

Primljen / Received: 8.1.2020.

Ispravljen / Corrected: 31.8.2020.

Prihvaćen / Accepted: 20.10.2020.

Dostupno online / Available online: 10.2.2021.

# Eksperimentalno i numeričko istraživanje čeličnih profila pri udarnom opterećenju

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Engin Gücüyen**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Celal Bayar, Turska  
Odjel za građevinarstvo  
[engin.gucuyen@cbu.edu.tr](mailto:engin.gucuyen@cbu.edu.tr)



Doc.dr.sc. **Erkan Kantar**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska  
Odjel za građevinarstvo  
[erkan.kantar@cbu.edu.tr](mailto:erkan.kantar@cbu.edu.tr)



Izv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska  
Odjel za građevinarstvo  
[tugrul.erdem@cbu.edu.tr](mailto:tugrul.erdem@cbu.edu.tr)

Autor za korespondenciju



**M. Berker Alicioğlu**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska  
Odjel za građevinarstvo  
[151291001@ogr.cbu.edu.tr](mailto:151291001@ogr.cbu.edu.tr)

Prethodno priopćenje

**Engin Gücüyen, Erkan Kantar, R. Tuğrul Erdem, M. Berker Alicioğlu**

## Eksperimentalno i numeričko istraživanje čeličnih profila pri udarnom opterećenju

U radu se analizira eksperimentalno i numeričko ponašanje čeličnih ispitnih uzoraka s različitim vrstama priključaka. U tu svrhu korišten je uređaj s padajućim utegom. Kako bi se primijenila ista količina udarne energije na ispitne uzorke, masa i visina udarnog utega uzete su kao konstante. Eksperimentalnim istraživanjem dobivene su vrijednosti ubrzanja, pomaka, udarnog opterećenja, broja ispusta i trajanja pada. Tijekom ispitivanja pratilo se i širenje oštećenja na ispitnim uzorcima. Provedena je i numerička analiza ponašanja uzoraka uslijed udarnog opterećenja pomoću računalnog programa Abaqus te je napravljena usporedba rezultata.

### Ključne riječi:

utjecaj udara, numerička analiza, čelični materijal, sustav za ispitivanje

Research Paper

**Engin Gücüyen, Erkan Kantar, R. Tuğrul Erdem, M. Berker Alicioğlu**

## Experimental and Numerical Investigation of Steel Sections under Impact Effect

Experimental and numerical behaviour of steel test specimens with various types of joints is investigated in this study. A drop weight test setup with necessary test equipment is used for this purpose. The mass and drop height of the hammer is taken to be constant so that the same impact energy can be applied on test specimens. The acceleration, displacement, impact load, drop numbers and drop durations, are obtained through experimental study. In addition, development of damage to test specimens is observed during tests. Numerical analyses of behaviour of test specimens under impact load are also conducted to verify test results using the Abaqus software, and a comparison of results is made.

### Key words:

Impact effect, numerical analysis, steel material, test setup

Vorherige Mitteilung

**Engin Gücüyen, Erkan Kantar, R. Tuğrul Erdem, M. Berker Alicioğlu**

## Experimentelle und numerische Untersuchung von Stahlprofilen unter Stoßbelastung

Die Arbeit analysiert das experimentelle und numerische Verhalten von Stahlprüfkörpern mit verschiedenen Verbindungsarten. Zu diesem Zweck wurde ein Fallgewichtsgerät verwendet. Um die gleiche Menge an Aufprallenergie auf die Probekörper aufzubringen, wurden Masse und Höhe des Aufprallgewichts als Konstanten genommen. Die Werte für Beschleunigung, Verschiebung, Stoßbelastung, Anzahl der Entladungen und Falldauer wurden durch experimentelle Untersuchungen erhalten. Die Ausbreitung von Schäden an den Probekörpern wurde ebenfalls während des Tests überwacht. Mithilfe des Computerprogramms Abaqus wurde eine numerische Analyse des Verhaltens der Probekörper aufgrund der Stoßbelastung durchgeführt und ein Vergleich der Ergebnisse abgeschlossen.

