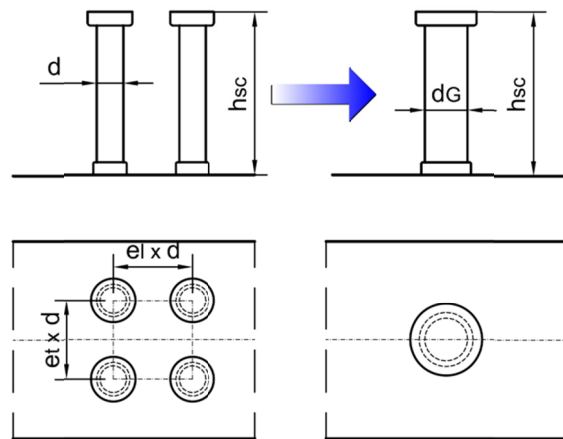
Slika 5.17: Šematski prikaz modela loma grupe od četiri moždanika

Prikazan model loma kao i činjenica da se veći deo opterećenja prenosi višim slojevima betona odnosno stablom a ne u zoni korena moždnika inicirala je razmišljanje da bi se ponašanje grupe moždanika može opisati na sličan način kao i ponašanje kratkog moždanika „trna“ u betonu.

Objašnjeni mehanizam prenošenja opterećenja u ovom poglavlju može se prepoznati na dijagramima napona u betonu. U poglavlju 8 u obliku priloga prikazani su dijagrami napona u betonu, dobijeni numeričkim modelima analiziranih uzoraka.

5.2.1 Ekvivalentni prečnik grupe moždanika

Sprovedena istraživanja i prethodno pretstavljani rezultati su inicirali razmišljanje da se moždanici u grupi, na malim međusobnim rastojanjima, mogu opisati jednim ekvivalentnim moždanikom većeg prečnika, ali iste visine. Uveden je pojam ekvivalentni (zamenjujući) prečnik grupe moždanika. Na ovaj način se grupa moždanika aproksimira jednim moždanikom. Treba napomenuti da se uvedeni pojam ne koristi za određivanje nosivosti grupe već će poslužiti za određivanje koeficijenta redukcije i opis ponašanja grupe moždanika. Ekvivalentni moždanik treba da pretstavlja sve moždanike u grupi.



Slika 5.18: Šematski prikaz uvedenog pojma zamenjujućeg prečnika grupe moždanika

Takođe je usvojeno, da ponašanje i nosivost grupe moždanika zavisi od geometrije grupe. Postojeće preporuke za određivanje nosivosti grupe moždanika su u funkciji samo jednog parametra - rastojanja između susednih moždanika u pravcu smičuće sile. Kako je uočeno da su pored rastojanja u pravcu smičuće sile za nosivost grupe, bitni i parametri: visina moždanika i broj moždanika u grupi. Predloženim rešenjem u ovom radu su i ova dva parametra uključena u izraza za određivanje nosivosti grupe moždanika.

U cilju definisanja novog pojma, ekvivalentnog prečnika grupe moždanika, uveden je koeficijent m koji je funkcija broja redova moždanika u grupi i rastojanja između susednih moždanika u pravcu smičuće sile. Ovim koeficijentom su uzeti u obzir broj redova i razmak između susednih redova moždanika. Zbog usvojenog oblika

funkcije za prečnik grupe (6.9), vrednost koeficijenta mora biti jednaka nuli kada je rastojanje između moždanika u pravcu sile jednako $5d$. Tokom analize, analizirano je nekoliko linearnih i eksponencijalnih funkcija. Konačno usvojen izraza za koeficijent m je:

$$m = n_r - n_r^{e_1/5} \quad (5.11)$$

U prethodnom izrazu su:

n_r – broj redova moždanika.

e_1 – vrednost rastojanja između moždanika podeljena sa prečnikom moždanika.

Geometrijske karakteristike grupe su u skladu sa oznakama na slici 1.9.

Izraz za ekvivalentni prečnik grupe moždanika je funkcija koja zavisi od koeficijenta m i broja kolona moždanika (videti izraz 5.12.). I u ovom slučaju se analiziralo nekoliko mogućih oblika funkcije. Prečnik grupe jednak je proizvodu prečnika pojedinačnog moždanika i koeficijenta m koji je uvećan za jedan. Na ovaj način se postiglo da prečnik grupe bude jednak prečniku pojedinačnog moždanika u slučaju kada je rastojanje između moždanika veće ili jednako $5d$. Imajući u vidu da broj moždanika, upravno na pravac smičuće sile, utiče na nosivost grupe, prečnik grupe se dodatno uvećava u zavisnosti od broja kolona moždanika. U slučaju kada su moždanici izvedeni u jednoj koloni, u pravcu delovanja sile, nema povećanja prečnika grupe moždanika. Za svaki sledeći red moždanika u pravcu delovanja sile, povećanje prečnika grupe je po 10%. Ovakav predlog je na strani sigurnosti. Konačno prečnik grupe je definisan sledećim izrazom:

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0.9 + n_c / 10) \quad (5.12)$$

U prethodnom izrazu su:

d – nominalni prečnik pojedinačnog moždanika,

n_c – broj kolona moždanika, u pravcu delovanja smičuće sile,

m – koeficijent prema izrazu (5.11)

Ovako definisan prečnik grupe poslužiće za određivanje koeficijenta redukcije nosivosti grupe moždanika.

5.2.2 Nosivost grupe moždanika na smicanje

Nosivost grupe moždanika na smicanje, kada je rastojanje između susednih moždanika u pravcu smičuće sile veće ili jednako od $5d$, jednaka je zbiru nosivosti svih moždanika u grupi:

$$P_{Rk,G} = n_r \cdot n_c \cdot P_{Rk} \quad (5.13)$$

Ako je rastojanje u pravcu smičuće sile između susednih moždanika, u granicama $3d < e_1 < 5d$, tada je nosivost grupe moždanika na smicanje potrebno redukovati u zavisnosti od geometrijskih karakteristika grupe. Nivo potrebne redukcije je definisan koeficijentom redukcije. Nosivost grupe moždanika na smicanje prema predlogu ovoga rada je jednaka:

$$P_{Rk,G} = \alpha_G \cdot n_r \cdot n_c \cdot P_{Rk} \quad (5.14)$$

U prethodnom izrazu su:

- α_G predloženi koeficijent redukcije,
- n_r broj redova moždanika upravno na pravac delovanja sile,
- n_c broj kolona moždanika u pravcu delovanja,
- P_{Rk} karakterističan nosivost na smicanje moždanika prema Evrokodu 4.

5.2.3 Koeficijent redukcije

Uočeno je da je ponašanje grupe moždanika, u slučajevima kada je potrebna redukcija nosivosti, dosta slično ponašanju kratkih moždnika. Pretpostavljeno je da se ponašanje grupe može dosta dobro opisati na sličan način kao i ponašanje kratkih moždnika u Evrokodu 4. Uvođenjem pojma, ekvivalentni prečnik grupe moždanika, problem ponašanja i redukcije nosivosti grupe moždanika je preveden na problem nosivosti i ponašanja kratkog moždanika.

Za koeficijent redukcije nosivosti grupe moždanika predložen je sličan oblik funkcije:

$$\alpha = \min\left(0,2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1\right); 1\right) \quad (5.15)$$

gde su:

d_G – ekvivalentni prečnik grupe moždanika i

h_{sc} – visina moždanika.

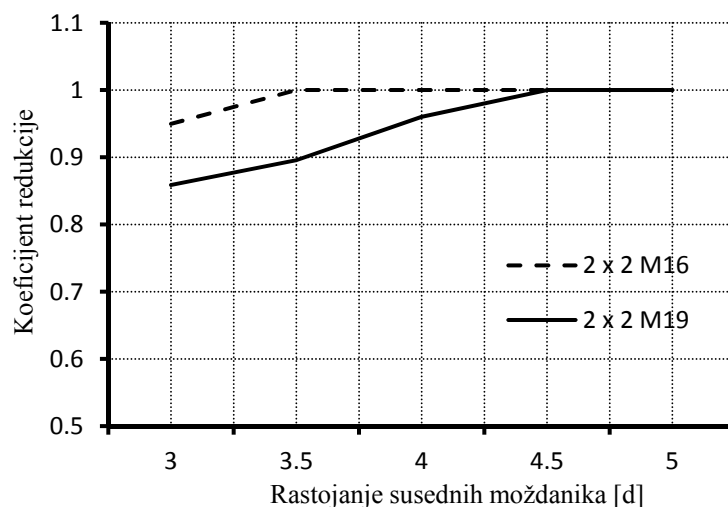
Izraza (5.15), dosta dobro opisuje eksperimentalno i numerički dobijene vrednosti nosivosti, analiziranih grupa moždanika. Međutim, uočeno je da se za veće prečnike moždanika dobijaju nešto lošiji rezultati. Na osnovu dobijenih rezultata prethodni izraz je neznatno korigovan. Naime, zaključeno je da vrednost 0,2 u izrazu (5.15) treba da bude u funkciji prečnika moždanika. Na ovaj način je i krutost moždanika uključena u izraz za koeficijent redukcije grupe moždanika. Konačno usvojen predlog za koeficijent redukcije grupe moždanika je:

$$\alpha_G = \min \left\{ k \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1 \right) \right. \\ \left. 1 \right. \quad (5.16)$$

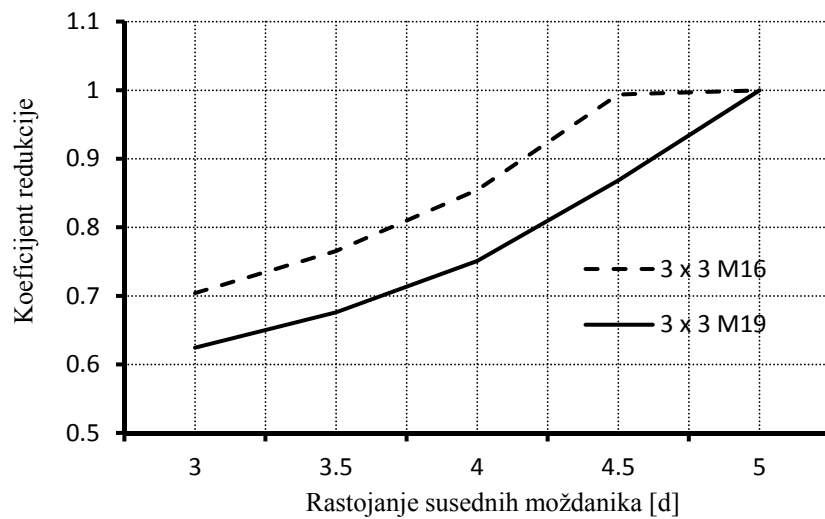
gde je vrednost koeficijenta k u funkciji prečnika stabla moždanika d :

$$k = \min \left\{ 0,2 \right. \\ \left. 0,2 \cdot \frac{20}{d} \right. \quad (5.17)$$

Ovako definisan koeficijent redukcije, koristiće se za određivanje nosivosti grupe moždanika. Vrednost koeficijenta redukcije je grafički prikazana za grupe moždanika prečnika 16 mm i 19 mm. Vrednost koeficijenta redukcije za grupu od četiri moždanika visine $h_{sc}=100\text{mm}$ u rasporedu 2x2 je prikazana na slici 5.19. Koeficijent redukcije za grupu sastavljenu od devet moždanika u rasporedu 3x3, visine moždanika $h_{sc}=100\text{mm}$, prikazan je na slici 5.20.



Slika 5.19:Koficijenta redukcije za grupu od četiri moždanika visine 100 mm



Slika 5.20: Koefficienta redukcije za grupu od devet moždanika visine 100 mm

Predložen način izračunavanja nosivosti grupe moždanika, daje dobre rezultate za analizirane grupe moždanika u ovom radu. U narednom poglavlju predložen koefficient redukcije uporediće se sa rezultatima numeričkih modela koji su izvedeni sa grupama od četiri moždanika prečnika 12 mm i 19 mm. Takođe, predlog će se uporediti i sa dostupnim eksperimentalnim rezultatima iz literature i predloženim koefficientom redukcije Shim C.S. [45].

5.3 Parametarska analiza

Izabrane grupe moždanika za parametarsku analizu su grupe koje su primerene za upotrebu u spregnutim gredama u zgradarstvu. Geometrijske karakteristike analiziranih grupa moždanika koje su obuhvaćene parametarskom analizom prikazane su u tabeli 5.1. Grupa od četiri moždanika u rasporedu 2x2, prema prikazanim primerima u poglavlju 1.6, je grupa moždanika sa kojom se uspešno može konstruisati podužni smičući spoj, kod spregnutih greda u zgradarstvu. Cilj parametarske analize je da se proveriti da li je predložena redukcija nosivosti moždanika, na osnovu eksperimenta i modela koji su izvedeni sa moždanicama prečnika 16 mm, primenljiva i za grupu od četiri moždanika prečnika 13 mm odnosno 19 mm. Promenom debljine moždanika, a

zadržavajući istu visinu moždanika suštinski se menja parametar vitkosti tj. odnos visine i prečnika moždanika.

Tabela 5.1: Analizirane grupe moždanika

FEM model	f_{cm} [MPa]	d [mm]	h_{sc} [mm]	$n_c \times n_r$ [kom]	e_t	e_l
GR1-16	42	16	100	2 x 2	2.8	2.8
GR1-19	42	19	100	2 x 2	3.15	3.15
GR1-12	42	12.7	100	2 x 2	3.07	3.07
GR 33	42	16	100	3 x 3	3.1	3.1
GR 23	42	16	100	2 x 3	3.1	3.1
GR 32	42	16	100	3 x 2	3.1	3.1

U primeru 1 prikazan je proračun nosivosti grupe GR1 prema predloženom rešenju. Ilustrovan je postupak proračuna na grupi od četiri moždanika prečnika 16mm u rasporedu 2x2.

Primer 1: Odrediće se nosivost grupe od četiri moždanika prečnika $d=16\text{mm}$, visine $h_{sc}=100\text{mm}$. Beton je kvaliteta C30/37. Granična čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika jednaka je $f_u=490\text{MPa}$.

Geometrija grupe moždanika:

- prečnik moždanika $d=16\text{mm}$
- visina moždanika $h_{sc}=100\text{mm}$
- broj moždanika u grupi $n_r \times n_c = 2 \times 2 = 4$
- rastojanje susednih moždanika $e_t=2.8$, $e_l=2.8$

Koeficijent redukcije:

$$m = n_r - n_r^{e_l/5} = 2 - 2^{2.8/5} = 0.525$$

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0.9 + n_c/10) = 16 \cdot (1 + 0.525) \cdot (0.9 + 2/10) = 26.8$$

$$\alpha_G = k \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1 \right) = 0.2 \cdot \left(\frac{100}{26.8} + 1 \right) = 0.946$$

Nosivost grupe moždanika:

Karakterističan nosivost moždanika prema izrazima (1.1) i (1.2) jednaka je :

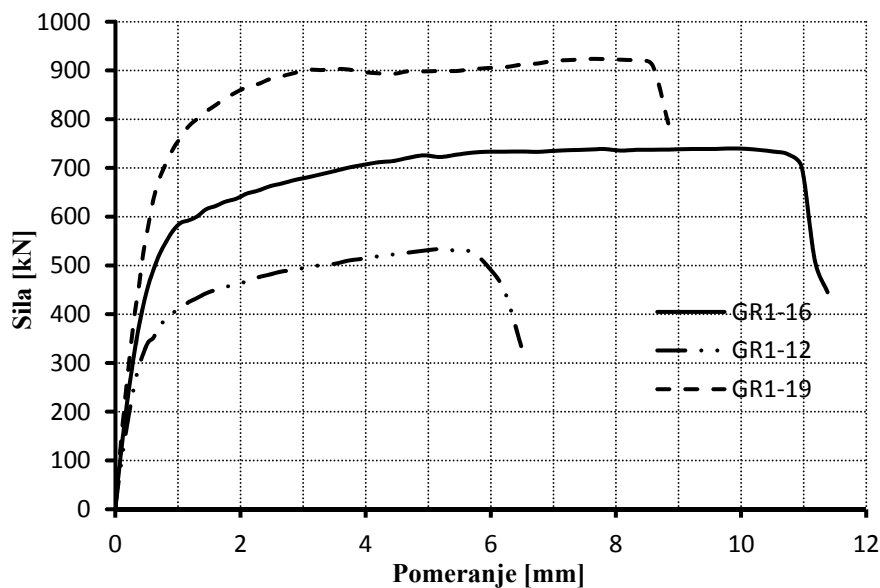
$$P_{Rk1} = 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.8 \cdot 490 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 78.8 \text{ kN}$$

$$P_{Rk2} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} = 0.29 \cdot 1 \cdot 16^2 \sqrt{30 \cdot 33000} = 73.9 \text{ kN}$$

Karakterističan nosivost grupe moždanika prema (6.11) jednaka je :

$$P_{Rk,G} = \alpha_G \cdot n_r \cdot n_c \cdot P_{Rk} = 0.95 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 73.9 = 280.8 \text{ kN}$$

Dijagrami sila - pomeranje numeričkih modela su prikazani na slici 5.21. Uporedni rezultati numeričke analize i vrednosti proračuna koeficijenta redukcije prema predloženom rešenju su prikazani u tabeli 5.2. Dobljene vrednosti su grafički prikazane na slici 5.22.



