

Primljen / Received: 19.12.2017.

Ispravljen / Corrected: 19.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 12.12.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2019.

# Eksperimentalno ispitivanje otpornosti na udar AB stupova s različitim omjerima armature

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Xiwu Zhou**  
[xiwuzhou@163.com](mailto:xiwuzhou@163.com)



**Runcheng Zhang**, dipl.ing.građ.  
[1097855010@qq.com](mailto:1097855010@qq.com)



**Kai Zhao**, dipl.ing.građ.  
[308416373@qq.com](mailto:308416373@qq.com)



Prof.dr.sc. **Guoxue Zhang**  
[zhanggx@hotmail.com](mailto:zhanggx@hotmail.com)



Izv.prof.dr.sc. **Benying Wu**  
[yingbenwu@163.com](mailto:yingbenwu@163.com)

Sveučilište Foshan, Kina  
Odjel za promet, građevinarstvo i arhitekturu

Izvorni znanstveni rad

**Xiwu Zhou, Runcheng Zhang, Kai Zhao, Guoxue Zhang, Benying Wu**

## Eksperimentalno ispitivanje otpornosti na udar AB stupova s različitim omjerima armature

U ovom se ispitivanju za simuliranje sudara broda i stupa koristi najnapredniji domaći sustav ispitivanja na udar s vrlo visokim padom malja. Osnovni naglasak stavljen je na određivanje sila udara, pomaka i vremenskog razvoja deformacija za pet armiranobetonskih uzoraka stupova s različitim koeficijentima armiranja, isto kao i na analizu oštećenja betona te pojavu i širenje pukotina nakon udara. Dobiveni rezultati pokazuju da povećanje koeficijenta armiranja dovodi u opisanim uvjetima ispitivanja do određenog poboljšanja bočne otpornosti AB stupova na udar.

### Ključne riječi:

armirani beton, stup, horizontalni udar, koeficijent armiranja, otpornost na udar

Original scientific paper

**Xiwu Zhou, Runcheng Zhang, Kai Zhao, Guoxue Zhang, Benying Wu**

## An experimental study of impact performance of RC piers with different reinforcement ratios

The most advanced domestic super-high drop hammer impact test system was used in this study to simulate ship-piers collisions. The main focus of this study was to examine the impact forces, displacements, and strain time histories of five reinforced concrete pier specimens with different reinforcement ratios, and to analyse concrete damage and crack propagation and development after impact events. The results showed that, under this test conditions, an increase in reinforcement ratio can somewhat improve the lateral impact resistance of reinforced concrete piers.

### Key words:

reinforced concrete, pier, horizontal collision, reinforcement ratio, impact performance

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Xiwu Zhou, Runcheng Zhang, Kai Zhao, Guoxue Zhang, Benying Wu**

## Experimentelle Prüfung der Stoßfestigkeit von Stahlbetonsäulen mit unterschiedlichen Bewehrungsverhältnissen

In dieser Studie wird das fortschrittlichste inländische Stoßprüfsystem mit einem sehr hohen Fall eines Schlägels zur Simulation von Schiffs- und Säulenkollisionen verwendet. Das Hauptaugenmerk lag auf der Bestimmung der Stoßkraft, der Verschiebung und der zeitlichen Entwicklung von Verformungen für fünf Stahlbetonsäulen mit unterschiedlichen Bewehrungskoeffizienten sowie auf der Analyse von Betonschäden und dem Auftreten und der Ausbreitung von Rissen nach dem Stoß. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Erhöhung des Bewehrungskoeffizienten in den beschriebenen Versuchsbedingungen zu einer gewissen Verbesserung der lateralen Stoßfestigkeit der Stahlbetonsäulen führt.

### Schlüsselwörter:

Stahlbeton, Säule, horizontaler Stoß, Bewehrungskoeffizient, Stoßfestigkeit

## 1. Uvod

Posljednjih se godina bilježi prilično velik broj nesreća uzrokovanih udarom u armiranobetonske konstrukcije. Neki od primjera takvih nesreća su: udar visokog vozila u glavni nosač cestovnog nadvožnjaka, sudar stupa sa stupom, udari u planinske mostove i građevine, nesreće s dizalicama, eksplozije u slučaju terorističkih napada itd. Prema statističkim podacima, u novije je vrijeme zabilježeno čak sedamdeset udara brodova u stupove mosta Wuhan na rijeci Jangce [1]. Takve se nesreće često događaju i u drugim državama diljem svijeta. Tako je samo u SAD-u u razdoblju od 1970. do 1974. godine zabilježeno više od osam stotina udara brodova u mostove [2]. Jasno je da se mehaničko ponašanje armiranobetonskih konstrukcija pri udaru razlikuje od ponašanja pri statičkom opterećenju i to zbog osjetljivosti materijala na deformacije, inercije elemenata, te lokalnih oštećenja i deformacija u zoni udara. Stoga se u današnje vrijeme velika važnost pridaje upravo analizi dinamičkih mehaničkih svojstava betonskih konstrukcija za slučaj udarnog opterećenja.

Mnogi su istraživači u novije vrijeme izradili, kako u Kini tako i u drugim državama, čitav niz studija o djelovanju udarnog opterećenja na betonske konstrukcije. Tako su npr. Feng Yu i dr. [3] analizirali utjecaj koeficijenta armiranja na svojstva armiranobetonskih stupova pri udarnom opterećenju. Rezultati ispitivanja pokazuju da povećanje koeficijenta armiranja uzdužnom armaturom može dovesti do poboljšanja bočne nosivosti stupova okvira te do povećanja dopuštene brzine i intenziteta nanošenja opterećenja. Ustanovljeno je da način otkazivanja stupova okvira primarno ovisi o razmaku spona. Također je utvrđeno da je posmični slom vjerojatniji u slučaju velikog razmaka između spona. U suprotnom, do sloma najčešće dolazi uslijed savijanja. Liu Tinguan i dr. [4] analizirali su način otkazivanja armiranobetonskih stupova u slučaju bočnog udara. Rezultati proračuna pokazuju da su trajanje nanesenog opterećenja i vršne vrijednosti faktori koji bitno utječu na način otkazivanja nosivih elemenata. Zhang Ruikun [5] proveo je numeričku analizu dinamičkog odziva armiranobetonskih stupova pri bočnom udarnom opterećenju. Rezultati tog proračuna pokazali su da se pomak čvorova unutarnjih stupova bitno smanjuje s povećanjem koeficijenta armiranja uzdužnom armaturom i promjera uzdužne armature. Istovremeno, koeficijent armiranja poprečnom armaturom nije bitno utjecao na rezultate. Thilakarathna i dr. [6] numerički su ispitali otpornost na bočno udarno opterećenje armiranobetonskih uzdužno tlačanih stupova, te su predložili metodu prikladnu za ocjenjivanje otpornosti stupova na udar za najčešće oblike udara. Guo Yuan i dr. [7] ranije su proveli modelsko ispitivanje i numeričku analizu horizontalnog udara u armiranobetonske stupove. Oni su primijenili modelsko ispitivanje i metodu konačnih elemenata za numeričku analizu sporih horizontalnih udara u armiranobetonske stupove, a njihov se postupak bazirao na teoriji horizontalnog udara i metodi konačnih elemenata. Oni su također primijenili i matematičku metodu regresijskog izjednačavanja