### Schlüsselwörter:

Stoßauswirkung, numerische Analyse, Stahlwerkstoff, Prüfsystem

## 1. Uvod

Svojstva konstrukcijskog čelika proizlaze iz njegovog sastava i postupka proizvodnje. Konstrukcijski čelik primjenjuje se u gotovo svim industrijama. Zbog svojih homogenih i izotropnih svojstava, profili konstrukcijskog čelika koriste se u konstrukcijama višekatnica, mostova, pješačkih prijelaza i skladišta. S obzirom na veliku čvrstoću i modul elastičnosti čelika, težina čeličnih konstrukcija je mala u usporedbi s armiranobetonskim zgradama. Stoga se veliki rasponi mogu premostiti manjim profilima u odnosu na druge vrste tradicionalnih materijala. Kao posljedica toga postiže se lakša i ekonomičnija konstrukcija koja zahtijeva jeftiniju vrstu temeljenja. Čelični materijal najrecikliraniji je materijal na svijetu [1]. Prilikom same proizvodnje čeličnih konstrukcijskih elemenata u tvorničkim uvjetima ne postoje nikakve popogreške. Rastavljanje čeličnih elemenata je brzo i ne utječe na materijalna svojstva. Čelične konstrukcije oblikovane su tako da su u stanju podnijeti potrese većeg intenziteta zbog duktilnosti čeličnog materijala koji omogućuje plastičnu deformaciju bez pojave loma. Čelični priključci konstrukcijski su elementi koji se koriste kako bi se spojili dijelovi konstrukcije. Postoje različite vrste priključaka u praksi. Ipak, u području konstrukcijskog inženjerstva najčešće se koriste priključci u zavarenoj ili vijčanoj izvedbi. Ti priključci omogućavaju i prijenos opterećenja. Stoga je važno odabrati ispravnu metodu u postupku dimenzioniranja. Elementi konstrukcije pod utjecajem su raznih opterećenja tijekom svoje uporabljivosti. Statička opterećenja ne mijenjaju se s vremenom. S druge pak strane, dinamička opterećenja mijenjaju veličinu, položaj ili smjer. Udarne opterećenje značajna je vrsta dinamičkog opterećenja čiji intenzitet može biti veći nego kod drugih vrsta opterećenja. Ipak, u literaturi ne postoji mnogo istraživanja o učinku udara na elemente konstrukcije. Iako se istražuje učinak vjetrova i potresnog opterećenja, istraživači uglavnom izbjegavaju proučavanje učinka udara zbog složene i skupe provedbe ispitivanja. Oblikovanje konstrukcijskih elemenata pod učinkom udara postaje posljednjih godina sve popularnije s obzirom na moguće rizike povezane sa slučajnim ili prirodnim oštećenjima poput prometnih nesreća, eksplozija, odrona stijena, potresa, jakih vjetrova i udara projektila [2-8]. Sustav ispitivanja korištenjem uređaja s padajućim utegom najčešći je postupak kojim se ispituje ponašanje elemenata konstrukcije izloženih udarnom opterećenju male brzine. Istraživači su iz tog razloga razvili različite vrste sustava za ispitivanja s mjernim uređajima. Informacije vezane uz ograničenja udarnih ispitivanja nalaze se u normi ASTM E 23 [9]. Na taj način, uzimajući u obzir pravila iz norme, istraživači su u stanju poboljšati sustave za ispitivanje. Autori su eksperimentalno ispitali ponašanje osam čeličnih uzoraka izloženih djelovanju dviju razina udarne energije [10]. U ovom istraživanju četiri su čelična uzorka