Slika 5.21 Dijagrami sila-podužno klizanje, FEM modeli tipa GR1

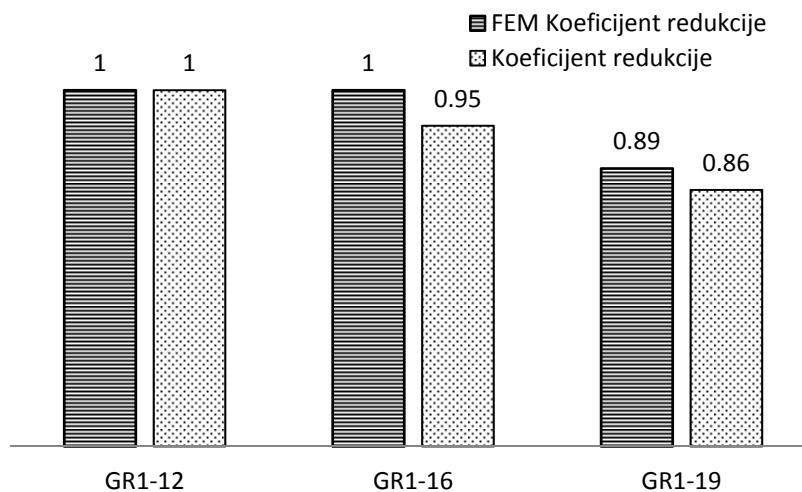
Evrokod 4, primenu izraza za nosivost moždanika isključuje u slučaju moždanika prečnika 12 mm. Dobljene vrednosti numeričke analize, nosivosti moždanika prečnika 12 mm, su upoređene sa eksperimentalnim rezultatima datim od strane Chen Xu i dr. [21], tabela 1.7. Prezentirani eksperimentalni rezultati Chen Xu i dr. [21] i rezultati numeričke analize su jednaki. Grupe sa moždanicama prečnika 16

mm i 19 mm se mogu okarakterizirati kao duktilne. Grupa izvedena sa četiri moždanika prečnika 12 mm ima pomeranje pri graničnoj nosivosti 5,5 mm, što je jako blisko graničnoj vrednosti za duktilan spoj od 6 mm. Uprkos tome da se moždanici prečnika 12 mm ne svrstavaju u duktilna spojna sredstva, grupisanjem moždanika prečnika 12 mm dobija se spoj koji bi se u određenim slučajevima mogao svrstati u duktilan smičući spoj.

Tabela 5.2: Rezultati – grupa GR1 sa moždanicima različitog prečnika

FEM model	d [mm]	m	d_G [mm]	h_{sc}/d_G [mm]	α_G	P_{RkFEM} [kN]	P_{RkEC4} [kN]	$\alpha_{G,FEM}$
GR1-16	16	0.515	26.67	3.74	0.95	84	84	1.00
GR1-19	19	0.452	30.35	3.30	0.85	105	118	0.89
GR1-12	12	0.46	19.39	5.15	1.00	60.7	47	1.00

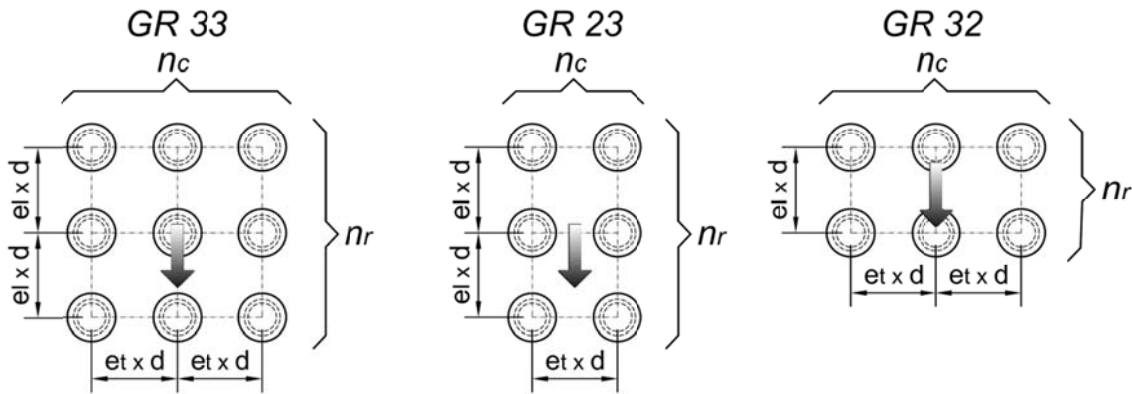
Razlika predloženog koeficijenta redukcije i rezultata numeričkog modela je 5% pri čemu je predloženi koeficijent redukcije u svim prikazanim slučajevima na strani sigurnosti. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se predloženi koeficijent redukcije može uspešno primeniti i na grupu od četiri moždanika prečnika 12 mm, odnosno 19 mm u rasporedu 2x2.



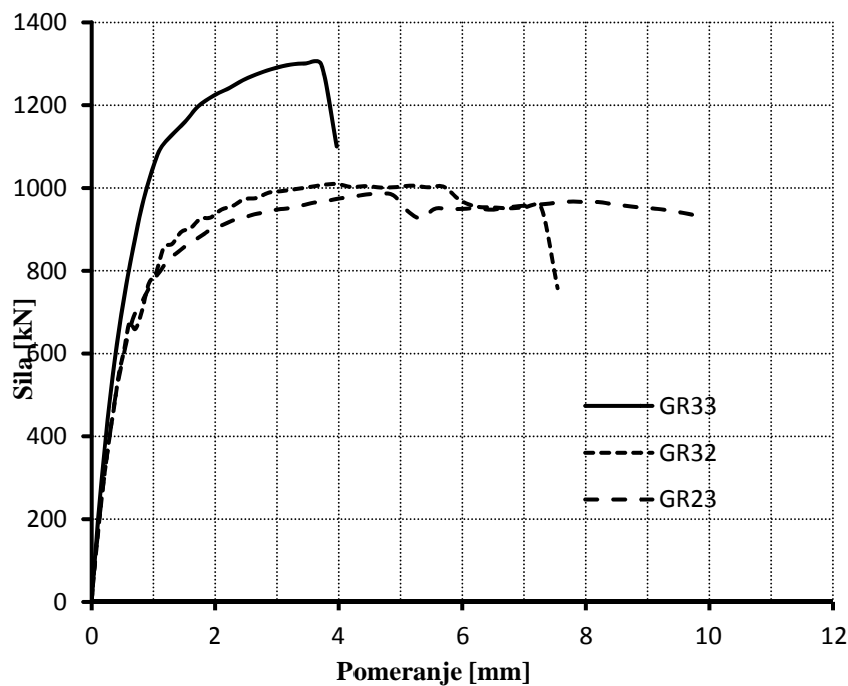
Slika 5.22 Rezultati numeričkog modela i vrednosti koeficijenta redukcije

Sledeća tri modela koja su analizirana u okviru parametarske analize su izvedeni sa grupama od devet odnosno šest moždanika, videti sliku 5.23. Osnovni cilj analize je da se proveri primenljivost predloženog koeficijena redukcije na grupe različite veličine i geometrije. Grupa GR33 sa devet moždanika je grupa koja je u literaturi najčešće

analizirana. Grupe GR 23 i GR 32 su grupe od po šest moždanika koje bi mogle naći primenu u spregnutim gredama u zgradarstvu u slučajevima kada se zahteva smičući spoj velike nosivosti, naprimer za raspone spregnutih greda veće od 15m. Dobljeni rezultati, dijagrami sila – pomeranje, prikazani su na slici 5.24.



Slika 5.23: Geometrija analiziranih grupa moždanika, $d=16\text{ mm}$ i $h_{sc}=100\text{ mm}$



Slika 5.24: Dijagram sila-podužno klizanje grupa GR33, GR23 i GR32

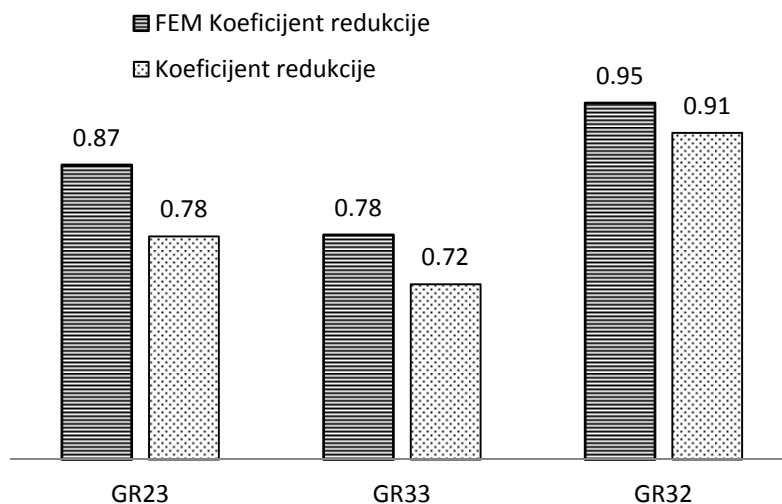
Vrednosti koeficijenta redukcije koje su rezultat numeričkog modela i proračuna prema predloženim izrazima su prikazani u tabeli 5.3. U ovom slučaju predloženi

koeficijent redukcije se razlikuje 4-10% u odnosu na rezultate numeričkog modela. Razlika u rezultatima je i u ovim slučajevima na strani sigurnosti.

Tabela 5.3: Rezultati – grupa GR33, GR23 i GR 32

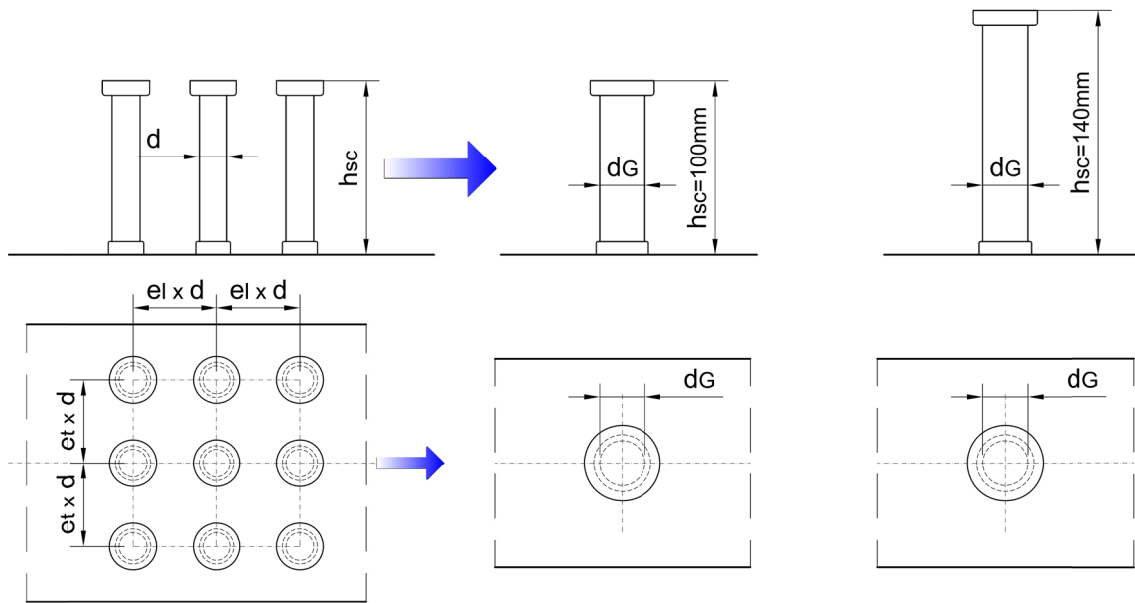
FEM model	d [mm]	m	d_G [mm]	h_{sc}/d_G [mm]	α_G	P_{RkFEM} [kN]	P_{RkEC4} [kN]	$\alpha_{G,FEM}$
GR33	16	1.02	38.9	2.50	0.72	65.7	84	0.78
GR32	16	0.46	28.1	3.60	0.91	79.6	84	0.95
GR23	16	1.02	35.6	2.81	0.77	73.1	84	0.87

Pomeranja pri lomu su manja od 6 mm u slučaju grupa GR33 i GR23, dok su pomeranja pri lomu grupe GR32 5.7 mm. Na osnovu dobijenih rezultata, može se očekivati da će grupu za koju je odnos h_{sc}/d_G veći od četiri, karakterisati duktilno ponašanje. Karakterističan lom pri граниčnom opterećenju ovih grupa je lom betona. Analizirajući dobijene rezultate može se uočiti da je odnos visine moždanika h_{sc} i uvedenog parametra, prečnika grupe d_G manji od 3. U slučaju grupe GR33 taj odnos je 2.5. Ako bi se napravila analogija sa ponašanjem pojedinačnog moždanika može se očekivati da se za vrednosti odnosa $h_{sc}/d_G < 3$ upravo dobiju ovakvi rezultati. Imajući u vidu izloženu analogiju sa ponašanjem kratkog pojedinačnog moždanika, moglo bi se izvesti preporuka o minimalnom odnosu h_{sc}/d_G da bi se veza smatrala duktilnom. Veće vrednosti visine moždanika u grupi treba pre svega da obezbede veće vrednosti nosivosti na zatezanje betona. Rezultati iz tabele 5.3 su grafički prikazani na slici 5.25.



Slika 5.25: Rezultati – grupa GR33, GR23 i GR 32

Da bi se napred izneta pretpostavka o duktilnosti grupe proverila, u slučaju grupe GR33, napravljen je dodatni numerički model. Cilj je da se proveru duktilnost grupe u funkciji odnosa visine moždanika i novouvedenog pojma ekvivalentnog prečnika moždanika. Analizirana je grupa GR33 sa moždanicima prečnika 16mm i visinom moždanika $h_{sc}=100$ mm i $h_{sc}=140$ mm (videti sliku 5.26). Zbog veće visine moždanika betonska ploča je usvojena veće debljine 160 mm. Armatura u ploči kao i sve ostale geometrijske karakteristike su iste kao i u svim napred prikazanim modelima.