te su na toj osnovi predložili formulu za proračunavanje koja se može primijeniti za ocjenu dinamičke čvrstoće pri savijanju armiranobetonskih presjeka stupova, a nakon uzimanja u obzir dinamičkih utjecaja raznih jačina udara. Sha i dr. [8, 9] proveli su eksperimentalno istraživanje i numeričke simulacije kako bi odredili utjecaj težine broda i brzine na silu udara, te su uspjeli odrediti odnos između utjecaja brzine udara na veličinu udarne sile i težine broda. Xu Linfeng i Tu Hongxuan i dr. [10, 11] analizirali su metodu za proračunavanje udarne sile koja djeluje na stupove. Ning Jianguo i dr. [12] analizirali su dinamički odziv i mehanička svojstva armiranobetonskih konstrukcija pod utjecajem snažnih udara, te su opisali razvoj istraživanja o mehaničkom ponašanju armiranog betona pod utjecajem snažnih udarnih opterećenja. Ge Nan i dr. [13] analizirali su mehanička svojstva armiranobetonskih stupova pod utjecajem udarnog opterećenja. Rezultati proračuna pokazali su da su trajanje i vršne vrijednosti opterećenja faktori koji značajno utječu na način otkazivanja konstrukcijskih elemenata. Remennikov i Kaewunruen [14] proveli su eksperimentalno istraživanje otpornosti armiranobetonskih stupova na udar. U rezultatima su prikazali četiri magnitude mehaničkog ponašanja armiranobetonskih stupova pod utjecajem statičkog i udarnog opterećenja. Consolazio i dr. [15] usporedili su i analizirali utjecaj oblika i veličine stupova na veličinu udarne sile i deformaciju stupova. Louw J.M. i dr. [16] analizirali su dinamički odziv betonskih konzolnih stupova na udarno opterećenje. Fan i dr. [17] ispitali su dinamički odziv mostovnih konstrukcija na udar broda pomoću analize udarnog spektra, te su potvrdili točnost metode za analizu udarnog spektra. U istraživanju koje su proveli Ohnuma H. i dr. [18], način otkazivanja armiranobetonskih elemenata analizira se pomoću ispitivanja na konstrukciji. Tian Li i dr. [19] proučavali su dinamički odziv i štetu na armiranobetonskim stupovima uslijed nanošenja udarnog opterećenja. Rezultati njihovog istraživanja pokazali su da se razina oštećenja betonskih stupova može djelotvorno smanjiti primjenom vanjskih viskozni materijala. Wang Junjie i Chen Cheng [20] analizirali su oštećenje stupova pod utjecajem udarnih sila i u tu su svrhu koristili model konačnih elemenata. Predložili su i indeks ocjenjivanja koji uključuje pet vrsta oštećenja cilindričnih armiranobetonskih stupova. Gücüyen E. i dr. [21] proveli su eksperimentalnu analizu dinamičkog opterećenja tipskih elemenata cijevi. Njihovi rezultati pokazuju da se ubrzanja i sile udara smanjuju s povećanjem pomaka ispitivanih elemenata, odnosno kako se približava otkazivanje. Anil i dr. [22] koristili su sloj geopjene kako bi povećali otpornost cijevi na udar. Dobiveni rezultati pokazuju da se primjenom zaštitnih slojeva pijeska i geopjene uglavnom mogu smanjiti štetni utjecaji udarnog opterećenja u smislu disipacije udarnog djelovanja na cijevima te smanjenja ubrzanja i pomaka. Erdem i dr. [23] proučavali su utjecaj udarnog djelovanja na armiranobetonske uzorke različitih veličina. U okviru spomenutih ispitivanja dobiveni su značajni podaci o otpornosti armiranobetonskih elemenata na udarno opterećenje. Međutim, vrlo malo radova je napisano o istraživanjima sustava za ispitivanje bočnog udarnog opterećenja armiranobetonskih stupova mostova s različitim koeficijentima armiranja uzdužnom

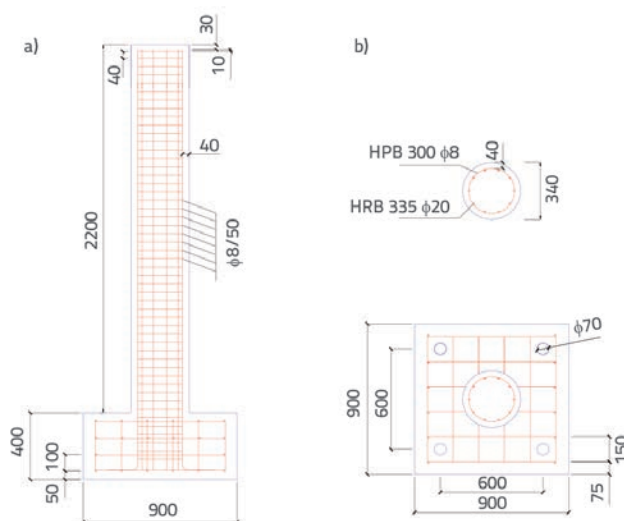
armaturom. U istraživanjima koja se prikazuju u ovom radu primjenjuje se najnapredniji domaći multifunkcionalni sustav za ispitivanje s maljem koji se pušta s vrlo velikih visina, a koristi se za provođenje ispitivanja horizontalnog udarnog opterećenja armiranobetonskih stupova mostova s različitim koeficijentima armiranja uzdužnom armaturom. Ispituje se također i utjecaj koeficijenta armiranja na udarno djelovanje, na dinamički odziv i na oštećenje uzoraka armiranobetonskih stupova mostova, pri čemu je cilj ponuditi tehničku osnovu za projektiranje otpornosti na udarno opterećenje te za ocjenu armiranobetonskih stupova mostova.

## 2. Udarno ispitivanje

### 2.1. Izrada uzoraka AB stupova

U ovom je radu kao prototip za ispitivanje odabran most s dvostrukim kružnim stupovima, a model stupa tog mosta izveden je u umanjenom mjerilu od 1:5. Ukupno je projektirano pet modela armiranobetonskog kružnog stupa. Visina svakog uzorka iznosi 2200 mm, a promjer je 340 mm. U podnožju uzorka izvedena su četiri otvora za vijke visoke čvrstoće koji osiguravaju upetost uzorka u podlogu. Uzorak je izveden od betona razreda C40/50, a korištena je uzdužna armatura tipa HRB335 (granice popuštanja 335 N/mm<sup>2</sup>). Spone su tipa

HPB300 (granice popuštanja 300 N/mm<sup>2</sup>) i promjera 8 mm, a u ispitanoj je stupu korišten simetričan raspored armature, dok je čelična armatura spojena zavarivanjem. Nacrtni armiranja uzorka M2-20 prikazan je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz uzorka M2-20, dimenzije u "mm"

Projektne parametre uzorka iskazani su u tablici 1. Materijalna svojstva armaturnih šipaka prikazana su u tablici 2. Za izvođenje

Tablica 1. Parametri za izradu uzoraka

Oznaka uzorka	Uzdužna armatura	Spone	Razred betona	Koeficijent armiranja uzdužnom armaturom [%]
M3-20	8φ20	φ8/50 cm	C30/37	2,77
M3-22	8φ22	φ8/50 cm	C30/37	3,35
M2-20	10φ20	φ8/50 cm	C30/37	3,46
M2-22	10φ22	φ8/50 cm	C30/37	4,19
M3-25	8φ25	φ8/50 cm	C30/37	4,33

Tablica 2. Svojstva čelične armature

Kategorija armature	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]
Uzdužna armatura (HRB335)	368	552	2,0×10 <sup>5</sup>
Spone (HPB300)	300	420	2,1×10 <sup>5</sup>

HRB - Hot roll ribbed reinforcing steel bar (vruće valjana rebrasta armaturna šipka), HPB - hot roll smooth round reinforcing steel bar (vruće valjana glatka armaturna šipka)

Tablica 3. Sastav betonske mješavine u kg/m<sup>3</sup>

	Cement	Pijesak	Šljunak	Voda	Dodatak	Aditiv
C40	293	674	1053	185	195	3,90
Napomene	Čvrstoća: 42,5 MPa	Modul zrnatosti: 2,8 Gustoća: 2640 kg/m <sup>3</sup>	Veličina zrna: 5~25 mm Gustoća: 2730 kg/m <sup>3</sup>		Zgura iz visoke peći	FN-200 plastifikator

Tablica 4. Mehanička svojstva betona

	Standardna vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]
C40	41,69	3,25×10 <sup>4</sup>

svih stupova korištena je ista mješavina betona. Beton razreda C 30/37 (karakteristična tlačna čvrstoća na uzorku kocke iznosi 40 N/mm<sup>2</sup>) korišten u ovom ispitivanju isporučila je velika betonara koja isporučuje beton stabilne kvalitete, kako je prikazano u tablici 3. Za proizvodnju ispitnih uzoraka, iz iste mješavine betona uzeto je 12 uzoraka kocke (150 mm x 150 mm x 150 mm) koji su nakon toga njegovani u skladu s propisanim uvjetima. Mehanička svojstva betona izmjerena su pomoću odgovarajuće preše (koja je prikazana na slici 2.), a prosječne su vrijednosti iskazane u tablici 4.