dobivena za četiri različite vrste priključaka te su ispitana pod djelovanjem udarnog opterećenja. Vrijednosti mase udarnog utega i visine utega uzete su kao konstante tijekom eksperimentalnog istraživanja. Masa čeličnog utega je 14 kg, a uteg se ispušta s visine od 1500 mm kako bi se udarno opterećenje primijenilo na testirane uzorke. To znači da se primjenjuje konstantna udarna energija ( $14 \times 9,81 \times 1,5 = 206 \text{ J}$ ) na uzorke. Eksperimentalno ispitivanje uzoraka nastavlja se sve dok se ne postigne otkazivanje pri kojem dolazi do maksimalnog pomaka na uzorcima, a vijci se u području spajanja odvajaju. Akcelerometar, LVDT osjetilo, senzor za mjerenje sile, uređaj za bilježenje podataka, te optička fotoosjetila koriste se kako bi se mjerile vrijednosti tijekom ispitivanja. Uz eksperimentalno ispitivanje provode se i inkrementalne dinamičke analize metodom konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus da bi se verificirali rezultati ispitivanja [11]. Vrijednosti ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja ispitanih uzoraka određeni su nakon provedbe analiza. Te su vrijednosti usporedno dane u grafičkim prikazima u kojima se vidi odnos ubrzanja i vremena, pomaka i vremena, udarnog opterećenja i vremena te opterećenja i pomaka. Osim toga, računalnim simulacijama dobiva se raspodjela naprezanja kod ispitanih uzoraka. Smatra se da će eksperimentalni, kao i numerički rezultati ispitanih uzoraka znatno pridonijeti stručnim i znanstvenim radovima.

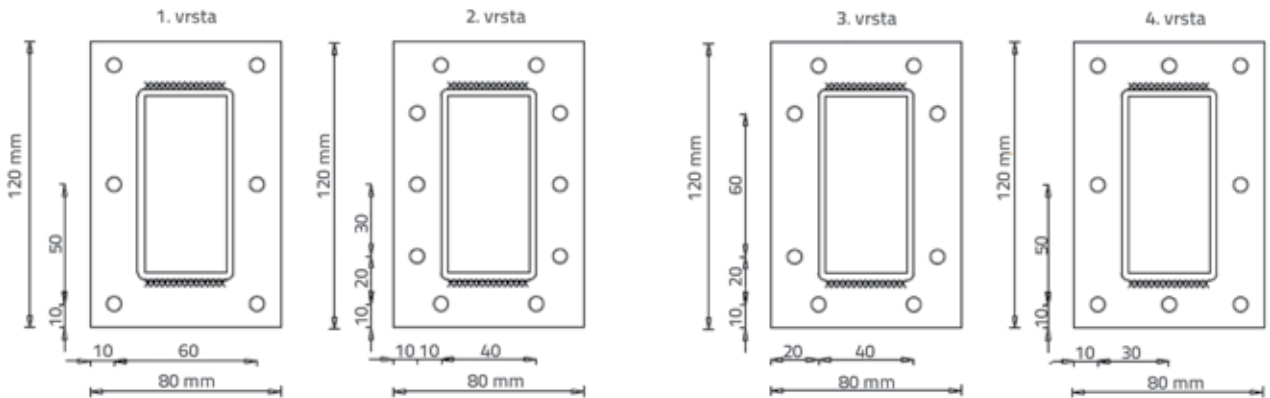
## 2. Eksperimentalno istraživanje

### 2.1. Ispitni uzorci i materijali

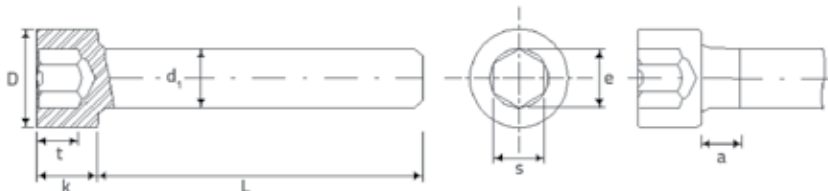
Eksperimentalni dio ovog istraživanja uključuje četiri ispitna uzorka proizvedena u radionici. Vrste priključaka varijable su ispitnih uzoraka. Različite vrste priključaka kod ispitnih uzoraka korištene su s razlogom jer se u fazi proizvodnje u području spajanja mogu javiti pogreške u vezi sa zavarivanjem na čeonim pločama. Detalji takvih priključaka prikazani su na slici 1.