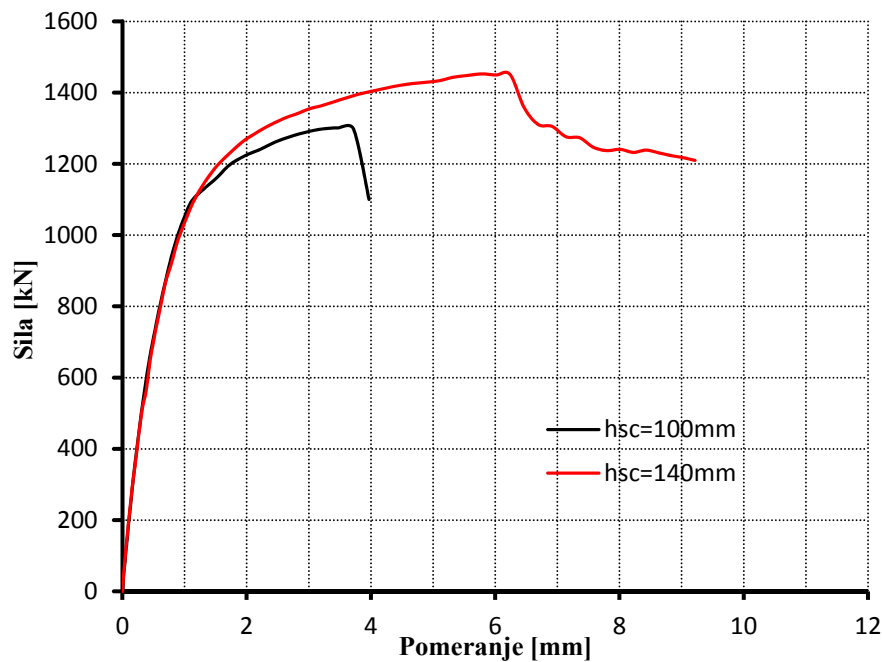
Slika 5.26: Ekvivalentni moždanik grupe GR33, moždanici visine 100mm i 140mm

Za grupu od devet moždanika prečnika 16 mm, izvedenih na međusobnom rastojanju od $3.1d=50$ mm, u pracu sile i upravno na pravac smičuće sile, prema predloženom rešenju ekvivalentni prečnik jednak je:

$$m = n_r - n_r^{e_l/5} = 3 - 3^{3.1/5} = 1.02$$

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0.9 + n_c / 10) = 16 \cdot (1 + 1.02) \cdot (0.9 + 3 / 10) = 38.9 \text{ mm}$$

Za usvojenu visinu moždanika od 140 mm odnos visine i ekvivalentnog prečnika moždanika je $h_{sc}/d_G=3.53$. Na osnovu prethodno prezentiranih rezultata može se očekivati da će se za ovakvu visinu moždanika sa glavom u grupi dobiti duktilno ponašanje spoja. Dobijeni rezultati, dijagrami sila-podužno klizanje, numeričkih modela su prikazani na slici 5.27.



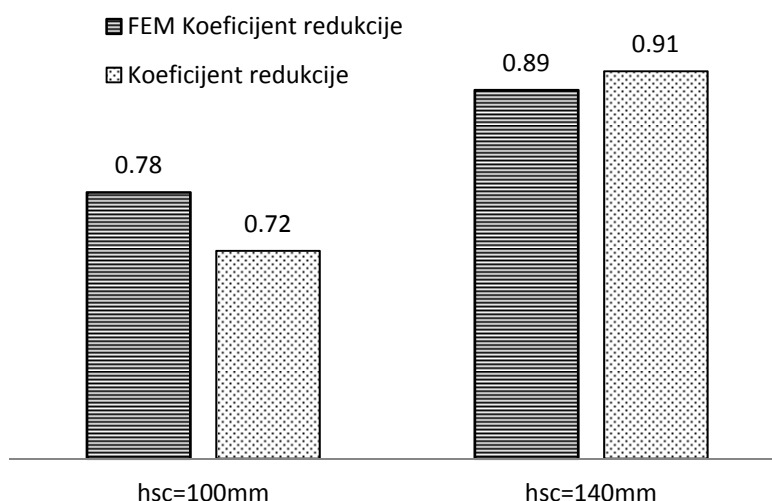
Slika 5.27: Dijagram sila-podužno klizanje grupa GR33

Klizanje podužnog smičućeg spoja grupe GR33 sa moždanicima visine 140 mm pri graničnom opterećenju je 6.3 mm. Na osnovu ovoga rezultata veza se može okarakterisati kao duktilna. Dobijene vrednosti koeficijenta redukcije, numeričkim modelom i predloženim rešenjem u ovome radu prikazane su u tabeli 5.4 i na slici 5.28. Ponovljeni su rezultati grupe GR33 sa moždanicima visine 100mm da bi se lakše uporedili dobijeni rezultati.

Tabela 5.4: Rezultati – grupa GR33 sa moždanicima visine 100mm i 140 mm

FEM model	d [mm]	m	d_G [mm]	h_{sc}/d_G [mm]	α_G	P_{RKFEM} [kN]	P_{RKEC4} [kN]	$\alpha_{G,FEM}$
GR33/ $h_{sc}=100$	16	1.02	38.9	2.50	0.72	65.7	84	0.78
GR33/ $h_{sc}=140$	16	1.02	38.9	3.59	0.91	74.8	84	0.89

Dobijeni rezultati potvrđuju činjenicu da grupa sa većom visinom moždanika sa glavom imaju veće vrednosti granične nosivosti na smicanje. Takođe usvajanjem veće visine moždanika sa glavom, može se postići duktilno ponašanje spoja ostvarenog grupom moždanika. Dobijene vrednosti koeficijenta redukcije prema FEM modelu i prema predloženom rešenju se dosta dobro slažu, razlika dobijenih vrednosti koeficijenta redukcije je 2.3%.



Slika 5.28: Rezultati grupa GR33, FEM model i predložen koeficijent redukcije za visinu moždanika $h_{sc}=100$ mm i $h_{sc}=140$ mm

5.4 Duktilnost spoja ostvarenog grupom moždanika

Na osnovu dobijenih rezultata napravljena je rekapitulacija ponašanja podužnog smičućeg spoja. Pri analizi duktilnosti podužnog smičućeg spoja treba imati u vidu i duktilnost pojedinačnog moždanika sa glavom koji se koristi. Zbog kapaciteta deformacije pri smičućem opterećenju za konstruisanje duktilnog spoja sa grupom moždanika treba koristiti standardom deklarisanu duktilnu moždaniku prečnika od 16 mm do 25 mm minimalne visine $4d$. Međutim ovo nije dovoljno da bi se spoj sa grupom moždanika, kada su moždanici na manjem međusobnom rastojanju od $5d$ u pravcu sile, definisao kao duktilan. Dobijeni rezultati podužnog klizanja i duktilnosti analiziranih grupa prikazani su u tabeli 5.5.

Tabela 5.5: Duktilnost analiziranih grupa moždanika

FEM model	d [mm]	d_G [mm]	h_{sc}/d_G [mm]	δ [mm]	tip spoja
GR1-16	16	26.7	3.74	10.5	duktilan
GR1-19	19	30.4	3.30	8.2	duktilan
GR1-12	12	19.4	5.15	5.5	nije duktilan
GR32	16	28.1	3.60	5.7	nije duktilan
GR23	16	35.6	2.81	4.8	nije duktilan
GR33/h _{sc} =100	16	38.9	2.50	3.7	nije duktilan
GR33/h _{sc} =140	16	38.9	3.59	6.3	duktilan

Jasno je na osnovu svega iznetog da duktilnost spoja sa grupom moždanika zavisi dominatno od visine moždanika. Uvedeni pojam ekvivalentni prečnik grupe moždanika može se upotrebiti za definisanje ponašanja grupe moždanika. Slično kako je definisana granična visina pojedinačnog moždanika sa glavom da bi se on smatrao duktilnim, može se definisati i minimalna visina moždanika da bi se grupa moždanika smatrala duktilnom. Iz dobijenih rezultata uočava se da se za vrednosti h_{sc}/d_G oko 3.5 dobijaju klizanja u podužnom smičućem spoju koja su oko 6 mm što je granica za duktilno ponašanje spoja. Osim odnosa h_{sc}/d_G značajnu ulogu na ponašanje spoja ima i broj moždanika u pravcu delovanja sile.

Pri primeni grupa moždanika ukoliko se želi duktilno ponašanje podužnog smičućeg spoja treba koristiti moždanike veće visine. Može se očekivati da će se spoj ostvaren grupom moždanika za koju je odnos h_{sc}/d_G veći od četiri ponašati duktilno.

5.5 Poređenje predložene redukcije sa podacima dostupnim u literaturi

Predloženi koeficijent redukcije nosivosti grupe moždanika primenjen je i upoređen sa dostupnim podacima iz literature. Shim C.S. i dr. [45] i Okada i dr. [40] su predložili koeficijente redukcije u funkciji rastojanja između moždanika. Prema Shim C.S. i dr. [45], koeficijent redukcije pored rastojanja između susednih moždanika zavisi i od čvrstoće betona pri pritisku. Predlog koji je izložen u radu je koeficijent redukcije definisao kao funkciju geometrije grupe. Pomoću predloženih izraza za redukciju nosivosti grupe moždanika sračunate su vrednosti koeficijenata redukcije za uzorke koje je ispitao Cheng Sim [45]. Primer broj dva u nastavku prikazuje proračun koeficijenta redukcije nosivosti grupe moždanika prema predloženom rešenju u ovom radu, za grupu od devet moždanika koja je eksperimentalno ispitana u okviru istraživanja Shim C.S. i dr. [45], videti tabelu 1.5.

Primer 2: Odrediće se nosivost grupe od devet moždanika prečnika $d=25\text{mm}$, visine $h_{sc}=190\text{mm}$. Beton je kvaliteta C40/50. Granična čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika jednaka je $f_u=490\text{MPa}$.

Geometrija grupe:

- prečnik moždanika $d=25\text{mm}$
- visina moždanika $h_{sc}=190\text{mm}$
- broj moždanika u grupi $n_r \times n_c = 3 \times 3 = 9$
- rastojanje susednih moždanika $e_t=3,0$, $e_l=3,0$

Koeficijent redukcije:

$$m = n_r - n_r^{e_l/5} = 3 - 3^{3/5} = 1.07$$

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0.9 + n_c / 10) = 25 \cdot (1 + 1.07) \cdot (0.9 + 3/10) = 62.1$$

$$\alpha_G = k \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1 \right) = \frac{0.2 \cdot 20}{25} \cdot \left(\frac{190}{62.1} + 1 \right) = 0.649$$

Nosivost grupe moždanika:

Karakterističan nosivost moždanika prema izrazima (1.1) i (1.2) jednaka je :

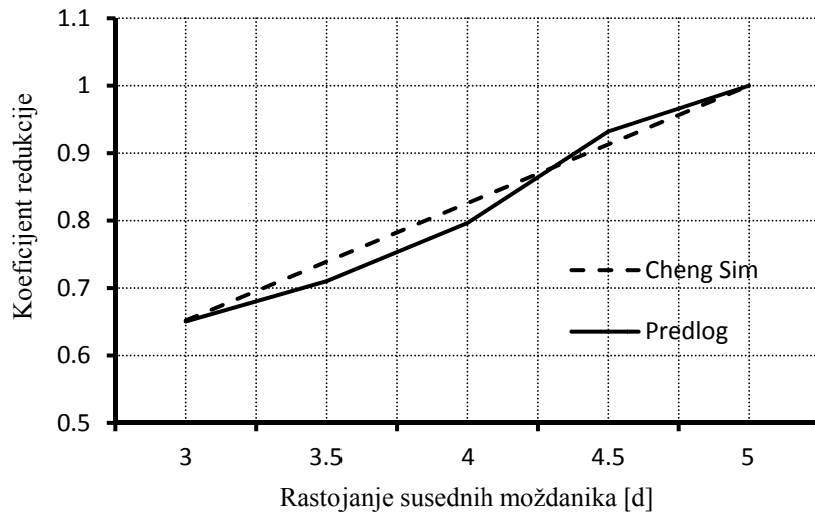
$$P_{Rk1} = 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.8 \cdot 490 \cdot \frac{\pi \cdot 25^2}{4} = 192.3 \text{ kN}$$

$$P_{Rk2} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} = 0.29 \cdot 1 \cdot 25^2 \sqrt{40 \cdot 35000} = 214.4 \text{ kN}$$

Karakterističan nosivost grupe moždanika prema (6.11) jednaka je :

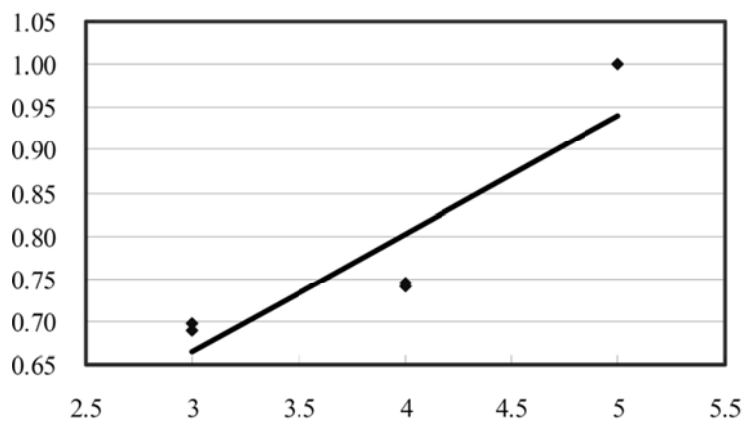
$$P_{Rk,G} = \alpha_G \cdot n_r \cdot n_c \cdot P_{Rk} = 0.65 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 192.3 = 1124.9 \text{ kN}$$

Dobijene vrednosti koeficijenta redukcije za različite vrednosti rastojanja između susednih moždnika, prikazane su na slici 5.29. Može se uočiti jako dobro poklapanje ova dva predložena rešenja. Koeficijent redukcije koji su predložili Shim C.S. i dr. [45] je funkcija rastojanja između susednih moždanika i ne uzima u obzir visinu moždanika i njen uticaj na nosivost grupe. U nekim slučajevima malih grupa moždanika, velike visine, veće od $h_{sc}/d > 6$, koeficijent redukcije predložen od strane Shim C.S. i dr. je na strani sigurnosti. Ovakav zaključak se može izvesti na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata nosivosti na smicanje uzoraka tipa GR1 koji su ispitani u ovom radu.



Slika 5.29: Koeficijent redukcije, predložene vrijednosti i vrijednosti prema [45] grupe sa moždanicima prečnika 25mm

Analizirajući eksperimentalne rezultate Shim C.S. i dr [45] na slici 5.30, može se uočiti da razlika graničnih nosivosti uzoraka sa moždanicima izvedenim na rastojanjima $3d$ i $4d$ nije proporcionalna rastojanju moždanika. Redukcija nosivosti uzoraka je znatno veća u slučaju smanjenja rastojanja između moždanika sa $5d$ na $4d$, nego što je to slučaj sa redukcijom nosivosti uzoraka u slučaju smanjenja rastojanja između moždanika sa $4d$ na $3d$, videti sliku 5.30.