Masa malja iznosi 196 kg, a padom malja (prikazanog na slici 5.) povlači se udarno vozilo koje udara u uzorak. Kretanje vozila odgovarajućom brzinom postignuto je podešavanjem visine padnog malja (vidi sliku 6.). Laserskim sustavom za mjerenje brzine izmjerena je brzina udarnog vozila neposredno prije udara u uzorak. Oštećeno područje uzorka definirano je pomoću nemetalnog ultrazvučnog uređaja za ispitivanje betona.



Slika 2. Tlačno ispitivanje uzoraka

### 2.2. Opis pokusa

Eksperimentalno ispitivanje je provedeno primjenom najnaprednijega domaćeg multifunkcionalnog sustava s udarnim maljem koji se pušta s vrlo velike visine. Udarno vozilo kreće se po horizontalnoj tračnici, a sila udara mjeri se pomoću tlačnog senzora koji se nalazi na prednjem dijelu elementa koji podnosi udar. Masa udarnog vozila, prikazanog na slici 3., iznosi 12 kN. Na uzorak je nanesen osni pritisak od 250 kN pomoću tlačne preše. Kao što se vidi na slici 4., osni pritisak nije mijenjan tijekom pokusa.



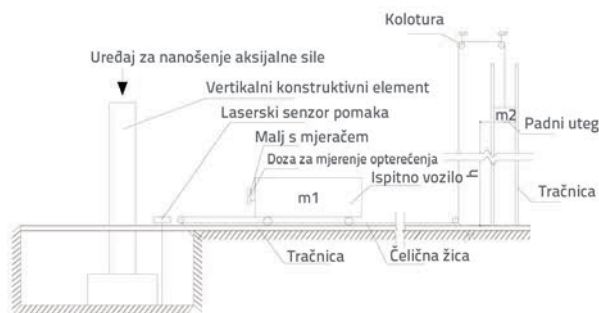
Slika 3. Udarno vozilo



Slika 4. Uzorak na koji se nanosi udar



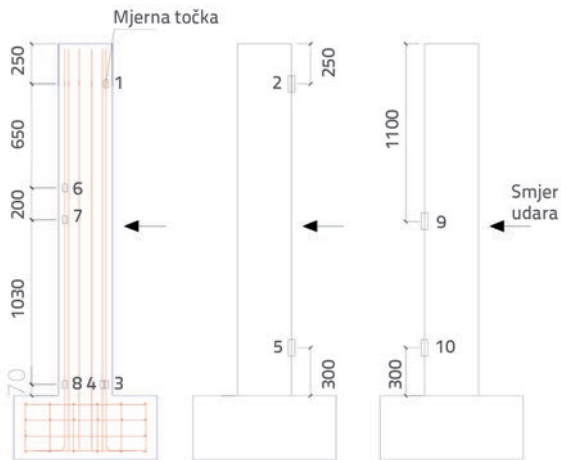
Slika 5. Uređaj s udarnim maljem



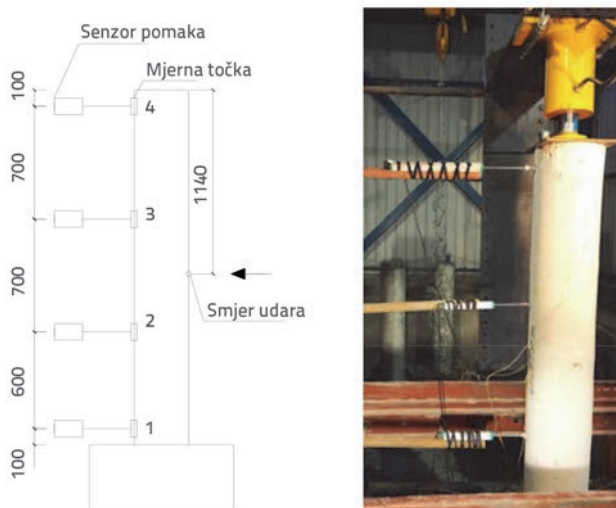
Slika 6. Shematski prikaz sustava za nanošenje udarnog opterećenja



Za ispitivanje provedeno u okviru ovog rada korišteno je ukupno šest uređaja za mjerenje deformacija čelika te četiri uređaja za mjerenje deformacija betona. Za mjerenje deformacije čelika korištene su mjerne točke 1#, 3#, 4#, 6#, 7# i 8#, dok su za mjerenje deformacije betona korištene točke 2#, 5#, 9# i 10# (vidi sliku 7.). Raspored točaka za mjerenje pomaka prikazan je na slici 8.



Slika 7. Točka za mjerenje deformacija, dimenzije u "mm"



Slika 8. Točke za mjerenje pomaka, dimenzije u "mm"

Udarne se sile određuje mjerenjem deformacije na prednjem dijelu uzorka na koji djeluje sila (slika 9.). U ovom su ispitivanju korišteni mjerači deformacija koji se proizvode u tvornici ispitnih uređaja Zhejiang Huangyan. Za mjerenje deformacije betona korišten je uređaj tipa BX120-80AA koji se odlikuje sljedećim karakteristikama: dužina ograde je 80x3 mm, otpor je  $119,9 \pm 0,1 \Omega$ , a koeficijent osjetljivosti je  $2,06 \pm 1 \%$ . Za mjerenje deformacije čelika korišten je uređaj tipa BX120-3AA s dužinom ograde  $3 \times 2 \text{ mm}$ , otporom  $119,9 \pm 0,1 \Omega$ , te koeficijentom osjetljivosti  $2,06 \pm 1 \%$ . U ovom je eksperimentu korišten mjerač pomaka tipa KTC-300 s rasponom mjerenja od 300 mm te s točnošću

od  $300 \pm 0,05 \%$  (slika 10.). Širina pukotina na uzorcima mjerena je pomoću uređaja za mjerenje pukotina FTLF-2 koji je proizvela tvrtka Beijing FeituoXinda Laser Technology Co., Ltd. (slika 11.). Ultrazvučni detektor tipa ZBL-U520 za mjerenje nemetala korišten je za određivanje ukupnog oštećenja na uzorku. Raspon mjerenja tog detektora iznosi  $0 \sim 629000 \mu\text{s}$ , a točnost mu je  $0,05 \mu\text{s}$ . Točke na kojima se provodi mjerenje prikazane su na slici 12. Podaci se prikupljaju pomoću uređaja za prikupljanje podataka proizvedenog u američkoj tvrtki National Instruments. Spomenuti sustav za prikupljanje podataka uglavnom se sastoji od kućišta, regulatora, akceleracijske kartice i brze 16-kanalne kartice za prikupljanje podataka. U sustavu za prikupljanje podataka o deformaciji i pomaku prikupljeni se podaci mogu konvertirati odgovarajućom formulom kako bi se dobili prikladni rezultati (slika 13.).