Čelični pravokutni profili dimenzija su 40 x 80 x 3 mm. Uz to, dvije čeone ploče dimenzija 80 x 120 x 4 mm koriste se u području priključka tih profila. Gornja i donja pojasnica profila zavaruju se na čeone ploče postupkom elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom plina pri čemu se koristi žica debljine 3 mm. Glave vijaka prikazane na slici 2. koriste se za međusobno spajanje čeonih ploča. Cilj je istražiti uzorke koji imaju određene pogreške u području spajanja pri udarnom opterećenju.

Ispitni uzorci su duljine 1000 mm. Slika 3. prikazuje udaljenosti od mjesta spajanja na ispitnim uzorcima. U proizvodnji čeličnih profila i ploča korišten je čelik klase S235JR čija vrijednost gustoće iznosi  $7850 \text{ kg/m}^3$ , nominalne granice popuštanja 235 MPa, vlačne čvrstoće 360 MPa i izduženja 25 %.



Slika 1. Vrste priključaka



Slika 2. Detalji vijaka



Slika 3. Duljina ispitnih uzoraka

Mjesta spajanja na ispitnim uzorcima obojana su žutom bojom kako bi se bolje uočila oštećenja. Detalji mjesta spajanja prikazani su na slici 4.



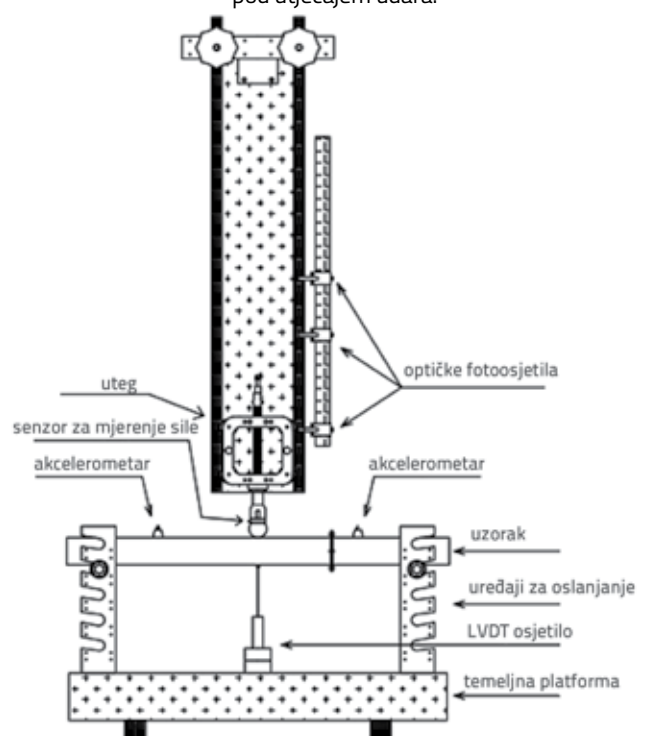
Slika 4. Detalji ispitnih uzoraka

## 2.2. Sustav za ispitivanje i oprema

Za uređaje s padajućim utegom istraživači razvijaju sustave za ispitivanja, pri čemu se ona temelje na slobodnom padu utega s različitih visina [12-17]. Ispitivanje s uređajem s padajućim utegom široko je rasprostranjeno u udarnim istraživanjima u kojima se za ispitivanje elemenata primjenjuje udarno opterećenje. Istraživanja pokazuju da je sustav za ispitivanje

s uređajem s padajućim utegom, ali i potrebnim mjernim uređajima, najbolji način određivanja udarne otpornosti uzoraka koji se ispituju.

U ovom istraživanju udarno se opterećenje primijenilo na ispitne uzorke kroz sustav za ispitivanje čiji su detalji prikazani na slici 5. [18]. Prilikom provedbe ispitivanja koristila se potrebna ispitna oprema kao što su akcelrometar, LVDT osjetilo, senzor za mjerenje sile, uređaj za bilježenje podataka te optička fotoosjetila. Sustav za ispitivanje posebno je oblikovan kako bi se odredilo ponašanje različitih materijala ili konstrukcijskih elemenata pod utjecajem udara.