Slika 5.30: Koeficijent redukcije, i eksperimentalni rezultati, slika preuzeta iz [45]

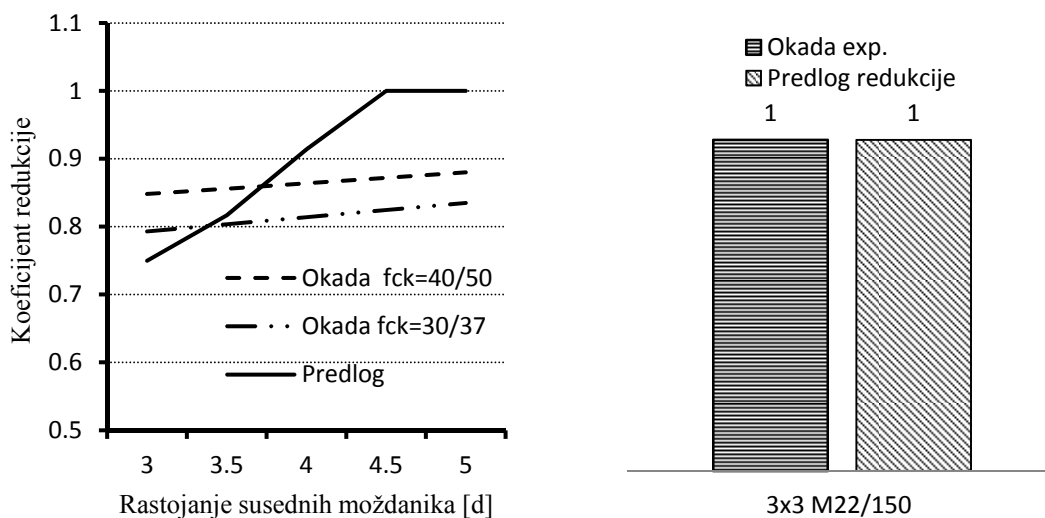
Ako se pogledaju rezultati proračuna koeficijenta redukcije koji su prikazani u tabeli 5.6, uočava se da je vitkost grupe $h_{sc}/d_G > 3$. Sve ispitane uzorke je karakterisao lom smicanjem moždanika. Na osnovu ovoga se može očekivati da će lom smicanjem moždanika biti merodavan kada je odnos $h_{sc}/d_G > 3$.

Tabela 5.6: Koeficijent redukcije za grupe iz [45]

Uzorak	d [mm]	h_{sc} [mm]	e_l	m	d_G [mm]	h_{sc}/d_G [mm]	α_G
G25	25	190	3	1.066	62.1	3.10	0.65
G25	25	190	4	0.592	47.7	3.98	0.79
G22	22	190	3	1.066	54.5	3.49	0.72
G22	22	190	4	0.592	42.0	4.52	0.88

Prikazani eksperimentalni rezultati su jedini dostupni eksperimentalni rezultati uzoraka koji su izvedeni sa međusobnim razmakom moždanika od $3d$.

Druga grupa uzoraka koja se analizira su uzorci ispitani u okviru studije koju su uradili Okada i dr. [40]. U ovom slučaju su takođe analizirane grupe od devet moždanika u rasporedu 3×3 . Predloženi koeficijent redukcije u ovom radu se u potpunosti slaže sa eksperimentalnim rezultatima izloženim od strane Okade i dr. Kada se uporede vrednosti koeficijenta redukcije, slika 5.31, može se uočiti da predloženo rešenje u ovom radu daje manje vrednosti koeficijenta redukcije za grupe sa rastojanjem između moždanika od $3d$ u pravcu sile. Međutim, za rastojanja moždanika od $5d$ koja su u potpunosti u skladu sa standardima za spregnute konstrukcije predlog Okade i dr. je značajno na strani sigurnosti i daje potcenjene vrednosti nosivosti grupe moždanika. Ovakav zaključak se može izvesti i ako se predloženi koeficijent redukcije u [40], uporedi sa eksperimentalnim vrednostima granične nosivosti uzoraka istih autora, videti tabelu 1.4.

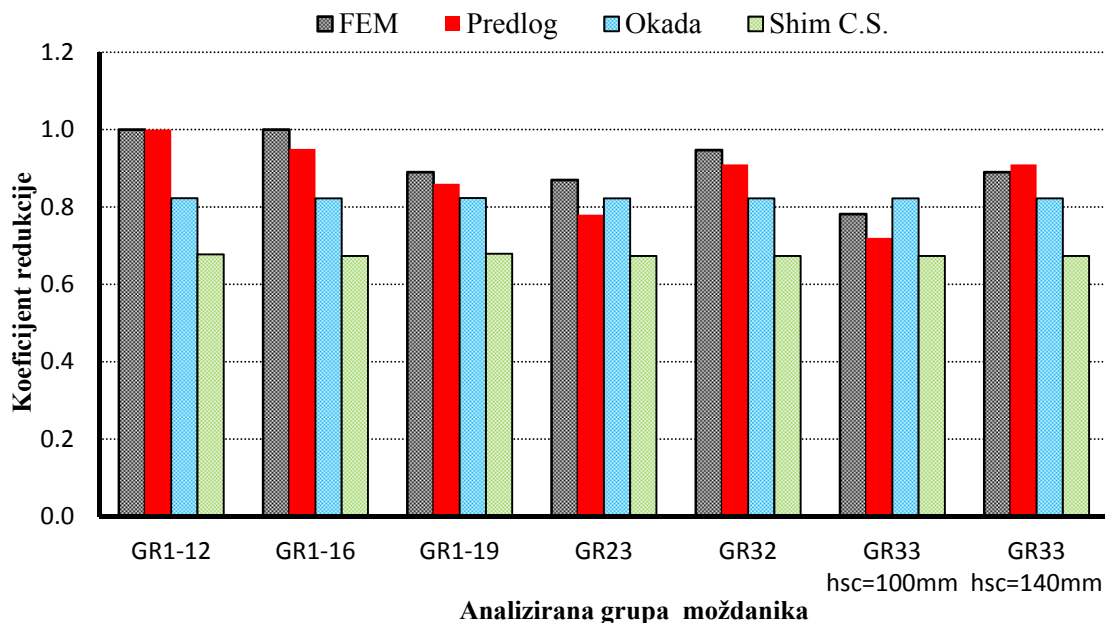


Slika 5.31: Koeficijent redukcije, predložene vrednosti i vrednosti prema [40]

Na kraju, je napravljena rekapitulacija vrednosti koeficijenata redukcije analiziranih grupa moždanika u okviru parametarske analize. U tabeli 5.7 prikazane su dobijene vrednosti koeficijenata redukcije. Pored vrednosti dobijenih FEM modelom i predloženim rešenjem u ovom radu prikazane su i vrednosti prema preporukama datim od strane Okada i dr. i Shim C.S. i dr. Na osnovu ponašanja grupe pri smičućem opterećenju i dobijenih vrednosti granične nosivosti (koeficijenata redukcije) jasno je da broj moždanika, visina moždanika kao i raspored moždanika utiču na ponašanje i nosivost grupe. Predloženo rešenje koeficijenta redukcije u ovom radu je uzelo u obzir sve ove parametre. Grafički prikaz koeficijenata redukcije iz tabele 5.7 je dat na slici 5.32.

Tabela 5.7: Koeficijent redukcije - rekapitulacija

Grupa moždanika	FEM	α_G	Okada	Shim C.S.
GR1-12	1.00	1.00	0.82	0.678
GR1-16	1.00	0.95	0.82	0.673
GR1-19	0.89	0.86	0.82	0.679
GR23	0.87	0.78	0.82	0.673
GR32	0.95	0.91	0.82	0.673
GR33 $h_{sc}=100\text{mm}$	0.78	0.72	0.82	0.673
GR33 $h_{sc}=140\text{mm}$	0.89	0.91	0.82	0.673



Slika 5.32: Koeficijenti redukcije analiziranih grupa moždanika – rekapitulacija

Predloženo rešenje određivanja nosivosti grupe moždanika daje podjednako dobre rezultate i u slučaju malih grupa od četiri moždanika kao i u slučajevima većih grupa od šest ili devet moždanika. Dobijeni rezultati ukazuju na široku primenljivost predloženog rešenja koeficijenta redukcije.

5.6 Oblast i ograničenja primene predloženog rešenja

Izneti rezultati o nosivosti grupe moždanika koji su analizirani u prethodnim poglavljima mogu se primeniti na nosivost grupe moždanika u smičućim spojevima kod spregnutih greda u zgradarstvu. Predloženi koeficijent redukcije daje dobre rezultate za grupe od četiri, šest i devet moždanika. Predloženo rešenje može se koristiti:

- Za grupe moždanika kod kojih su minimalna rastojanja između susednih moždanika $\geq 3d$. Ovo važi za rastojanje u pravcu i upravno na pravac smičuće sile.
- U slučaju spregnutih nosača za čiju monolitizaciju je korišćen beton čvrstoće pri pritisku $f_{ck}=35$ MPa ili bolji.
- Kada je spoj montažnog armiranobetonskog elementa i betona za monolitizaciju tretiran epoksidnim premazima za vezu starog i novog betona.
- Standardni četvorofrakcijski agregat se može koristiti za spravljanje betona za monolitizaciju konstrukcije. Treba proveriti, imajući u vidu geometriju grupe moždanika, kriterijume Evrokoda 2 za maksimalni prečnik zrna agregata u betonu za monolitizaciju uzoraka.

Podužni smičući spoj koji formiraju grupe od po četiri moždanika visine $h_{sc}/d > 6$, može se smatrati duktilnim, ako moždanici pojedinačno ispunjavaju kriterijume duktilnosti propisane Evrokodom. Tada se proračun podužnog spoja sa grupama od po četiri moždanika može se sprovest po preporukama za kontinualno raspoređene moždanike.

Za podužne spojeve koji su formirani sa grupama koje imaju dva reda moždanika može se očekivati da će se ponašati duktilno ako je odnos $h_{sc}/d_G \geq 4$. Za sve grupe moždanika preporuka je da odnos bude $h_{sc}/d_G \geq 3,5$. Smičući spojevi koji se izvode sa grupama koje su formirane sa tri reda moždanika nemogu se smatrati duktilnim bez dodatne provere. Ako se ne potvrdi duktilnost grupe podužni spojevi formirani sa

velikim grupama moždanika moraju se proračunavati usvajajući elastičnu raspodelu podužne smičuće sile.

Predloženo rešenje se može primeniti i na grupu koja je formirana sa jednom redom moždanika u pravcu delovanja sile. Rezultati predloženog koeficijenta su u ovom slučaju konzervativni, značajno na strani sigurnosti. Predloženo rešenje koeficijenta redukcije za rezultat daje 15-20% manje vrednosti nosivosti grupe sa moždanicima, u jednm redu u pravcu delovanja smičuće sile, u odnosu na eksperimentalne rezultate granične nosivosti uzoraka LDA1 i uzoraka koje su ispitali Hegger i dr [25].

Takođe se može očekivati da će rezultati predloženog rešenja biti na strani sigurnosti i u slučajevima kada se za monolitizaciju uzoraka koriste betoni sa visokim vrednostima čvrstoće na pritisak.

Na osnovu vrednosti početnih tangentnih krutosti analiziranih uzoraka kako u parametarskoj analizi tako i u eksperimentalnom delu rada može se očekivati da diskontinualano sprezanje neće uticati na ugibe spregnute grede. Ključan parametar koji utiče na krutost veze je čvrstoća betona pri pritisaku.

Podužno rastojanje između susednih moždanika u grupi, u pravcu smičuće sile, treba da bude veće od $3d$. Takođe u slučaju grupisanih moždanika preporučuje se da minimalno poprečno rastojanje između moždanika bude veće od $3d$. Ova rastojanja su nešto malo veća od tehnološki minimalnih rastojanja, koja zavisno od opreme koja se koristi za ugradnju moždanika imaju vrednosto oko $2.5d$.

5.7 Primer proračuna podužnog smičućeg spoja sa grupom moždanika

Na osnovu karakterističnog primera spregnutog podnog nosača, koji je prikazan u poglavlju 1.7, urađen je primer proračuna podužnog smičućeg spoja podnog nosača POS PN3. Primer broj 3 prikazuje postupak proračuna podužnog smičućeg spoja sa grupama od četiri moždanika prečnika 19mm.

Primer 3:

Prvi korak pri proračunu podužnog smičućeg spoja je određivanje nosivosti grupe moždanika prema predloženom rešenju. Zatim je na osnovu nosivosti grupe od četiri moždanika prečnika $d=19\text{mm}$, visine $h_{sc}=100\text{mm}$, određen potreban broj grupa moždanika i usvojen je razmak između grupa. Kvalitet materijala: beton je kvaliteta C30/37, granična čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika jednaka je $f_u=490\text{MPa}$.

Usvojena geometrija grupe:

- prečnik moždanika $d=19\text{mm}$
- visina moždanika $h_{sc}=100\text{mm}$
- broj moždanika u grupi $n_r \times n_c=2 \times 2=4$
- rastojanje susednih moždanika $e_t=3.0$, $e_l=3.0$

Koeficijent redukcije:

$$m = n_r - n_r^{e_l/5} = 2 - 2^{3/5} = 0.48$$

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0.9 + n_c/10) = 19 \cdot (1 + 0.48) \cdot (0.9 + 2/10) = 30.9$$

$$\alpha_G = k \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1 \right) = 0.2 \cdot \left(\frac{100}{30.9} + 1 \right) = 0.85$$

Nosivost grupe moždanika:

Karakterističan nosivost moždanika prema izrazima (1.1) i (1.2) jednaka je :

$$P_{Rk1} = 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.8 \cdot 490 \cdot \frac{\pi \cdot 19^2}{4} = 111.0 \text{ kN}$$

$$P_{Rk2} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} = 0.29 \cdot 1 \cdot 19^2 \sqrt{30 \cdot 33000} = 104.2 \text{ kN}$$

Proračunska nosivost moždanika:

$$P_{Rd} = \frac{P_{Rk}}{\gamma_v} = \frac{\min(111.0; 104.2)}{1.25} = 83.4 \text{ kN}$$

Proračunska nosivost grupe moždanika prema (6.11) jednaka je :

$$P_{Rd,G} = \alpha_G \cdot n_r \cdot n_c \cdot P_{Rd} = 0.85 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 83.4 = 283.6 \text{ kN}$$

Potreban broj grupa moždanika na nosaču:

$$n_g = \frac{V_{IEd}}{P_{Rk,G}} = \frac{3190}{283.6} = 11.2 \text{ grupa } 4 \times M 19 \text{ mm}$$

Potreban razmak grupa moždanika :

$$e_g = \frac{600 \text{ cm}}{11.2} = 53.6 \text{ cm}$$

Za podužni smičući spoj podnog nosača PN3 usvojena je grupa od četiri moždanika prečnika 19 mm. Usvojen razmak grupa moždanika je 500 mm.

U prikazanom primeru usvojena je plastična raspodela podužne smičuće sile. Pojedinačni moždanici prečnika 19mm, ispunjavaju propisane kriterijume duktilnosti. Prema rezultatima numeričkog modela i veza sa grupom od četiri moždanika prečnika 19mm se može smatrati duktilnim spojem. Rastojanje grupe od 500mm odgovara najčešćim širinama montažnih betonskih ploča od 1000mm. Podužni smičući spoj bi se konstruisao sa grupama moždanika koje bi se postavljale u sredini montažne ploče i između dve montažne ploče.

Tabela 5.8: Rezultati proračuna podužnog smičućeg sa grupama moždanika

Nosač	$d \times h_{sc}$ [mm]	$n_c \times n_r$ [kom]	V_{IEd} [kN]	α_G	$P_{Rd,G}$ [kN]	n_g [kom]	e_g [cm]
PN1	16x100	2 x 2	1721.5	0.95	224.6	7.66	52.2
PN2	16x100	2 x 2	2323.8	0.95	224.6	10.3	48.5
PN3	19x100	2 x 2	3190.0	0.86	283.6	11.3	53.6

Na isti način su sračunati i podužni smičući spojevi svih podnih nosača koji su analizirani u poglavlju 1.7. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 5.8. Spregnuti

podni nosači uobičajenih raspona u zgradarstvu, mogu se uspešno konstruisati i izvesti sa grupama od četiri moždanika na međusobnom razmaku od 500mm. Definisanjem preciznih i pouzdanih kriterijuma za duktilnost grupe moždanika omogućilo bi primenu grupa moždanika i u parcijalnim smičućim spojevima.