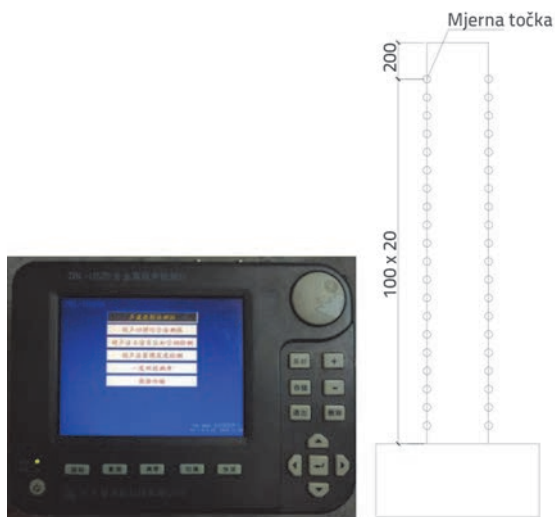
Slika 9. Mjerenje udarne sile



Slika 10. Mjerač deformacije i pomaka



Slika 11. Instrument za mjerenje širine pukotina



Slika 12. Ultrazvučni detektor i mjerna točka



Slika 13. Uređaj za prikupljanje podataka

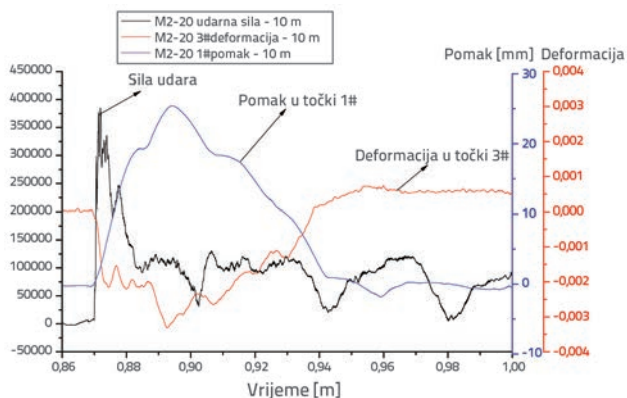
### 2.3. Postupak ispitivanja

Udarni malj podiže se na zahtijevanu razinu postupno, razinu po razinu, a svaki se uzorak ispituje barem pet puta. Drugim riječima, malj se podiže na visine od 2, 4, 6, 8 i 10 m, a sila pada pokreće udarno vozilo koje udara u uzorak. Tijekom svakog udara mjeri se i bilježi brzina udara, sila udara, pomak mjerne točke, deformacija čelika i betona, ultrazvukom definirano oštećenje te razvoj pukotina na uzorku uslijed udara modela malog broda. U ovom se radu uspoređuje i analizira utjecaj koeficijenta armiranja na otpornost stupa mosta na udarno opterećenje pri istim uvjetima nanošenja opterećenja. Utjecaj pukotina u betonu i armature značajan je, naročito nakon opetovanih udara.

### 3. Podaci dobiveni ispitivanjem i njihova analiza

Ispitivanjem stupa mosta na udarno opterećenje izrađena je vremenska krivulja udarne sile, vremenska krivulja pomaka, vremenska krivulja deformacije čelika i betona, te su dobiveni podaci o lokalnim oštećenjima i o nastanku i razvoju pukotina.

Analizom dijagrama izrađenih na temelju ispitivanja uzoraka ustanovljeno je da je sam udar trajao vrlo kratko, a isti je trend zabilježen na zapisima udarne sile, pomaka i deformacije uzorka. Na slici 14. prikazana je sila udara u uzorak M2-20 nakon ispuštanja malja s visine od 10 m, te pomak na vrhu uzorka (mjerna točka 1#) i krivulja deformacije armature (mjerna točka 3#). Kontakt između udarnog vozila i uzorka ostvaren je nakon otprilike 0,87 sekundi, a istovremeno su zabilježeni odziv sile udara, pomak i deformacija. Sila udara naglo je skočila na vršnu vrijednost nakon otprilike 0,87 sekundi. Odmah nakon toga zabilježeno je smanjenje i oscilacija udarne sile, usporedo s postupnim trošenjem udarne energije. Krivulja pomaka i deformacije počela se mijenjati nakon otprilike 0,87 sekundi kada su vrijednosti naglo porasle do vršne vrijednosti, nakon čega je nastupilo postupno smanjenje. Međutim, vrijednosti se nisu vratile na nulu, što potvrđuje postojanje rezidualnih deformacija.



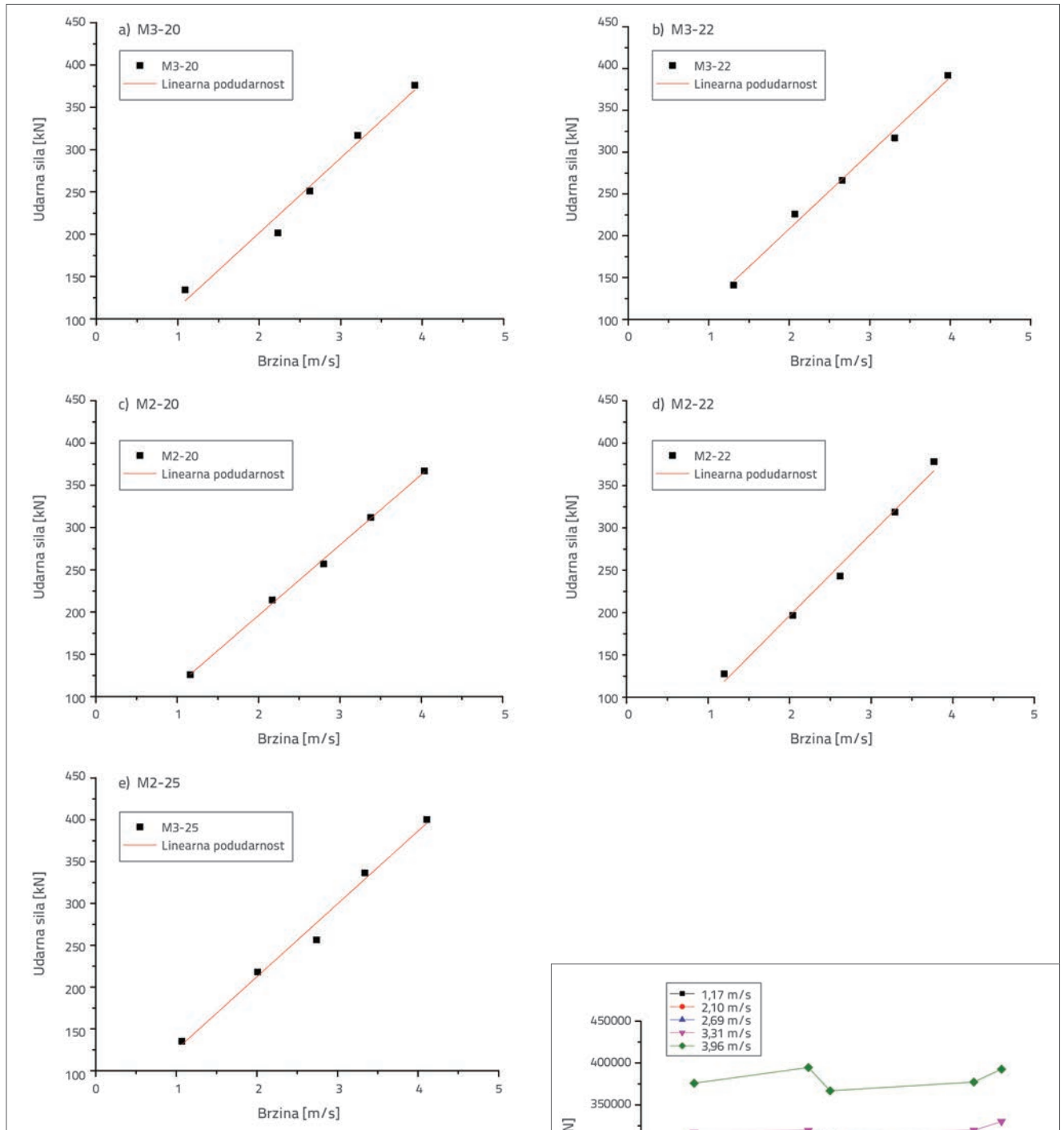
Slika 14. Odziv uzorka betonskog stupa mosta na udarno opterećenje

### 3.1. Analiza odnosa između koeficijenta armiranja i udarne sile

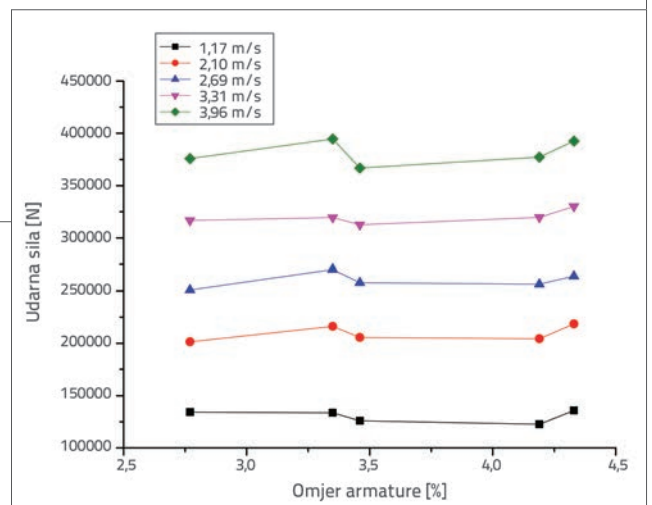
Rezultati dobiveni mjerenjem udarne sile iskazani su u tablici 5. Izmjerena brzina je stvarna brzina izmjerena velocimetrom, a prosječna brzina je prosjek za pet skupina stvarnih brzina.