Slika 5. Shema sustava za ispitivanje

Takav sustav za ispitivanje dopušta da se utezi različitih masa ispuštaju s najveće visine od 2500 mm. Na taj način potencijalna energija pretvara se u kinetičku u trenutku udara. Kod takvog sustava za ispitivanje podne su platforme izvedene od čeličnih ploča visoke čvrstoće, a dimenzije su im 1000 x 1000 x 200 mm.



Slika 6. Ispitni uzorak i oprema

U fazi rada sustava za ispitivanje udarno se opterećenje primjenjuje pomoću čeličnog utega koji pada s određene visine na ispitni uzorak. Na taj se način za vrijeme eksperimentalnog istraživanja promatra udarna otpornost u području spoja. Elementi u obliku kotača izvedeni od kastermida koriste se za pozicioniranje utega unutar sustava za ispitivanje. Kako bi se spriječili horizontalni i vertikalni pomaci na mjestima oslanjanja, u eksperimentalnom istraživanju upotrebljavaju se čelični potporni elementi dimenzija 100 x 430 mm. Vrijednosti ubrzanja mjere se dvama akcelerometrima koji se simetrično smještaju na udaljenosti 250 mm od mjesta udara opterećenja. Piezoelektrični akcelerometri tipa ICP pričvršćeni su na ispitne uzorke pomoću mjedenih uređaja s mehaničkim sidrom. Drugi je zadatak

akcelerometara mjerenje vibracija. Odabrani akcelerometri ne gube kvalitetu signala tijekom udarnih ispitivanja. Radna je temperatura između  $-18$  i  $+66$  °C, a rasponje mjerenja akcelerometara  $\pm 4905$  m/s<sup>2</sup>. Linearno promjenjivi diferencijalni transformator (LVDT osjetilo) smješten je ispod srednjeg dijela ispitnog uzorka kako bi mjerio vrijednosti pomaka za svako ispuštanje čeličnog utega. Raspon mjerenja LVDT-a je 50 mm pri temperaturama između  $-18$  i  $+66$  °C. Udarno opterećenje izazvano čeličnim utegom mjeri se ICP dinamičkom dozom tijekom udarnog ispitivanja. Senzor za mjerenje sile smješta se na rubne dijelove čeličnog utega i pomiče se s utegom duž visine ispuštanja. Veliki signali u kratkim razdobljima mogu se odrediti senzorom za mjerenje sile. Raspon mjerenja senzora za mjerenje sile iznosi do 88.96 kN pri radnim temperaturama između  $-54$  i  $+121$  °C. Budući da se udarno opterećenje primjenjuje na ispitne uzorke, poseban se uređaj za bilježenje podataka služi kako bi se prenijele mjerne vrijednosti s mjernih uređaja u kratkom vremenu. Uređaj za bilježenje podataka ima dinamički mjerni raspon 138 dB, kapacitet uzorkovanja od 16 kHz, adc rezoluciju od 24 bita i koristi napajanje 12 vdc pri temperaturi između  $-20$  i  $+50$  °C. Naposljetku, uporabom računalnog programa rezultati ispitivanja pretvoreni su u grafički prikaz ubrzanje-vrijeme, pomak-vrijeme, udarno opterećenje-vrijeme te u grafički prikaz udarne sile i pomaka. Optička fotoosjetila koriste se kako bi se odredio broj ispuštanja i trajanje pada tijekom ispitivanja. Trajanje pada se mjeri u milisekundama. Vrijednosti su prikazane na elektroničkom ekranu sustava za ispitivanje za svako ispuštanje čeličnog utega. Ispitani uzorak i oprema potrebna u sklopu sustava za ispitivanje prikazani su na slici 6.