6. ZAKLJUČCI

Rezultati ovoga rada su doprineli boljem razumjevanju ponašanja grupe moždanika sa glavom i potvrdili su da se grupa moždanika može uspešno koristiti za izvođenje podužnih smičućih spojeva spregnutih greda u zgradarstvu. Na osnovu prikazanih analiza i rezultata u ovom radu mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Potvrđeno je da je proračunska vrednost granične nosivosti moždanika sa glavom prema Evrokod 4 manja od eksperimentalnih rezultata i do 20%.
2. Utvrđeno je da broj, raspored i visina moždanika u grupi dominantno utiču na nosivost grupe.
3. Visina moždanika je jedan od ključnih parametara koji utiče na nosivost grupe moždanika po kriterijumu loma zatezanjem piramide betona. Stoga se preporučuje da se pri primeni moždanika u grupi izbegavaju moždanici male visine, pogotovu kada su rastojanja između moždanika u pravcu delovanja sile mala, manja od $5d$.
4. Na osnovi eksperimentalnih i numeričkih istraživanja definisan je originalan mehanički model smičućeg spoja sa grupom moždanika na osnovu kojeg se može analizirati njihova nosivost.
5. U radu je predložen postupak proračuna nosivosti grupe moždanika na smicanje koji se može primeniti i za moždanike u grupi koji su izvedeni na međusobnom rastojanju u pravcu smičuće sile manjem od minimalno propisanog $5d$. Prvi put su kroz predloženo rešenje sve važne geometrijske veličine uključene u postupak proračuna nosivosti na smicanje grupe moždanika. Ovaj postupak se može primeniti za rastojanja veća ili jednaka $3d$. Predložen postupak proračuna koji se zasniva na ekvivalentnom prečniku i koeficijenu redukcije je verifikovan na soptvenim eksperimentalnim i numeričkim rezultatima kao i rezultatima eksperimentalnih istraživanja dostupnih u literaturi.
6. Predloženi postupak proračuna nosivosti grupe moždanika daje podjednako dobre rezultate i u slučaju manjih grupa od četiri moždanika kao i u

slučajevima velikih grupa od šest ili devet moždanika. Ovo je potvrđeno parametarskom analizom kao i dostupnim eksperimentalnim rezultatima drugih autora.

7. U slučaju „rombičnog“ rasporeda četiri moždanika u grupi nosivost grupe na smicanje jednaku je zbiru nosivosti pojedinačnih moždanika, odnosno, nema redukcije nosivosti bez obzira što su međusobna rastojanja manja (pravcu sile 3.5*d* a upravno na pravac sile 2.5*d*) ,od minimalno propisanih.
Grupom od četiri moždanika u rombičnom rasporedu moguće je u većini slučajeva u objektima zgradarsva uspešno konstruisati i izvesti podužni smičući spoj čeličnog nosača i montažnih armiranobetonskih ploča.
8. Kod grupa od četiri moždanika u rasporedu 2x2 sa međusobnim rastojanjem 3*d* u pravcu sile nije potrebna redukcija nosivosti ukoliko je visina moždanika veća od 6.5*d*.
9. Sve eksperimentalno ispitane grupe moždanika u ovom radu je karakterisalo duktilno ponašanje. Klizanje u podužnom smičućem spoju je bilo veće od 6.0 mm. Parametarska analiza je ukazala da se u nekim slučajevima, pogotovu kada su u pitanju veće grupe od devet moždanika, može desiti da spoj ne ispunjava kriterijume duktilnosti.
10. Uvedeni pojam ekvivalentni (zamanjujući) prečnik grupe moždanika može se koristiti za procenu ponašanja podužnog smičućeg spoja. Vrednost odnosa visine moždanika i ekvivalentnog prečnika grupe moždanika može se iskoristiti za procenu duktilnosti spoja izvedenog sa grupama moždanika.
11. Treba napomenuti da položaj i količina armature ne utiču na nosivost veze, ali je armatura važna sa stanovišta globalnog ponašanja armiranobetonskog elementa. Armatura se može izostaviti na mestu otvora za smeštaj moždanika u armiranobetonskoj ploči, što začajno pojednostavljuje izvođenje. Takođe, se napominje da se ni u jednom od ispitanih uzoraka nisu pojavile prsline ili odvajanje „novog“ od „starog“ betona.

Na osnovu sprovedenih istraživanja i rezultata do kojih se došlo, kao i iskusta stečenog pri izradi ovog rada mogu se definisati neke teme koje bi bile značajne za buduća istraživanja nosivosti i ponašanja spojeva sa grupama moždanika:

1. Dodatna ispitivanja spojeva sa malim međusobnim razmakom između moždanika u pravcu sile. Ovo se pogotovu odnosi na moždanike većeg prečnika 22mm i 25mm koji se najčešće primenjuju u mostogradnji.
2. Potrebno je preciznije definisati kriterijume za duktilnost spoja sa grupom moždanika. Ovo se posebno odnosi na velike grupe moždanika. Definisanje pouzdanih kriterijuma duktilnosti grupe moždanika omogućilo bi primenu grupe moždanika i u parcijalnim smičućim spojevima.
3. Ispitivanje ponašanja spregnutih nosača sa podužnim spojem izvedenim sa grupama moždanika.
4. Ispitivanje ponašanja spoja sa grupom moždanika pri opterećenju na zamor.

7. LITERATURA

- [1] ANSI/AISC 360-05, An American National Standard, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago 2005.
- [2] BS 5950-3.1:1990, “Structural Use of Steelwork in Building. Part 3 Design in Composite Construction”, UK British Standard Institution, 1990.
- [3] Design Guide for Floor Vibrations, ArcelorMittal Commercial Sections, www.arcelormittal.com/sections, decembar 2012
- [4] DIN 1048 part 1 – 5 Testing concrete, DIN: Deutsches Institut Fur Normung English version, Jun 1991.
- [5] EN1990, Eurocode 0, “Eurocode - Basis of Structural Design”, CEN (European Committee for Standardization), 2002.
- [6] EN 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions — Densities, self-weight, imposed loads for buildings, CEN (European Committee for Standardization), 2004.
- [7] EN1992-1-1, Eurocode 2, “Design of Concrete Structures, General Rules and Rules for Buildings”, CEN (European Committee for Standardization), 2004.
- [8] EN1994-1-1, Eurocode 4, “Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules end Rules for Buildings”, CEN (European Committee for Standardization), December 2004.
- [9] EN1994-2, Eurocode 4, “Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules and Rules for Bridges”, CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [10] ETAG 001 GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE, Annex C: DESIGN METHODS FOR ANCHORAGES, Edition 2006, European Organisation for Technical Approvals
- [11] GB 50010-2002 Code for Design of Concrete Structures, National Standard of the People’s Republic of China, China Architecture & Building Press, Beijing 2002
- [12] Model Code 2010, First published in 2010 by the International Federation for Structural Concrete (fib), Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL
- [13] PCI DESIGN HANDBOOK, Precast and Prestressed Concrete, 6th Edition, PCI Precast/Prestressed concrete institute, Chicago Illinois, 2004.
- [14] Standard Specifications for Steel and Composite Structures, Japan Society of Civil Engineers, December, 2009.
- [15] ABAQUS Documentation, version 6.11, Dassault system, USA, 2012

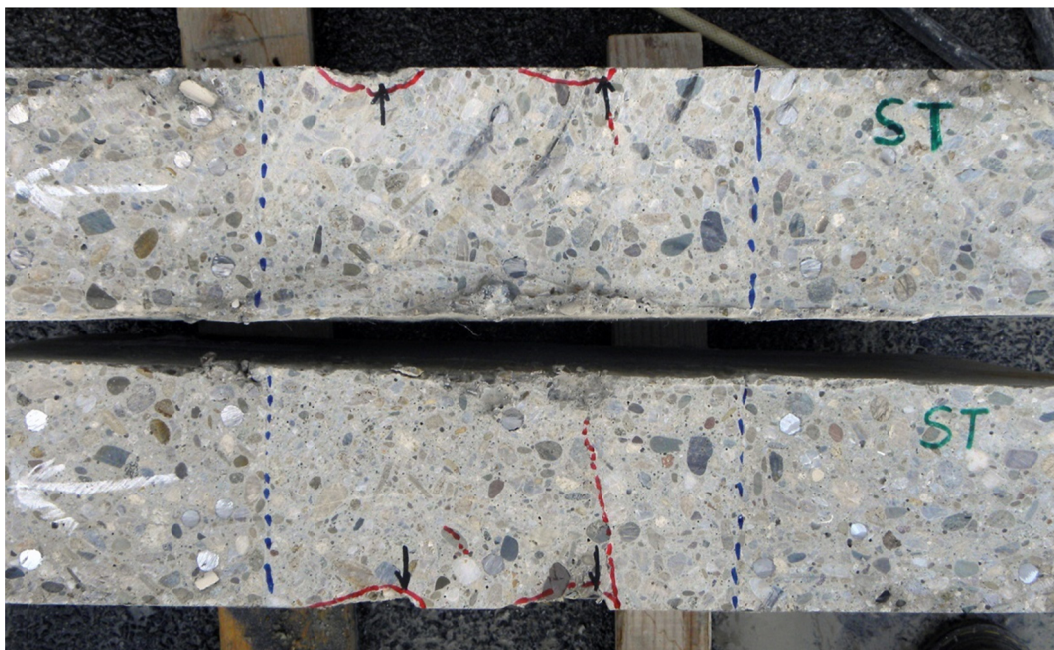
- [16] Anderson Neal, Donald Meinheit, Design Criteria for Headed Stud Groups in Shear, Part 1- Steel Capacity and Back Edge Effects, PCI JOURNAL, September – October 2000
- [17] Bode H. and Roik K. (1987). “Headed Studs – Embedded In Concrete And Loaded InTension,” American Concrete Institute SP 103-4, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 61-88.
- [18] Bompa Dan Vasile, Traian Onet, Identification of concrete damage plasticity constitutive parameters, The national technical-scientific conference „Modern technologies for the 3rd millenium, 05-06 november 2010, Oradea
- [19] Carreira D., Chu K. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. J ACI Struct 1985;82(11):797_804.
- [20] Chambers A. Harry, Principles and Practices of Stud Welding, PCI Journal, PCI Precast/Prestressed concrete institute, Chicago Illinois, September – October 2001.
- [21] Chen Xu, Kunitomo Sugiura, Chong Wu, Qingtian Su, Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests, Journal of Constructional Steel Research (2011), doi:10.1016/j.jcsr.2011.10.029, JCSR-03436; No of Pages 13
- [22] Dongyan Xue, Yuqing Liu , Zhen Yu, Jun He, „Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge“, Journal of Constructional Steel Research 74 (2012) 1–7.
- [23] Guezouli Samy, Alain Lachal, Quang-Huy Nguyen, Numerical investigation of internal force transfer mechanism in push-out tests, Engineering Structures 52 (2013) 140–152
- [24] Grassl P., M. Jirasek, “Damage-plastic model for concrete failure”, International Journal of Solids and Structures 43 (2006) 7166– 7196
- [25] Hegger J., Sedlacek G., Doinghaus P. and Trumpf H., “Studies on the Ductility of Shear Connectors when using High-strength Steel and High-strength Concrete”, Conf. Proc. Ed. by Eligehausen R.” Connections between Steel and Concrete”, Stuttgart, Germany, 10-12 September 2001, pp. 1025-1046.
- [26] Hicks S.J., Lawson R.M., Design of Composite Beams Using Precast Concrete Slabs, SCI PUBLICATION P287, The Steel Construction Institute, 2003
- [27] Jankowiak Tomasz, Lodygowski Tomasz, „Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model“, Foundations of Civil and Environmental Engineering, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznan, No.6 2005.
- [28] Jirasek M., Bažant Ž., Inelastic analyses of structures, John Wiley & Sons, New York, 2002
- [29] Johnson R.P., Anderson D., Designers Handbook to Eurocode 4: Part 1.1: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Tomas Telford, London 1993.
- [30] Johnson R.P., Composite Structures of Steel and Concrete, Blackwell, Oxford 2004.

- [31] Kuhlmann Ulrike, Eurocodes Background and Applications, Design of composite beams according to Eurocode 4-1-1 Ultimate Limit States, 18-20 February 2008, Brussels
- [32] Kupfer H., Hilsdorf H.,K., Rusch H., Behavior of concrete under biaxial stresses, *ACI Journal*, 65, 8(1979),656-666.
- [33] Lam D., and El-Lobody E., “Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No.1, ASCE, January 2005.
- [34] Li An & Krister Cederwall, „Push-out Tests on Studs in High Strength and Normal Strength Concrete“, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 15-29, 1996
- [35] Malm Richard, “Predicting Shear-type Crack Initiation And Growth In Concrete With Non- Linear Finite Element method”, Thesis, Royal Institute of Technology, 2009
- [36] McMackin P.J., Slutter R.G., and Fisher J.W., Headed Steel Anchors Under Combined Loading, ", *AISC Engineering Journal*, Second Quarter, 1973.
- [37] Mirza O., B. Uy, „Effects of the combination of axial and shear loading on the behaviour of headed stud steel anchors“, *Engineering Structures* 32 (2010) 93_105
- [38] Oehlers D.J. and Bradford M.A., “Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members“, *Butterworth-Heinemann*, 1999.
- [39] Oehlers D.J., “Stud Shear Connectors for Composite Beams”, PhD Thesis, The University of Warwick, 1980, /<http://go.warwick.ac.uk/wrap/3977>.
- [40] Okada J., Yoda T. and Lebet J.P., “The Study of the Grouped Arrangements of Stud Connectors on Shear Strength Behavior”, *Structural Eng./Earthquake Eng.,JSCE*, Vol. 23, No. 1, pp. 75-89, April 2006.
- [41] Ollgaard J.G., Slutter R.G. and Fisher J.W., “Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-weight Concrete”, *Engineering Journal*, AISC 1971, Vol. 8, No. 2, pp. 55-64.
- [42] Pallarés Luis, Hajjar J.F., „Headed Steel Stud Anchors in Composite Structures: Part II – Tension and Interaction“, NSEL Report Series Report No. NSEL-014, Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, April 2009
- [43] Pallarés L. and Hajjar J.F., “Headed Steel Stud Anchors in Composite Structures. Part I Shear”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, Vol. 66, pp. 198-212.
- [44] Pavlović Marko, Marković Zlatko, Veljković Milan, Budjevac Dragan, „Bolted Shear Connectors vs. Headed Studs Behaviour in Push-ut Tests“, *Journal of Constructional Steel Research*, doi: 10.1016/j.jcsr. 2013.05.003
- [45] Shim C.S., Lee P.G., Kim D.W. and Chung C.H., „Effects of Group Arrangement on the Ultimate Strength of Stud Shear Connection”, *Proceedings of the 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI, ASCE Conf. Proc.* doi:10.1061/41142(396)8.