Udarni malj podiže se na visine prema zadanom protokolu, a svaki se uzorak ispituje barem pet puta. Kako je navedeno u točki 2.3., malj se podiže na visine od 2, 4, 6, 8 i 10 m, a sila pada pokreće udarno vozilo koje udara u uzorak. Za svaku od tih visina određuje se brzina udara i maksimalna sila udara. Zatim se provodi izjednačenje vrijednosti (slika 15.). Ta slika upućuje na postojanje linearne pozitivne uzajamne veze između brzine udara i maksimalne sile udara.

Krivulja odnosa između koeficijenta armiranja i udarne sile temelji se na primarnoj vezi između brzine i udarne sile uzorka. Slika 16. pokazuje isti opći trend varijacije uzorka. Pod istim uvjetima brzine, prosječna promjena udarne sile iznosila je 1,1 %, 8,5 %, 5,2 %, 4,2 % i 4,4 %. Može se uočiti da u uvjetima ovog ispitivanja povećanje koeficijenta armiranja u određenoj mjeri utječe na udarnu silu, ali se opći utjecaj ne može jasno uočiti.



Slika 15. Krivulja izjednačenja za brzinu – udarnu silu



Slika 16. Odnos između koeficijenta armiranja i udarne sile

Tablica 5. Rezultati ispitivanja udarne sile

Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Sila udara [KN]	Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Sila udara [KN]
		Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)					Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)		
M3-20	2	1,17 (1,09)		134,15	M3-22	2	1,17 (1,31)		140,87
	4	2,10 (2,23)		201,38		4	2,10 (2,07)		225,93
	6	2,69 (2,62)		250,97		6	2,69 (2,66)		266,21
	8	3,31 (3,21)		316,69		8	3,31 (3,31)		316,89
	10	3,96 (3,91)		375,98		10	3,96 (3,97)		391,85
M2-20	2	1,17 (1,16)		125,93	M2-22	2	1,17 (1,20)		127,62
	4	2,10 (2,17)		214,15		4	2,10 (2,04)		196,66
	6	2,69 (2,80)		257,08		6	2,69 (2,62)		243,05
	8	3,31 (3,38)		311,99		8	3,31 (3,29)		318,58
	10	3,96 (4,04)		366,95		10	3,96 (3,77)		378,05
M3-25	2	1,17 (1,07)		135,15					
	4	2,10 (2,01)		217,82					
	6	2,69 (2,74)		256,48					
	8	3,31 (3,34)		336,35					
	10	3,96 (4,11)		400,19					

Tablica 6. Rezultati pomaka za mjernu točku 1#

Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Pomak [mm]	Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Pomak [mm]
		Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)					Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)		
M3-20	2	1,17 (1,09)		4,9	M3-22	2	1,17 (1,31)		3,2
	4	2,10 (2,23)		12,3		4	2,10 (2,07)		10,6
	6	2,69 (2,62)		17,1		6	2,69 (2,66)		15,4
	8	3,31 (3,21)		21,5		8	3,31 (3,31)		19,6
	10	3,96 (3,91)		26,7		10	3,96 (3,97)		24,5
M2-20	2	1,17 (1,16)		5,2	M2-22	2	1,17 (1,20)		3,4
	4	2,10 (2,17)		11,2		4	2,10 (2,04)		10,5
	6	2,69 (2,80)		15,2		6	2,69 (2,62)		13,4
	8	3,31 (3,38)		18,7		8	3,31 (3,29)		16,6
	10	3,96 (4,04)		25,4		10	3,96 (3,77)		21,7
M3-25	2	1,17 (1,07)		3,2					
	4	2,10 (2,01)		9,6					
	6	2,69 (2,74)		12,2					
	8	3,31 (3,34)		16,1					
	10	3,96 (4,11)		22,1					



### 3.2. Analiza koeficijenta armiranja i pomaka

Analizom rezultata utvrđeno je da do popuštanja stupa uglavnom dolazi zbog pojave pukotina i loma betona na dnu uzorka, te da je amplituda savijanja stupa niska. Stoga su točke mjerenja pomaka proporcionalne pomaku, a analiza pomaka s većim pomakom (mjerna točka 1#) smatra se reprezentativnim rezultatom. Rezultati mjerenja za pomak u mjernoj točki 1# (pomak na vrhu uzoraka) prikazani su u tablici 6.

Na slici 17. prikazana je krivulja izjednačenja za brzinu udara i pomak uzorka armiranobetonskog stupa. Iz te se slike može vidjeti da se vršna vrijednost pomaka u mjernoj točki 1# povećava s povećanjem brzine udara. Također se može uočiti da je primarni uzajamni odnos tih vrijednosti približno linearan.

Krivulja odnosa između koeficijenta armiranja i pomaka temelji se na primarnoj vezi između brzine i pomaka u mjernoj točki 1# (slika 18.). Može se uočiti da je ukupni trend promjene uzorka otprilike jednak. Smanjenje pomaka u točki 1# iznosilo je 37,3 %, 27,4 %, 26,4 %, 26,5 % i 22,7 %. To nam pokazuje da u uvjetima ovog ispitivanja povećanje koeficijenta armiranja dovodi do stvarnog umanjenja bočnog pomaka stupa u slučaju poprečnog udarnog opterećenja, naročito nakon kumulativnog djelovanja.

### 3.3. Analiza koeficijenta armiranja i deformacije

Mjerna točka 3# smještena je na mjestu gdje dolazi do najvećeg oštećenja stupa uslijed poprečnog udarnog opterećenja. Također je utvrđeno da u točki 3# dolazi do veće deformacije, te da vrijednost deformacije bitno varira od uzorka do uzorka. Na deformaciju u točki 3# utječe koeficijent armiranja pa je ta vrijednost reprezentativna. Rezultati mjerenja deformacije u točki 3# (deformacija armature na dnu udarene površine) prikazani su u tablici 7. Slika 19. prikazuje krivulju izjednačenja za brzinu udara i deformaciju uzorka stupa u točki 3#. Na toj se slici vidi da se vršna vrijednost deformacije u točki 3# povećava s povećanjem brzine udara. Utvrđeno je da je primarna veza između tih vrijednosti približno linearna.

U ovom je radu krivulja omjera armature i deformacije iskazana na temelju primarnog odnosa između brzine udara i deformacije u točki 3# (slika 20.). Može se uočiti da je ukupni trend promjene uzorka otprilike jednak. Smanjenje deformacije u točki 3# iznosilo je 37,3 %, 27,4 %, 26,4 %, 26,5 % i 22,7 %. To nam pokazuje da u uvjetima ovog ispitivanja povećanje koeficijenta armiranja dovodi do stvarnog umanjenja deformacije u dnu stupa u slučaju poprečnog udarnog opterećenja.