### 3. Rezultati ispitivanja

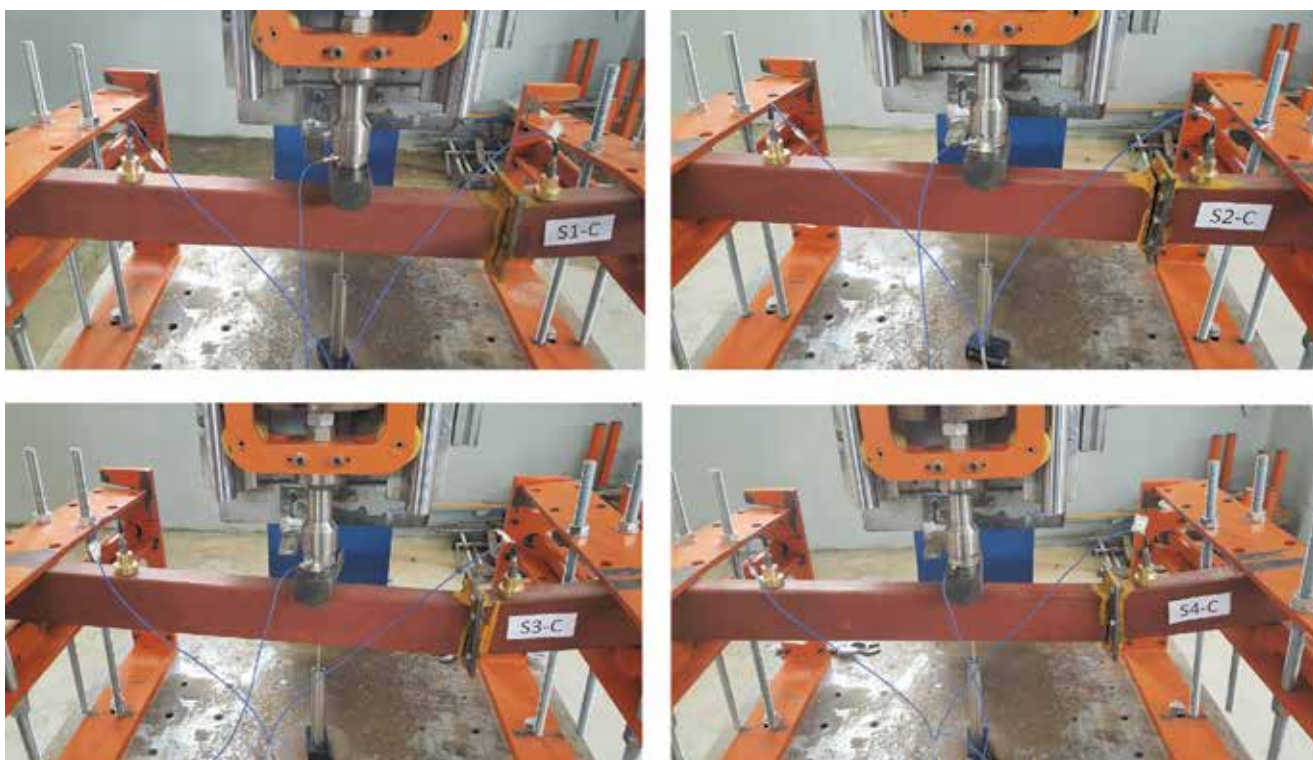
U ovom dijelu istraživanja završene su pripreme za ispitivanje, pa se provodi udarno ispitivanje uzoraka. Posebna je pozornost usmjerana na to da masa i visina ispuštanja utega ostanu u okviru granica mjernih uređaja. Tijekom udarnog ispitivanja masa utega iznosi 14 kg, a visina ispuštanja je 1500 mm. Svaki uzorak stavlja se u sustav za ispitivanje s potrebnom ispitnom opremom. Nakon toga, osiguravaju se ležajni uvjeti uporabom čeličnih osloničkih elemenata. Svi ispitni uzorci prikazani su na slici 7. prije primjene udarne sile.