- [46] Spremić M., Budjevac D., Marković Z., Dobrić J., „The comparative analysis of the full and partial shear connection of composite beams”, Internacional conference GNP 2008, Žabljak, Podgorica 2008.
- [47] Valente B. Isabel, Paulo J.S. Cruz, „Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete“, Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 1954_1963
- [48] Way A. G. J., Cosgrove T. C., Brettle M. E., „Precast Concrete Floors in Steel Framed Buildings“, SCI PUBLICATION P351, The Steel Construction Institute, 2007

8. PRILOZI

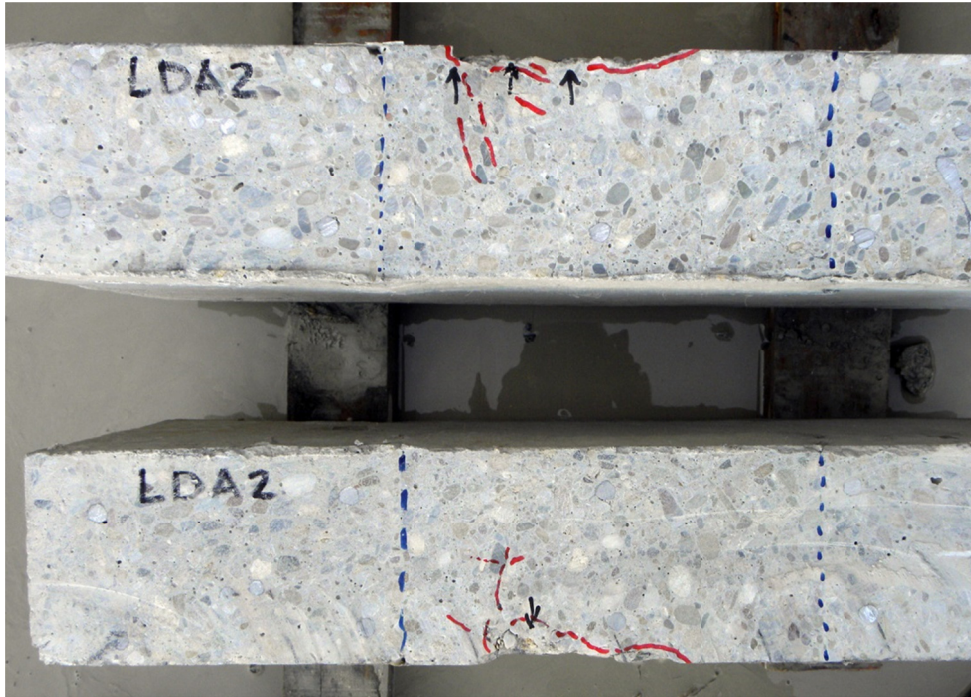
8.1 Poprečni presek armiranobetonske ploče ispitanih uzoraka



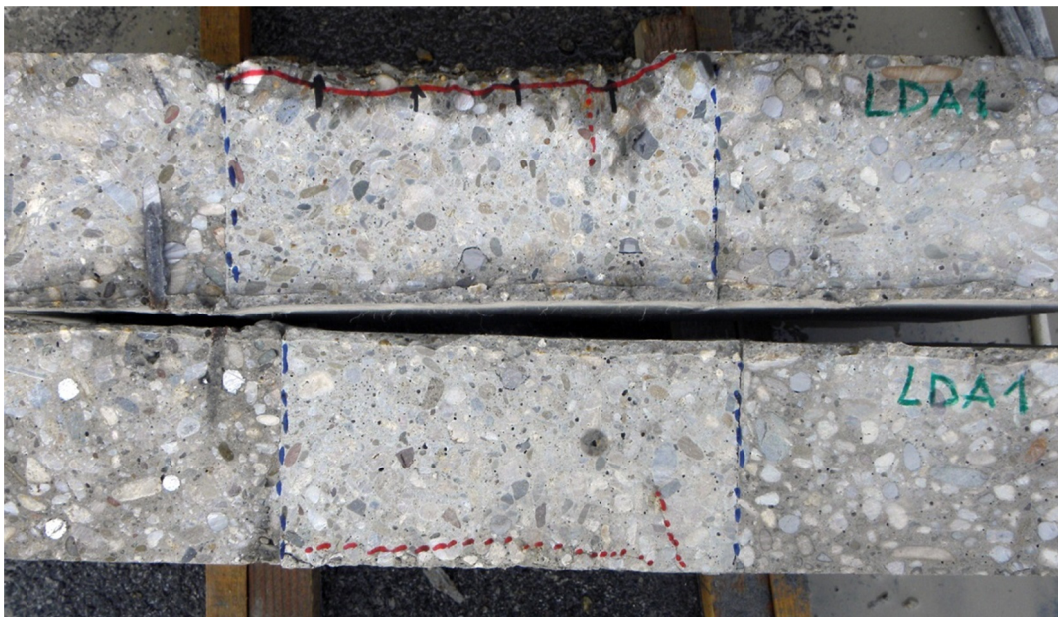
Slika 8.1: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka ST nakon ispitivanja



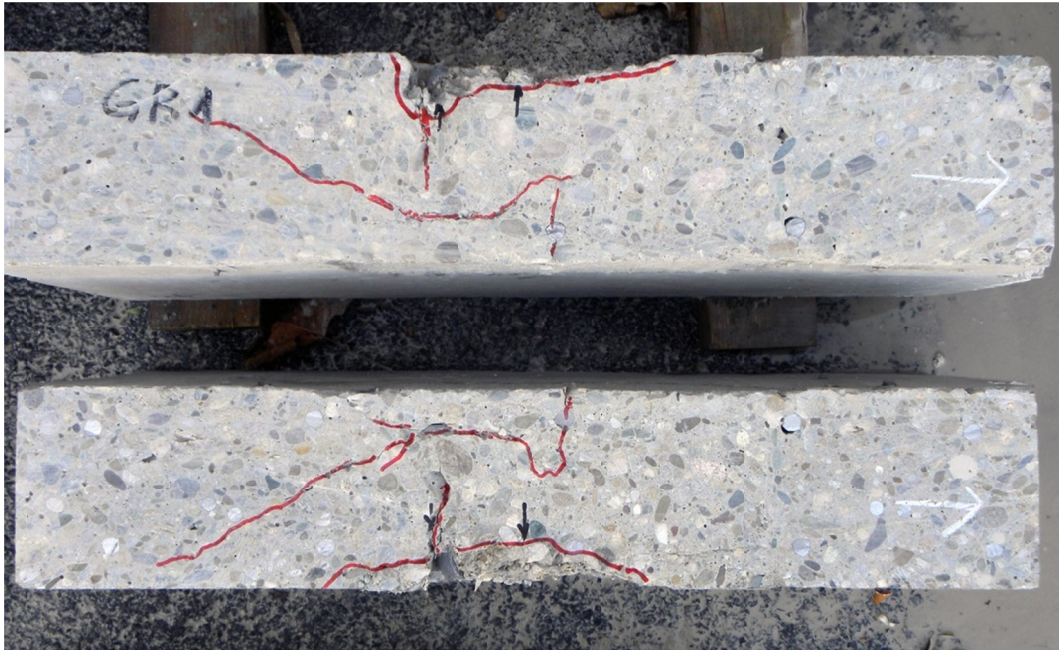
Slika 8.2: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka TDA nakon ispitivanja



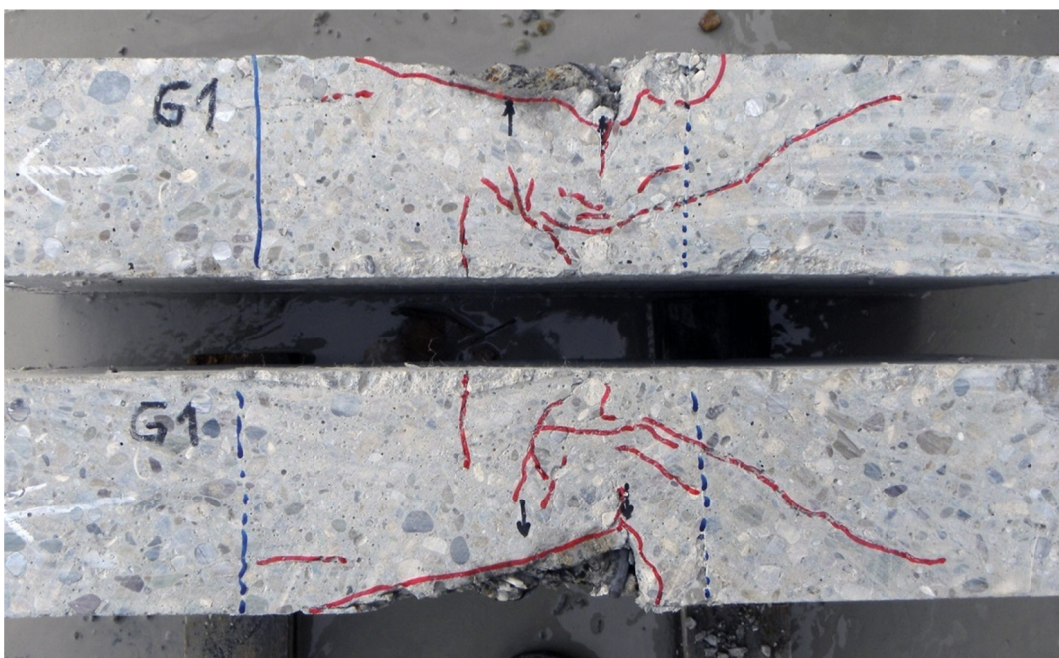
Slika 8.3: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka LDA2 nakon ispitivanja



Slika 8.4: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka LDA1 nakon ispitivanja

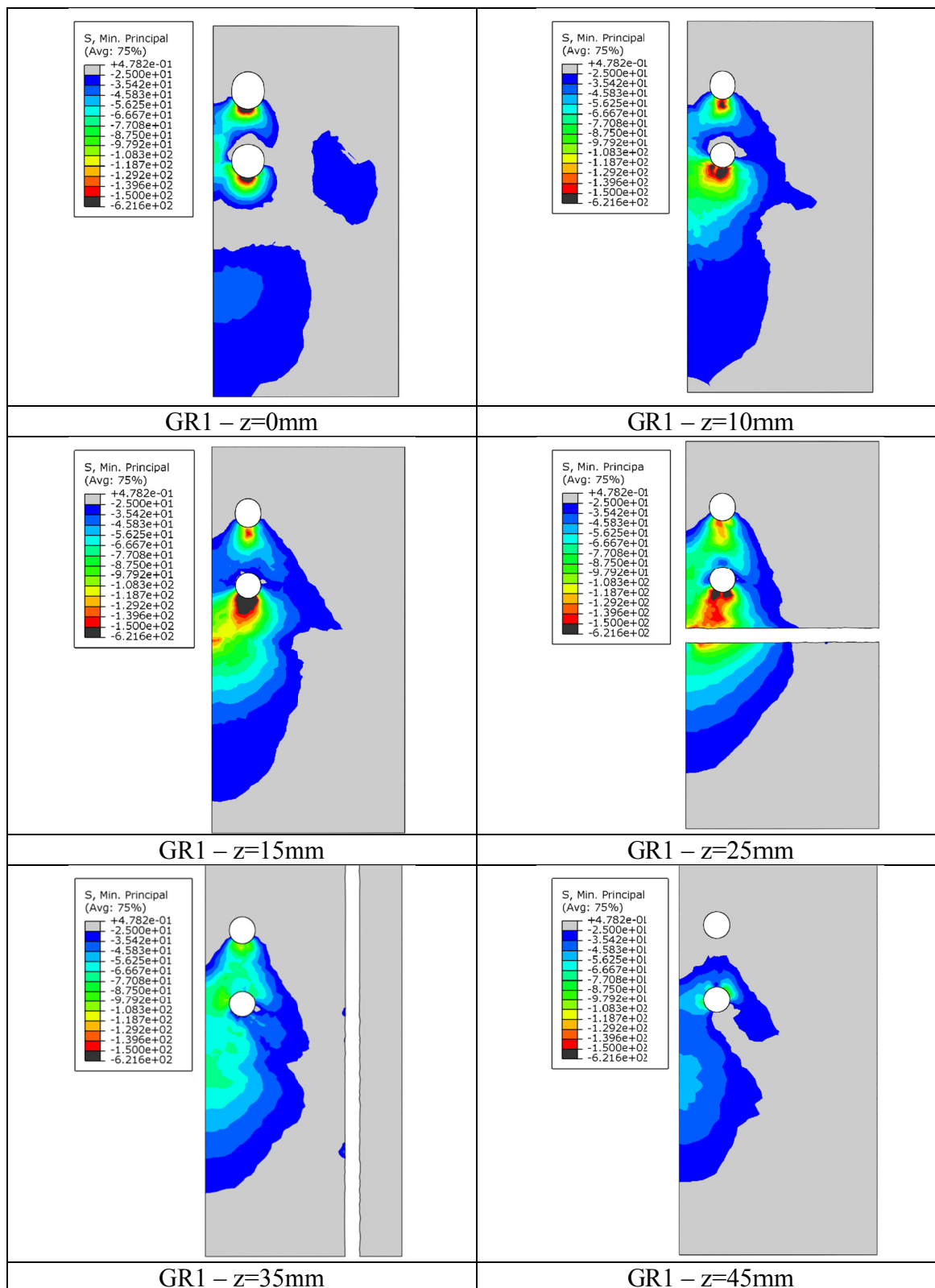


Slika 8.5: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka GR1 nakon ispitivanja