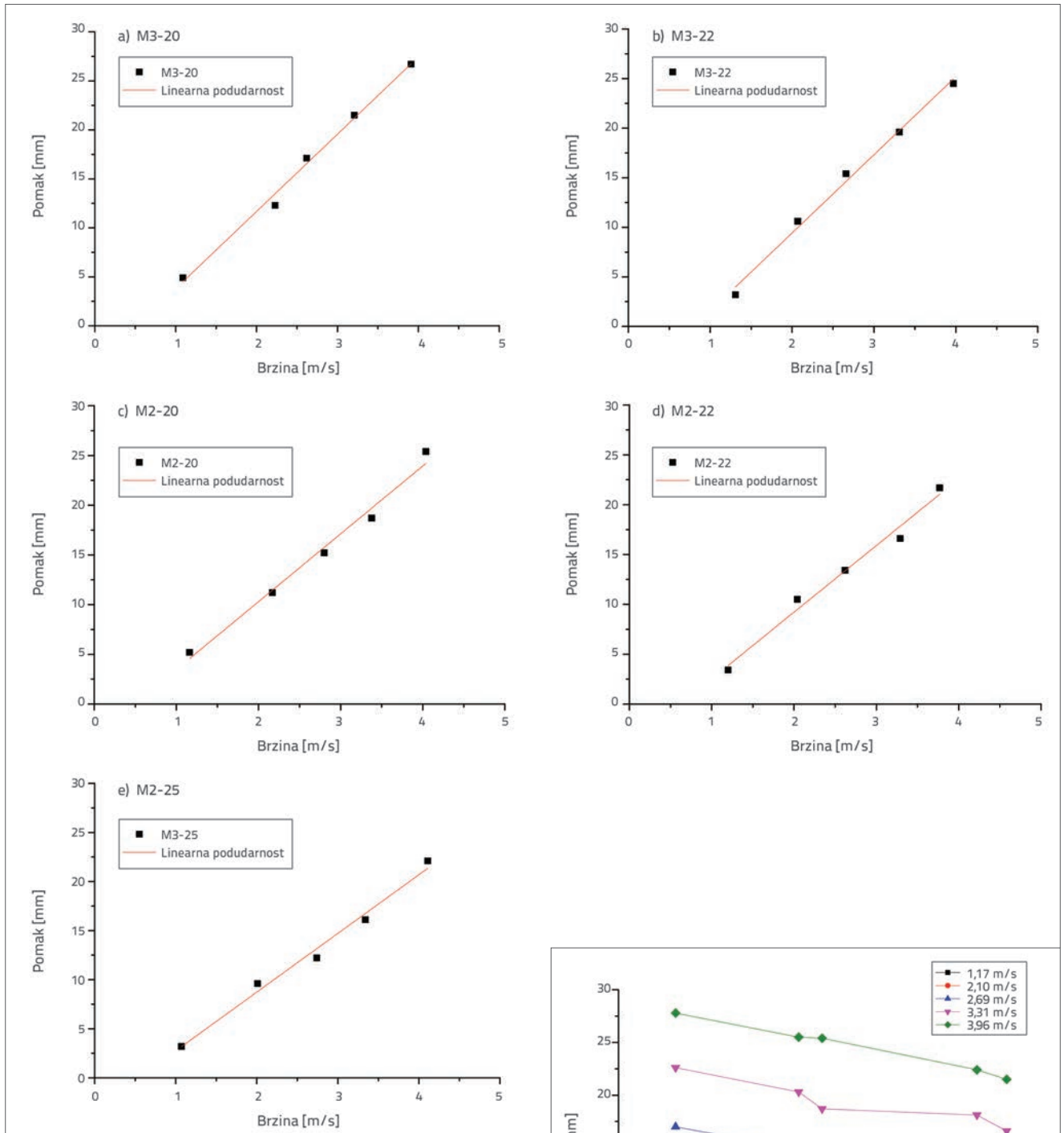
### 3.4. Oštećenje betona

Prema zaključcima iz rada [24], brzina ultrazvučnih valova iskazuje visok stupanj osjetljivosti u vezi s mjerenjem udarnih oštećenja. Stoga je dvadeset mjernih točaka ravnomjerno raspoređeno po visini uzorka, isto kao i po njegovom dnu i središnjim zonama. U svakoj mjernoj točki nacrtana je mreža bočne dužine od 5 cm kako bi se povećala točnost mjerenja. Prije i nakon svakog udara odgovarajućim su uređajem izmjereni zvučni valovi po promjeru, a nakon prolaska kroz svaku od mjernih točaka. Kako bi se ocijenilo ukupno oštećenje uzorka, određena je prosječna vrijednost za dvadeset mjernih točaka (vidi tablicu 8.). U tablici 8. iskazana je promjena akustičnih parametara izmjerenih uređajem za ultrazvučna ispitivanja prije i nakon oštećenja betona za sljedeće visine pada malja: 2, 4, 6 i 8 m. Rezultati pokazuju da se brzina valova postupno smanjuje s povećanjem udarne energije, dok promjena brzine valova postupno raste s porastom udarne energije. Kod pojedinačnih uzoraka, pad brzine valova iznosio je 19,5 %, 17,6 %, 16,4 %, 13,8 % i 9,2 %. To znači da se u uvjetima ovog ispitivanja oštećenje uslijed udarnog opterećenja može smanjiti s povećanjem koeficijenta armiranja.

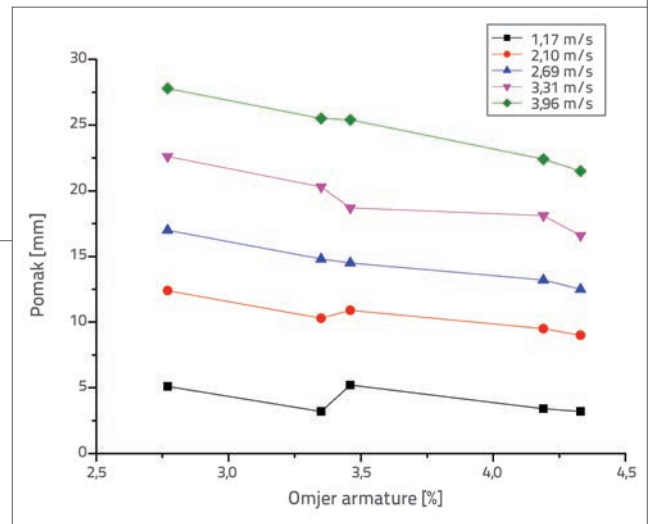
### 3.5. Pukotine na uzorcima

Širenje osnovne pukotine na dnu pogođene površine uzorka prikazano je u tablici 9. za visine malja od 2, 4, 6 i 8 m. Rezultati ispitivanja pokazali su sljedeće: širina osnovne pukotine raste s porastom udarne energije, a smanjuje se s povećanjem koeficijenta armiranja uzdužnom armaturom uzorka. To se događa zato što veći koeficijent armiranja dovodi do poboljšanja udarne otpornosti uzorka. Slika 21. prikazuje povećanje udarnih pukotina na uzorcima pri raznim koeficijentima armiranja te pri istim uvjetima nanošenja udarne energije.

Uočeno je da su se pukotine najprije pojavile u donjem dijelu uzorka. Drugim riječima, s povećanjem udarne energije, u donjem dijelu su se pojavile pukotine koje su se zatim počele širiti prema središnjem dijelu uzorka. U međuvremenu su se pukotine pojavile i počele širiti i u stražnjem dijelu uzorka. Pukotine zabilježene u donjem središnjem dijelu na prednjoj strani uzorka širile su se prema središnjem dijelu uzorka. Istovremeno su se pukotine na stražnjem dijelu nastavile širiti prema gornjem središnjem dijelu uzorka. Kada je udarna energija porasla iznad određene granice, u donjem prednjem dijelu uzorka pojavile su se velike pukotine, dok je istovremeno došlo do dodatnog širenja pukotina na donjem stražnjem dijelu uzorka. Uočeno je i djelomično gnječenje betona, što je dovelo do potpunog otkazivanja stupa. Ustanovljeno je da su se mjesta pojave i širenja pukotina podudarala s mjestima glavnog naprežanja uzorka, pri čemu treba napomenuti da su se pukotine sporije pojavljivale i širile u uzorcima s većim koeficijentom armiranja.