Tijekom eksperimentalnog istraživanja proučava se razvoj oštećenja na ispitnim uzorcima. Na ispitne uzorke nanosi se udarna sila sve dok se ne dosegne oštećenje pri slomu na način da su postignuti maksimalni pomaci na srednjem dijelu uzorka. Nakon što nastupi oštećenje pri slomu, ne mogu se provesti značajna mjerenja na ispitnim uzorcima zbog toga što su vijci odvojeni od spojenih dijelova uzoraka. Slika 8. prikazuje oštećene uzorke.

Optička fotoosjetila koriste se kako bi se odredio broj ispuštanja i trajanje svakog pada čeličnog utega. Vrijednosti su prikazane na elektroničkom ekranu sustava za ispitivanje. Trajanje pada slično je za svaki uzorak jer je na sve uzorke nanosena konstantna udarna energija. Smatra se da je glavni uzrok manjih



Slika 7. Ispitni uzorci u sustavu za ispitivanje



Slika 8. Oštećenja pri slomu ispitnih uzoraka

razlika u trajanju pada upravo utjecaj trenja tijekom pada utega. S druge pak strane, brojevi ispuštanja pri slomu razlikuju se zbog različitih vrsta priključaka. Vrijednosti su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Ukupan broj ispuštanja utega

Ispitni uzorci	Ukupan broj ispuštanja	Vrijeme pada [msec]
S1-C	7	613
S2-C	10	617
S3-C	7	611
S4-C	8	620



Slika 9. Ispitni uzorci nakon udarnog ispitivanja

Vrijednosti najmanjega i najvećega ubrzanja, najvećega pomaka i najvećega udarnog opterećenja određene su mjernim

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati

Oznaka uzorka	Ubrzanje [ $m/s^2$ ]				Pomak [mm]		Udarno opterećenje [kN]	
	Prvo ispuštanje utega		Ispuštanje pri slomu		Prvo ispuštanje utega	Ispuštanje pri slomu	Prvo ispuštanje utega	Ispuštanje pri slomu
S1-C	-1763,81	2017,38	-1065,83	1319,42	6,72	18,63	17,53	9,41
S2-C	-2249,66	2518,75	-1478,46	1385,97	5,89	15,75	19,92	10,27
S3-C	-2114,52	1827,46	-1292,68	1234,51	6,64	18,61	17,79	9,55
S4-C	-2336,74	2168,35	-1259,81	1426,33	6,21	16,84	18,86	9,86

uređajima za svako ispuštanje čeličnog utega. Nakon odskoka čeličnog utega pri svakom ispuštanju, uključuje se mehanizam zaključavanja sustava za ispitivanje i sprječava se drugi udar.

U tablici 2. prikazani su rezultati kod prvog ispuštanja i ispuštanja pri slomu. Na taj se način dobivaju razlike između mjerenih vrijednosti za neoštećene uzorke kao i za oštećene uzorke pri slomu.

Najveći kapaciteti energije ispitnih uzoraka određeni su računanjem površine ispod krivulje udarne sile kao što je prikazano u tablici 3. Te se krivulje dobivaju tako što su uzete u obzir vrijednosti udarne sile i pomaka ispitnih uzoraka, a to je usporedno prikazano u poglavlju 4.

Tablica 3. Maksimalna energija testiranih uzoraka

Oznaka uzorka	Kapacitet energije [J]
S1-C	23,74
S2-C	26,83
S3-C	22,26
S4-C	24,35

Udarno ispitivanje uzoraka završeno je nakon što je uočeno oštećenje pri slomu za svaki uzorak. Raspored vijaka u priključcima ima utjecaj na oštećenje pri slomu kod ispitnih uzoraka. Vijci se odvajaju od područja spajanja prije no što nastupi njihovo veće razdvajanje. Na slici 9. prikazani su svi ispitni uzorci uklonjeni iz sustava za ispitivanje, te su na njima prikazana oštećenja u područjima spajanja.