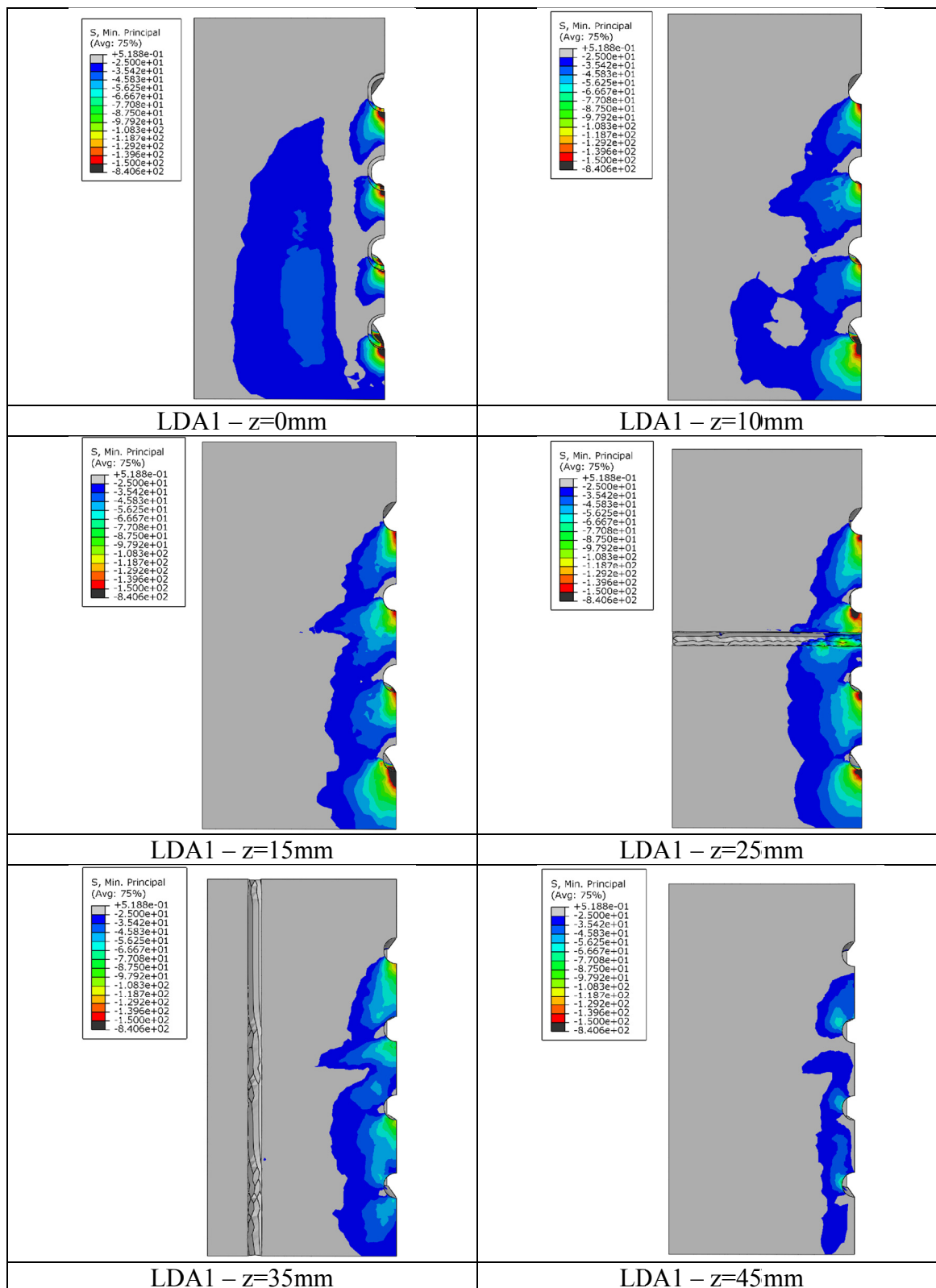


Slika 8.6: Poprečni presek armiranobetonske ploče uzorka G1 nakon ispitivanja

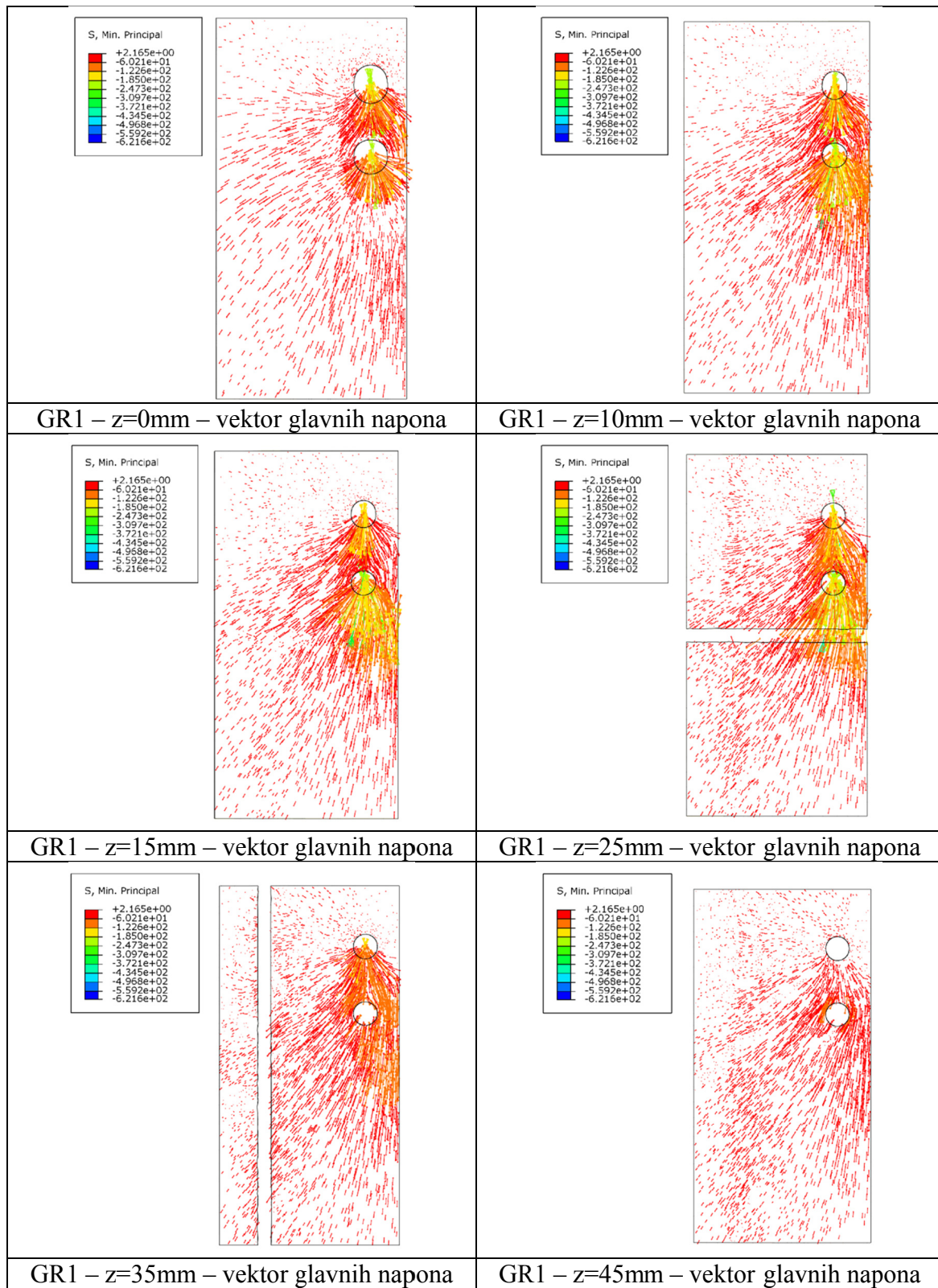
8.2 Rezultati numeričkih (FEM) modela



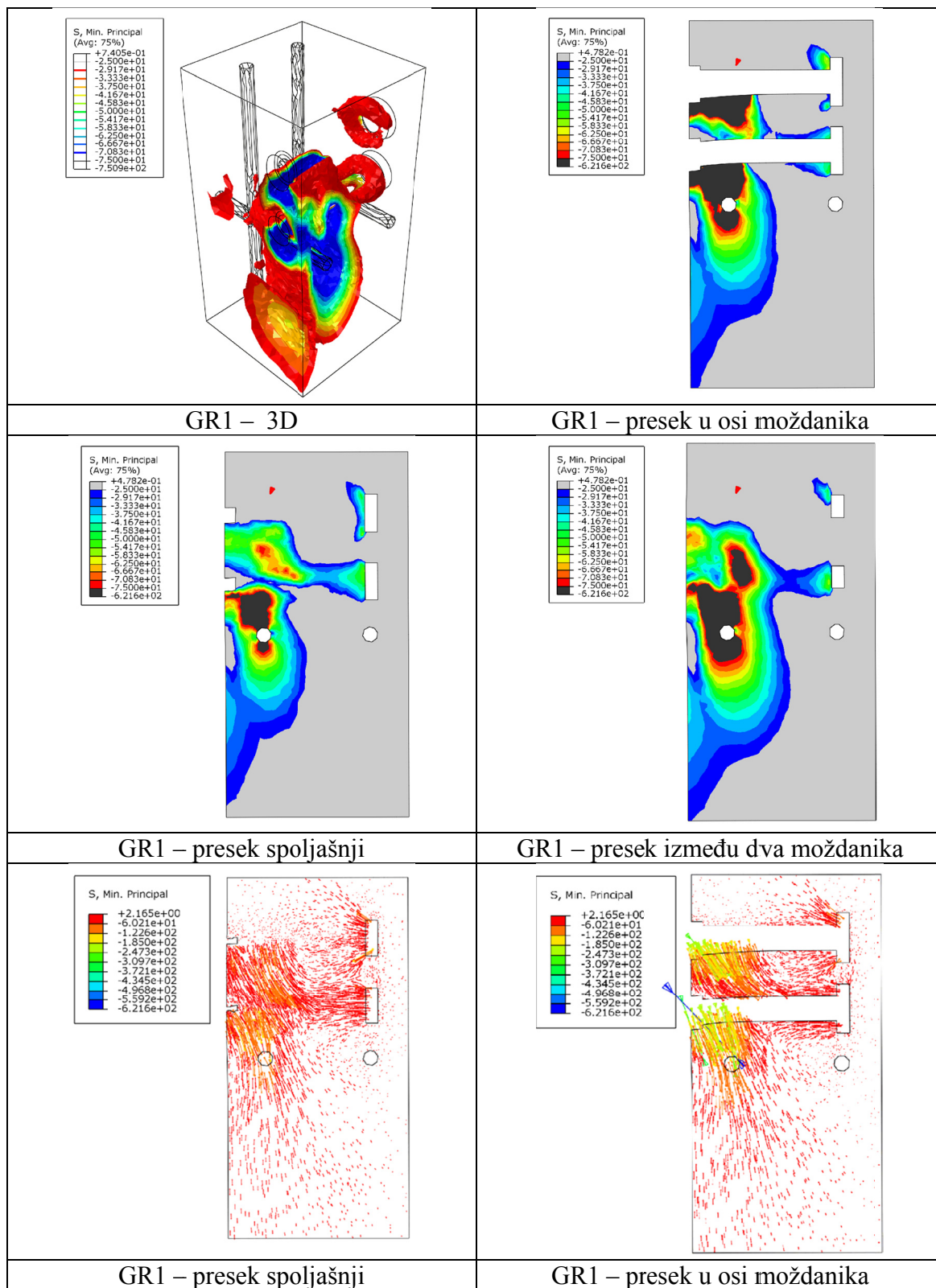
Slika 8.7: Glavni naponi pritiska u betonu iznad korena moždanika grupa GR1



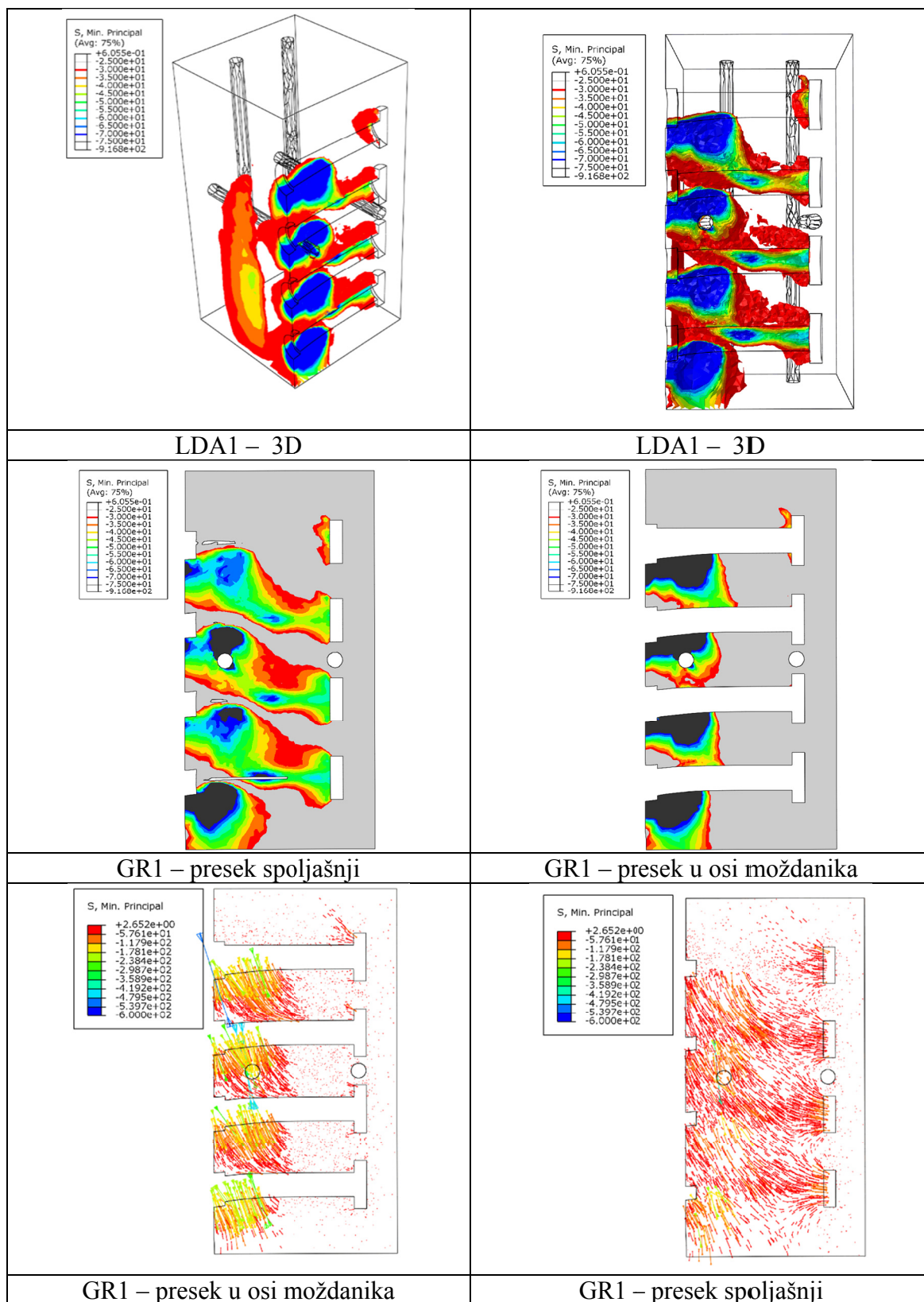
Slika 8.8: Glavni naponi pritiska u betonu iznad korena moždanika grupa LDA1



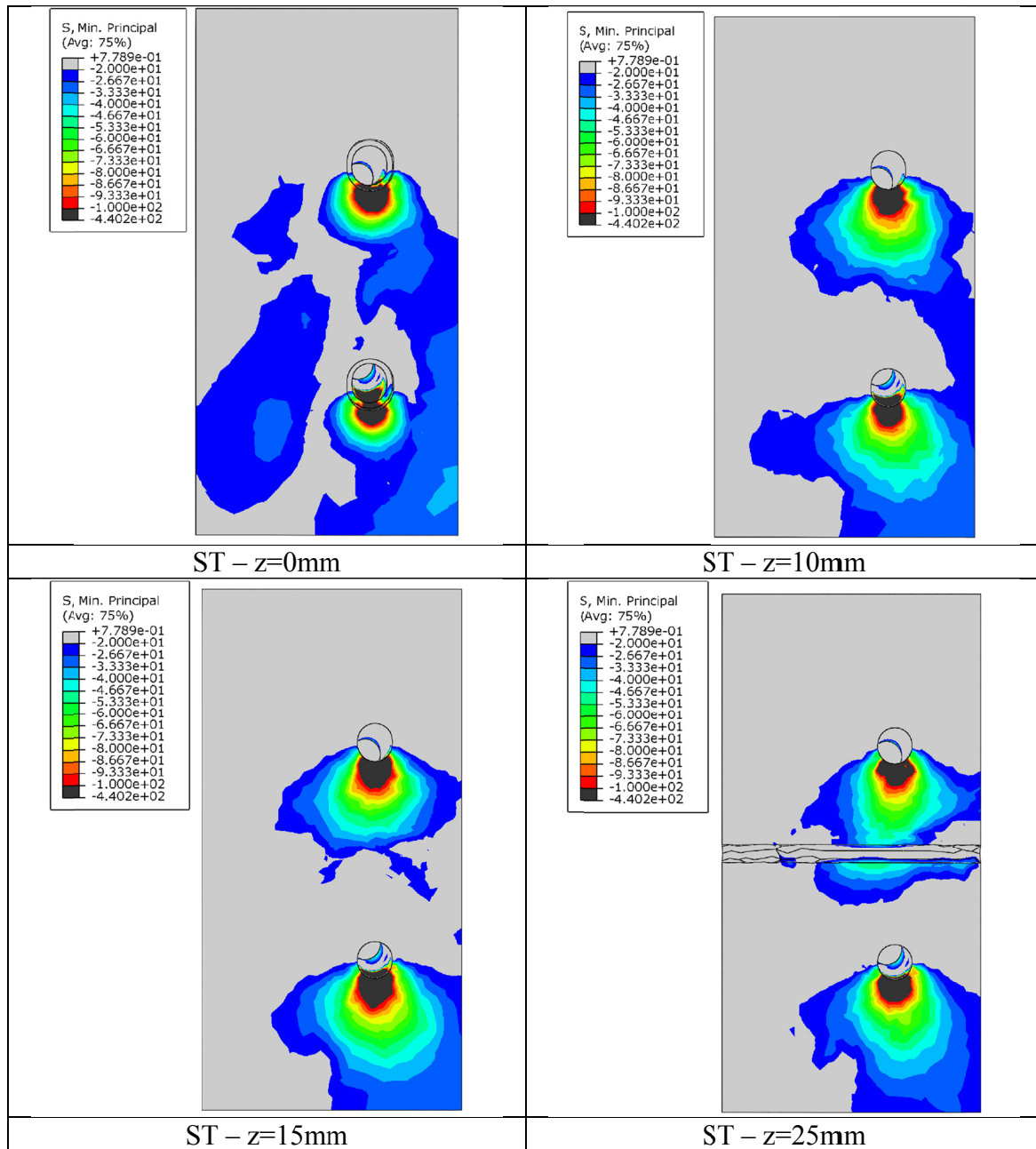
Slika 8.9: Glavni naponi pritiska u betonu iznad korena moždanika grupa GR1