Slika 17. Krivulja izjednačenja za brzinu i pomak



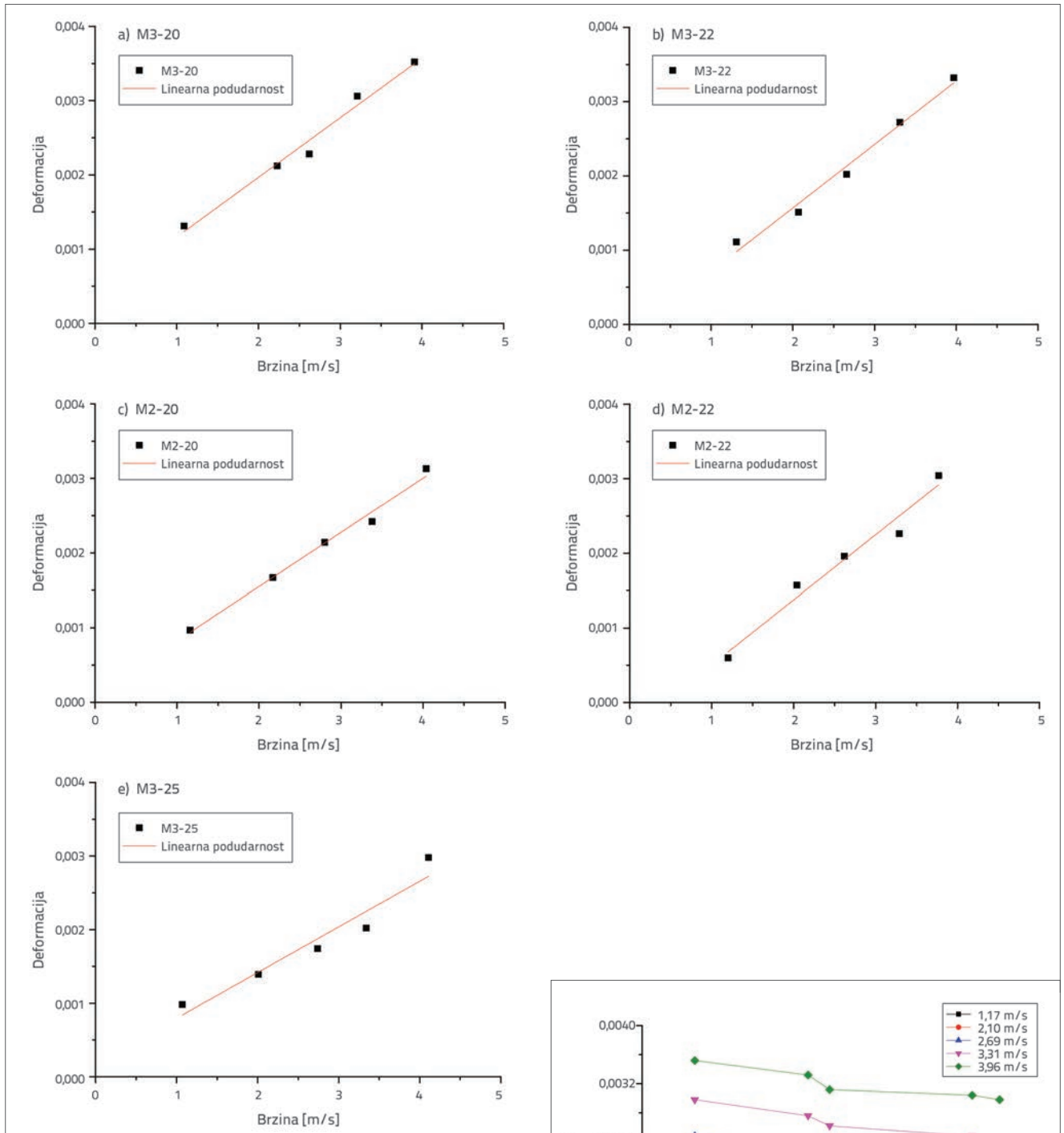
Slika 18. Krivulja koeficijenta armiranja i pomaka u mjernoj točki 1#

Tablica 7. Rezultati dobiveni mjerenjem deformacije u točki 3#

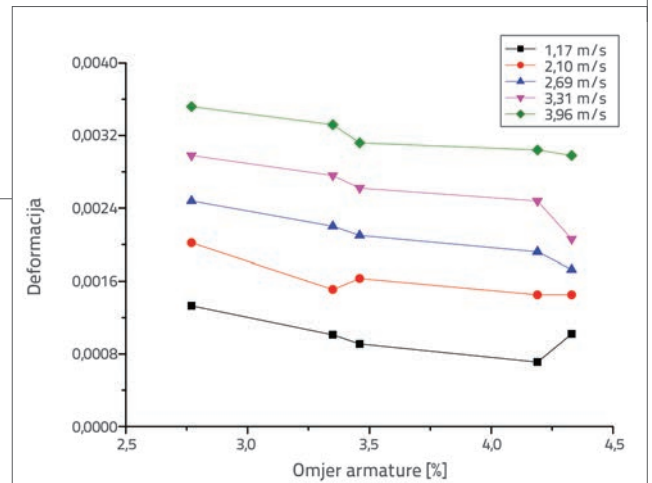
Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Deformacija u točki 3#	Oznaka uzorka	Visina pada [m]	Brzina udara [m/s]		Deformacija u točki 3#
		Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)					Prosječna vrijednost (izmjerena vrijednost)		
M3-20	2	1,17 (1,09)		0,00131	M3-22	2	1,17 (1,31)		0,00111
	4	2,10 (2,23)		0,00212		4	2,10 (2,07)		0,00151
	6	2,69 (2,62)		0,00228		6	2,69 (2,66)		0,00202
	8	3,31 (3,21)		0,00306		8	3,31 (3,31)		0,00272
	10	3,96 (3,91)		0,00352		10	3,96 (3,97)		0,00332
M2-20	2	1,17 (1,16)		0,00097	M2-22	2	1,17 (1,20)		0,00060
	4	2,10 (2,17)		0,00167		4	2,10 (2,04)		0,00157
	6	2,69 (2,80)		0,00214		6	2,69 (2,62)		0,00196
	8	3,31 (3,38)		0,00242		8	3,31 (3,29)		0,00226
	10	3,96 (4,04)		0,00313		10	3,96 (3,77)		0,00304
M3-25	2	1,17 (1,07)		0,00098					
	4	2,10 (2,01)		0,00139					
	6	2,69 (2,74)		0,00174					
	8	3,31 (3,34)		0,00202					
	10	3,96 (4,11)		0,00298					

Tablica 8. Promjena akustičnih parametara nakon oštećenja betona

Oznaka uzorka	Visina pada	Prosječna brzina [km/s]		Količina promjene [km/s]	Brzina promjene [%]
		Prije udara	Nakon udara		
M3-20	2	4,301	4,220	-0,081	-19,5
	4	4,220	4,091	-0,129	
	6	4,091	3,780	-0,311	
	8	3,780	3,464	-0,316	
M3-22	2	4,325	4,252	-0,073	-17,6
	4	4,252	4,131	-0,121	
	6	4,131	3,854	-0,277	
	8	3,854	3,565	-0,289	
M2-20	2	4,346	4,278	-0,068	-16,4
	4	4,278	4,170	-0,108	
	6	4,170	3,906	-0,264	
	8	3,906	3,634	-0,272	
M2-22	2	4,523	4,478	-0,045	-13,8
	4	4,478	4,385	-0,093	
	6	4,385	4,204	-0,181	
	8	4,204	3,901	-0,303	
M3-25	2	4,624	4,579	-0,045	-9,2
	4	4,579	4,481	-0,098	
	6	4,484	4,372	-0,112	
	8	4,372	4,197	-0,175	



Slika 19. Krivulja izjednačenja za brzinu i deformaciju



Slika 20. Krivulja koeficijenta armiranja i deformacije u mjernoj točki 3#

Tablica 9. Širenje pukotina pri različitim udarnim energijama

Oznaka uzorka	Osnovna širina pukotine za svaku visinu malja			
	2 [m]	4 [m]	6 [m]	8 [m]
M3-20	0,040	0,050	0,060	0,231
M3-22	0	0,030	0,060	0,140
M2-20	0	0,030	0,040	0,090
M2-22	0	0	0,030	0,040
M3-25	0	0	0,010	0,020

Oznaka uzorka	Prednja strana – donji dio	Prednja strana – sredina	Stražnja strana – donji dio	Stražnja strana - sredina
M3-20				
M3-22				
M3-25				
M2-20				
M2-22				