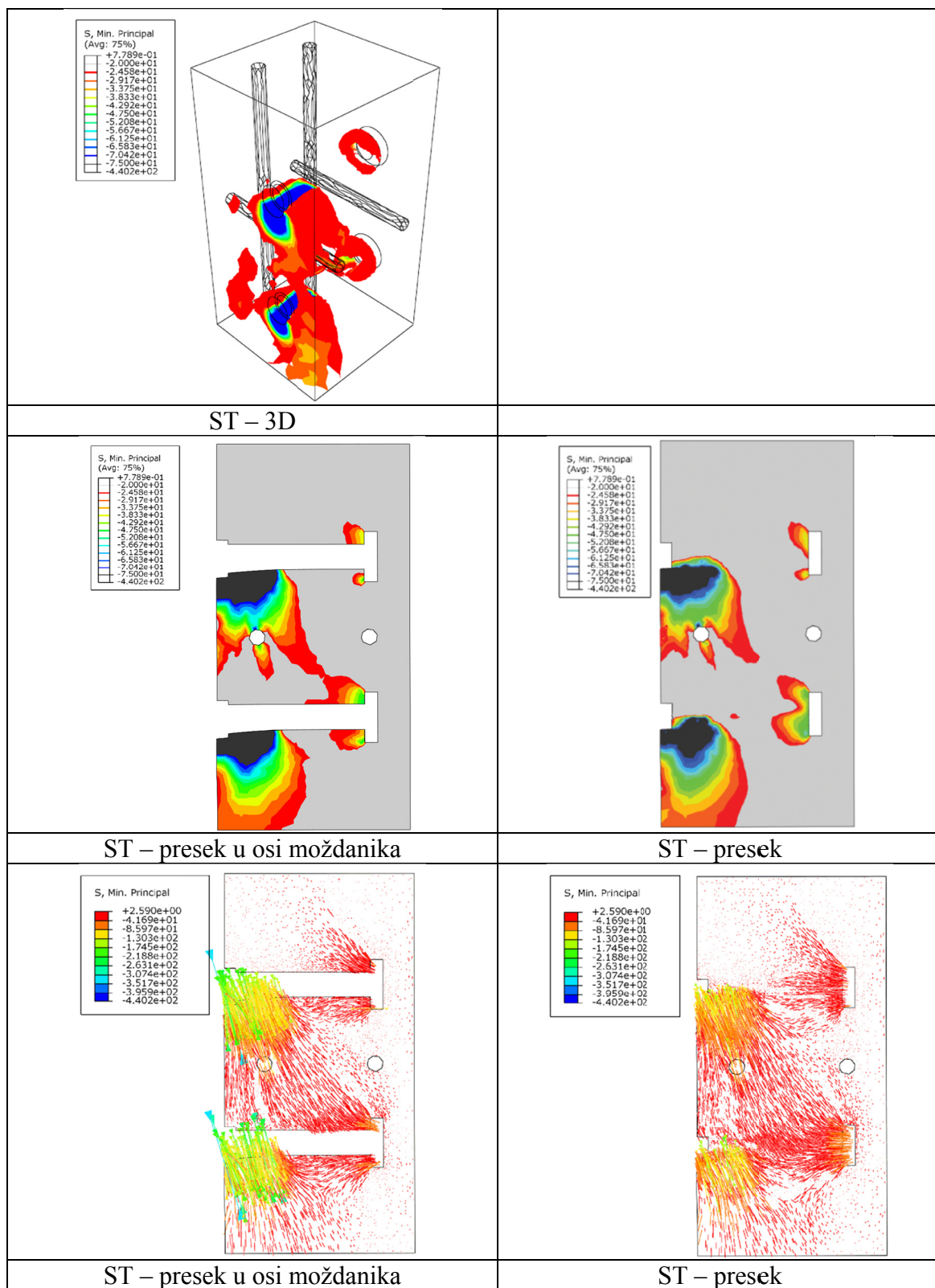
Slika 8.10: Glavni naponi pritiska u poprečnom preseku AB ploče - grupa GR1



Slika 8.11: Glavni naponi pritiska u poprečnom preseku AB ploče – grupa LDA1



Slika 8.12: Glavni naponi pritiska u betonu iznad korena moždanika model ST



Slika 8.13: Glavni naponi pritiska u poprečnom preseku AB ploče model ST

9. OZNAKE I SKRAĆENICE

d	Prečnik, prečnik stabla moždanika sa glavom
h_{sc}	Ukupna visina moždanika sa glavom nakon zavarivanja
h_c	Debljina betonske ploče
n_p	Broj montažnih ploča na nosaču
e_g	Razmak grupa moždanika na nosaču
e_l	Osno rastojanje između susednih moždanika u pravcu smičuće sile podeljeno sa prečnikom moždanika
e_t	Osno rastojanje između susednih moždanika upravno na pravac smičuće sile podeljeno sa prečnikom moždanika
n	Broj moždanika
m	Koeficijent
k, K	Koeficijent
α_G	Koeficijent redukcije
t	Debljina sloja betona
n_c	Broj kolona moždanika u grupi
n_r	Broj redova moždanika u grupi
n_g	Broj grupa moždanika
s	Broj grupa moždanika
d_G	Prečnik grupe
L	Raspon spregnutog elementa
l_p	Širina montažne armiranobetonske ploče
λ_n	Razmak nosača
w_a	Ugib nosača u fazi građenja
w_{t0}	Ugib spregnutog nosača
w_{tn}	Ugib spregnutog nosača sa uključenim efektima tečenja betona
f	Frekvencija nosača u prvom tonu
M_{mod}	Modalna masa
A_s	Površina poprečnog preseka stable moždanika
A	Površina poprečnog preseka

- f_u - Čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika sa glavom
 f_{ud} - Proračunska čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika sa glavom
 f_{ck} - Karakteristična čvrstoća betona pri pritisku
 f_{cd} - Proračunska čvrstoća betona pri pritisku
 $f_{ck,cube}$ - Karakteristična čvrstoća betona pri pritisku dobijena ispitivanjem kocke
 f_{ct} - Karakteristična čvrstoća betona pri zatezanju
 $f_{ct,fl}$ - Karakteristična čvrstoća betona pri zatezanju savijanjem
 f_{cm} - Srednja vrednost čvrstoća betona pri pritisku
 f_{ctm} - Srednja vrednost čvrstoća betona pri zatezanju
 ε_{cl} - Dilatacija pri najvećoj vrednosti napona
 ε_c - Dilatacija
 α_d, α_a - Koeficijenti prema [11]
 $\alpha, \alpha_{tE}, \alpha_{tD}$ - Koeficijenti prema [44]
 e - Ekscentricitet
 ψ - Ugao dilatacija
 E_{cm} - Sekantni modul elastičnosti betona
 E_c - Modul elastičnosti betona
 E - Modul elastičnosti čelika
 ν - Poasonov koeficijent
 w_c - Težina betona
 γ_v - Parcijalni koeficijent, vrednost prema EC4 $\gamma_v = 1,25$
 γ_b - Parcijalni koeficijent, vrednost prema JSCE $\gamma_b = 1,30$
 ST - Standardni uzorak
 LDA - Uzorak sa podužnom orijentacijom grupe moždanika
 TDA - Uzorak sa poprečnom orijentacijom grupe moždanika
 G - Uzorak sa montažnom pločom bez armature na nestu moždanika
 GR - Uzorak standardnim rasporedom armature u montažnoj ploči
 P_{ult} - Nosivost uzorka
 $P_{u,stud}$ - Nosivost moždanika na smicanje – eksperimentalna vrednost
 ϕ_{tan} - Tangentna krutost uzorka
 $P_{u,min}$ - Minimalna nosivost uzorka na smicanje sa istom grupom moždanika

- $P_{u,max}$ - Maximalna nosivost na smicanje uzoraka sa istom grupom moždanika
- P_{av} - Prosečna vrednost nosivosti na smicanje uzoraka sa istom grupom moždanika
- $P_{Rk,exp}$ - Karakteristična proračunska nosivost na smicanje moždanika sa glavom na osnovu karakteristika materijala dobijenih eksperimentalnim putem
- P_{Rk} - Karakteristična vrednost nosivosti na smicanje moždanika sa glavom
- $P_{Rk,s1}$ - Karakteristična nosivost prema EC4 Aneks B
- $P_{Rk,s2}$ - Karakteristična nosivost prema EC0 Aneks D
- P_{Rd} - Proračunska nosivost na smicanje moždanika sa glavom
- Q_k - Karakteristična nosivost moždanika na smicanje prema [2]
- V_{sud} - Proračunska nosivost moždanika prema JSCE [N]
- $M_{a,Ed}$ - Proračunski moment savijanja koji deluje na deo poprečnog preseka od konstrukcionog čelika
- $M_{pl,a,Rd}$ - Proračunska vrednost plastičnog momenta nosivosti dela poprečnog preseka od konstrukcionog čelika
- $V_{a,Ed}$ - Proračunska vrednost smičuće sile
- $V_{a,Rd}$ - Proračunska vrednost nosivosti na smicanje dela poprečnog preseka od konstrukcionog čelika
- M_{Ed} - Proračunski moment savijanja
- M_{Rd} - Proračunska vrednost nosivosti na savijanje spregnutog poprečnog preseka
- V_{Ed} - Proračunska vrednost smičuće sile
- V_{Rd} - Proračunska vrednost nosivosti na smicanje spregnutog poprečnog preseka
- $V_{l,Ed}$ - Proračunska vrednost podužne sile smicanja
- F - Koncentrisana sila
- F_{max} - Maksimalna vrednost sile
- δ_{max} - Maximalno podužno pomeranje u podužnom smičućem spoju
- δ_{av} - Podužno pomeranje koje odgovara prosečnoj maksimalnoj nosivosti
- s - Pomeranje u smičućem spoju pri opterećenju $0,7P_{Rk}$
- δ_{uk} - Karakteristična vrednost kapaciteta klizanja poružnog smičućeg spoja
- k_{sc} - Krutost smičućeg spoja i krutost moždanika
- α - Koeficijent
- m_x - Srednja vrednost n uzoraka
- k_n - Koeficijent za 5% karakterističnu vrednost

V_x	Koeficijent varijacije
s_x	Vrednost standardne devijacije
η	Redukcioni koeficijent prema [2], parametar prostornog stanja napona
p	Hidrostatički pritisak
q	Mises-ov ekvivalentni napon
ψ	Ugao dilatacija u p-q ravni
n	Broj istih uzoraka
σ	Napon, tenzor napona
D	Parametar oštećenja
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Vrednosti glavnih napona
k	Koeficijent
k_s	Koeficijent materijala
τ_{\max}	Maksimalni napon smicanja
C_1	Koeficijent podužnog rastojanja prema [2]
d_1	Podužno rastojanje između moždanika [2]
$N_{Rk,s}$	Karakteristična nosivost moždanika na zatezanje
$N_{Rk,c}$	Karakteristična nosivost na zatezanje betona oko moždanika
$N^0_{Rk,c}$	Karakteristična inicijalna nosivost na zatezanje betona oko moždanika
Z_{Ed}	Proračunska vrednost sile zatezanja
Z_{Rd}	Proračunska nosivost na zatezanje
$A^0_{c,N}$	Površina baze piramide loma betona oko pojedinačnog moždanika prema [10]
$A_{c,N}$	Površina baze piramide loma betona oko moždanika prema [10]
$A_{c,V}$	Površina baze piramide loma betona oko moždanika prema [10]

10. BIOGRAFIJA AUTORA

Milan Spremić rođen je 18.03.1975. godine u Loznici, gde je završio osnovnu i srednju školu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1993. godine, gde je diplomirao 1999. iz oblasti metalnih konstrukcija na Odseku za konstrukcije.

Od 1999. do 2001. godine radi kao saradnik u Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Od 2001. godine odlukom Izbornog veća Građevinskog fakulteta, izabran je u zvanje asistenta pripravnika na grupi predmeta Metalne konstrukcije i Metalni mostovi na Katedri za materijale i konstrukcije. Od 2007 godine nakon odbranjene magistarske teze pod naslovom „Prilog analizi savremenih spregnutih međuspratnih konstrukcija“ radi kao asistent na grupi predmeta iz uže naučne oblasti metalne konstrukcije. Pedagoški rad na fakultetu obuhvata rad u vođenju vežbi i izvođenu praktične nastave na osam predmetima iz oblasti metalnih konstrukcija.

U svom naučnom radu Milan Spremić bavi se problemima stabilnosti čeličnih konstrukcija kao i problemima nosivosti spregnutih konstrukcija. Učestvovao je u više naučno istraživačkih projekata. Koautor je preko trideset naučnih i stručnih radova iz oblasti čeličnih konstrukcija i spregnutih konstrukcija od čelika i betona, koji su objavljeni u časopisima, stručnim publikacijama, na kongresima i simpozijumima u zemlji i inostranstvu.

Pored nastavno-naučnog rada aktivno se bavio i stručnim radom. Učestvovao je izradi: glavnih projekata, idejnih projekata i idejnih rešenja za objekte, kao što su: antenski stubovi, trgovinsko poslovni objekti, skladišne hale, tržni centari, drumski i železnički mostovi, od kojih je većina izvedena u našoj zemlji i u inostranstvu. Bio je član konkursnog tima za izradu idejnih rešenja mostova preko Boka Kotorskog zaliva (otkupno rešenje) i mosta preko Nišave u Nišu (druga nagrada). Učestvovao je kao član projektantskog tima u izradi glavnog projekta Novog Železničko – drumskog mosta preko Dunava u Novom Sadu.

Milan Spremić je oženjen i otac dva deteta.

ПРИЛОГ 1: Изјава о ауторству

Потписани: мр Милан Спремић дипл.грађ.инж

Број уписа: мр, одлука број 700/8-09 од 14.07.2010.

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

АНАЛИЗА ПОНАШАЊА ГРУПЕ ЕЛАСТИЧНИХ МОЖДНИКА КОД
СПРЕГНУТИХ НОСАЧА ОД ЧЕЛИКА И БЕТОНА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима 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.

Потпис докторанта

У Београду, јул 2013.



ПРИЛОГ 2: Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: мр Милан Спремић дипл.грађ.инж

Број уписа: мр, одлука број 700/8-09 од 14.07.2010.

Студијски програм: Грађевинарство

Наслов рада: АНАЛИЗА ПОНАШАЊА ГРУПЕ ЕЛАСТИЧНИХ
МОЖДАНИКА КОД СПРЕГНУТИХ НОСАЧА ОД ЧЕЛИКА
И БЕТОНА

Ментори: Проф. Драган Буђевац, дипл.грађ.инж и Проф. Златко
Марковић, дипл.грађ.инж.

Потписани: мр Милан Спремић дипл.грађ.инж

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској
верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума
Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања
доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране
рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне
библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у
Београду.

Потпис докторанта

У Београду, јул 2013.



ПРИЛОГ 3: Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

АНАЛИЗА ПОНАШАЊА ГРУПЕ ЕЛАСТИЧНИХ МОЖДАНИКА КОД СПРЕГНУТИХ НОСАЧА ОД ЧЕЛИКА И БЕТОНА која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду 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 – делити под истим условима

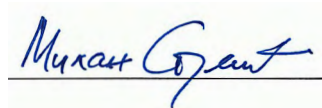
5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

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

Потпис докторанта

У Београду, јул 2013.



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.