Slika 21. Razvoj širenja pukotina



## 5. Zaključak

U radu je proveden veći broj eksperimentalnih analiza kako bi se proučio utjecaj bočnog udara na pet armiranobetonskih uzoraka stupova s različitim koeficijentima armiranja uzdužnom armaturom. Nakon analize udarnih sila, pomaka, deformacija, oštećenja betona, te pojave i razvoja pukotina na jednako opterećenim uzorcima s različitim koeficijentima armiranja, izvedeni su sljedeći zaključci:

1. Na svim je uzorcima zabilježen podudaran trend promjene pri istoj udarnoj energiji, što potvrđuju vremenske krivulje udarne sile, vremenske krivulje pomaka na vrhu i vremenske krivulje deformacije armature na dnu opterećene površine uzorka, za razne koeficijente armiranja. Osim toga, uočeno je da se vrijeme udara smanjuje usporedo s povećanjem koeficijenta armiranja.
2. Ustanovljeno je da je odnos između vršne vrijednosti udarne sile i brzine udara približno linearan. Koeficijent armiranja uzdužnom armaturom povećavao se u granicama od 2,77 do 4,33 %, dok je povećanje udarne sile variralo od 1,1 % do 8,5 %. Ti rezultati potvrđuju da koeficijent armiranja u određenoj mjeri utječe na udarnu silu. Međutim, taj utjecaj ipak nije jasno definiran.
3. Ustanovljeno je da je odnos između vršne vrijednosti pomaka na vrhu uzorka i brzine udara približno linearan. Koeficijenti armiranja povećavani su u rasponu od 2,77 do 4,33 %, a smanjenje pomaka na vrhu uzorka variralo je od 22,7 % do 37,3 %. Ti rezultati pokazuju da povećanje koeficijenta armiranja može dovesti do značajnog smanjenja vršnih vrijednosti pomaka na vrhu.
4. Ustanovljeno je da je odnos između vršne vrijednosti deformacije armature na dnu udarne površine i

brzine udara približno linearan. Koeficijenti armiranja povećavani su u rasponu od 2,77 do 4,33 %, a smanjenje deformacije armature na dnu pogođene površine variralo je od 22,7 % do 37,3 %. Ti rezultati pokazuju da povećanje koeficijenta armiranja dovodi do značajnog smanjenja vršne vrijednosti deformacije armature na dnu udarom pogođene površine.

5. Ustanovljeno je da se koeficijent armiranja uzorka povećava u granicama od 2,77 do 4,33 %. Smanjenje brzine zvuka na uzorku variralo je od 9,2 % do 19,5 %, što upućuje na značajno smanjenje oštećenja betona. Nadalje, pod istim uvjetima udara, povećanje koeficijenta armiranja dovodi do sporije pojave i širenja pukotina, te do pojave manjih pukotina.
6. Konačno se može zaključiti da se bočni pomaci, deformacije armature i oštećenja stupova pod poprečnim udarnim opterećenjem donekle smanjuju s povećanjem koeficijenta armiranja, tj. da se tako povećava otpornost stupova na udarno opterećenje. Takav je utjecaj još očitiji u slučaju pojave pukotina u betonu. Kako bi se smanjio intenzitet udarom uzrokovanih nesreća, potrebno je povećati koeficijent armiranja u stupovima koliko god je to ekonomski opravdano, i to naročito u donjem dijelu stupova.

## Zahvale

Za istraživanje opisano u ovom radu dobivena je potpora projekta (u okviru prirodnih znanosti) Odjela za obrazovanje Provincije Guangdong (2014KZDXM064), potpora za inovativne projekte u području znanosti i tehnologije Odjela za obrazovanje Provincije Guangdong (2013KJCX0188), te podrška Centra za tehnološka istraživanja u graditeljstvu Provincije Guangdong.

## LITERATURA

- [1] Guoyu, C.: The anti-collision of bridge piers in the middle reaches of the Yangtze River, *Navigational Technology Trends*, 3 (1995), pp. 14 -18.
- [2] Tongyu, D., Wu, N.: An Overview of Ship-Bridge Collision Accidents, 1008 - 3383 (2003) 02-0001-03.
- [3] Yu, F., Xingguo, W., Yumin, Z., Youpo, S.: An experimental study on the influences of reinforcement ratios on the lateral impact resistance of concrete columns, *Industrial Construction*, 41 (2011) 11, pp. 85 - 88.
- [4] Tingquan, L., Xingguo, W., Nan, G.: A study of the failure modes of reinforced concrete columns under lateral impacts, *Journal of the Wuhan University of Technology*, No. 09, 2010.
- [5] Ruikun, Z.: A dynamic response analysis of reinforced concrete columns under lateral impacts, Hebei Polytechnic University, 2010.
- [6] Thilakarathna, H.M.I., Thambiratnam, D.P., Dhanasekar, M., Perera, N.: Numerical simulation of axially concrete columns under transverse impact and vulnerability assessment, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010) 11, pp. 1100-1112, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003>
- [7] Yuan, G.: A model test and numerical study of the horizontal impacts of reinforced concrete piers, South China University of Technology, 2014.
- [8] Sha, Y., Hao, H.: Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single bridge pier, *Engineering Structures*, 41 (2012) 3, pp. 63-76, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.026>
- [9] Sha, Y., Hao, H.: Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers, *Engineering Structures*, 46 (2013) 1, pp. 593-605, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.002>
- [10] Linfeng, X., Wenliang, L.: A discussion of a calculation method for pier impact forces, *Science and Technology Innovation Herald*, 3 (2013), pp. 110.
- [11] Hongxuan, T.: A calculation method for pier impact forces and its applicatio, *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Version)*, 2 (2008), pp. 110 - 111.

- [12] Jianguo, N., Fenghua, Z., Zhihua, W., Tianbao, M.: The constitutive relationship, failure mechanism, and numerical method of reinforced concrete under strong impact loads, *Scientia Sinica: Technologica*, 46 (2016) 4, pp. 323 - 331.
- [13] Nan, G., Xingguo, W., Youpo, S.: A study of the failure modes of reinforced concrete columns under impact loads, *Architecture*, 26 (2010) 3, pp. 42 - 46.
- [14] Remennikov, A.M., Kaewunruen, S.: Impact resistance of reinforced concrete columns: experimental studies and design considerations, 19<sup>th</sup> Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Christchurch, New Zealand, pp. 817-824, 2006.
- [15] Consolazio, G.R., Cowan, D.R.: Nonlinear analysis of barge crush behaviour and its relationship to impact resistant bridge design, *Computers & Structures*, 81 (2003) 8-11, pp. 547-557, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00474-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00474-1)
- [16] Louw, J.M.: RC cantilever columns under lateral impact load: an experimental investigation, *Structures under Shock and Impact II*, pp. 308-319, 1992.
- [17] Fan, W., Yuan, W.C.: Shock spectrum analysis method for dynamic demand of bridge structures subjected to barge collisions [M], Pergamon Press, Inc. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.10.015>
- [18] Ohnuma, H., Ito, C., Nomachi, S.G.: Dynamic response and local rupture of reinforced concrete beam and slab under impact loading. *Mechanics in Reactor Technology*, pp. 179-184, 1985
- [19] li, T., Cong, Z., Hao, W., Xinhua, F.: Dynamic response and failure modes of RC columns under impact, *Engineering Mechanics*, 30 (2013) 2, pp. 150-155.
- [20] Junjie, W., Cheng, C.: A simulation study of the damages to piers undergoing ship impacts, *Engineering Mechanics*, 7 (2007), pp. 156 - 160.
- [21] Gücüyen, E., Tuğrul E., Kantar, E.: Experimental Study on Pipe Sections against Impact Loading, *TEM Journal*, 7 (2018) 1, pp. 97-104.
- [22] Özgür, A., Tuğrul, E., Kantar, E.: Improving the impact behaviour of pipes using geofom layer for protection, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp.132-133, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.05.007>
- [23] Erdem, R.T., Gücüyen, E., Kantar, E.: Impact effect on different sized reinforced concrete specimens, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 22 (2015), pp. 597-603.
- [24] Yubin, T., Tao, H., Jia, L., Ruoxi, J., Chunwei, Z.: Damage detection and compressive behaviour of concrete after impacting, *Journal of Building Structures*, 35 (2014) S1, pp. 58 - 64.