#### 4. Numerička analiza

Numerička analiza u sklopu ovog istraživanja podrazumijeva uporabu programskog paketa Abaqus za analizu konačnih elemenata, a s ciljem da se odredi ponašanje ispitnih uzoraka pri udarnom opterećenju male brzine. U potrazi za numeričkim rješenjima [19-24], Abaqus je široko rasprostranjen među istraživačima zbog toga što omogućava različite vrste materijalnih modela te uspješno dovršava različite analize. U analizama se primjenjuje eksplicitni modul programa koji nudi točne rezultate pri dinamičkim utjecajima. Prvi korak u programskom paketu formiranje je numeričkog

Tablica 4. Usporedba vrijednosti ubrzanja i pomaka

Oznaka uzorka	Ubrzanje [m/s <sup>2</sup> ]						Pomak [mm]		
	Ispitivanje		Analiza		Ispitivanje / Analiza		Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje / Analiza
S1-C	-1763,81	2017,38	-2149,36	2198,27	0,82	0,92	6,52	6,08	1,07
S2-C	-2249,66	2518,75	-2417,65	2696,15	0,93	0,93	5,89	5,26	1,12
S3-C	-2114,52	1827,46	-2249,52	2058,33	0,92	0,89	6,91	6,01	1,15
S4-C	-2336,74	2168,35	-2231,48	2362,83	1,05	0,92	6,21	5,68	1,09
Srednja vrijednost:					0,93	0,91	Srednja vrijednost:		1,11

Tablica 5. Usporedba vrijednosti udarnog opterećenja i energije

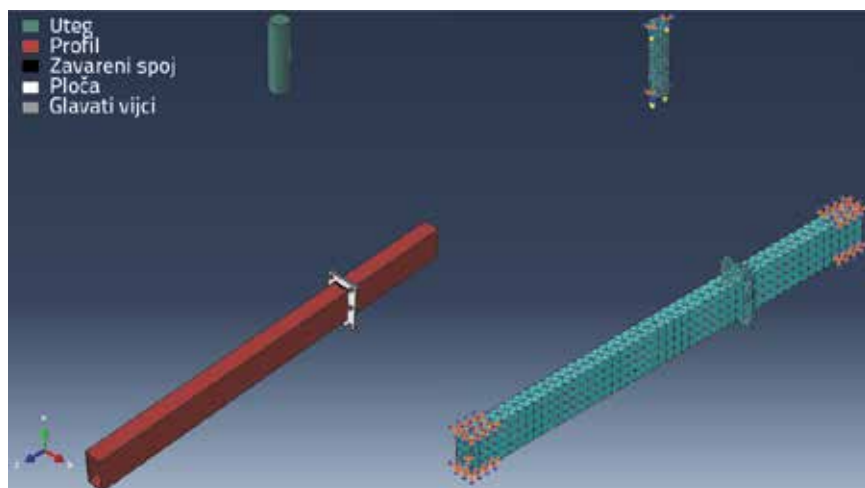
Oznaka uzorka	Udarno opterećenje [kN]			Kapacitet energije [J]		
	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje / Analiza	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje / Analiza
S1-C	17,79	20,82	0,85	23,74	21,43	1,11
S2-C	19,92	22,73	0,88	26,83	24,52	1,09
S3-C	17,53	20,94	0,84	22,26	21,78	1,02
S4-C	18,86	21,66	0,87	24,35	23,26	1,05
Srednja vrijednost:			0,86	Srednja vrijednost:		1,07

trodimenzionalnog modela sustava za ispitivanje te uzoraka uz pomoć konačnih elemenata. S obzirom na to, svi modeli koriste element C3D10M (modificirani tetraedar 10 čvorova) koji je pogodan za simulaciju udarnih problema. Nakon toga, definiraju se ležajni uvjeti ispitnih uzoraka uzimajući u obzir rubne uvjete u horizontalnim, vertikalnim i osnim smjerovima.

Zbog ispitivanja slobodnim padom, osim gravitacijske sile, ne postoji nijedna vanjska sila koja se primjenjuje na čelični uteg. Osim toga, u programu je dopušteno samo vertikalno kretanje utega. Uzima se jednaka visina ispuštanja i masa čeličnog utega kao i u eksperimentalnom istraživanju. S obzirom na vrijeme trajanja analize, koristi se linearni elastični model materijala kako bi se definirali vijci, ploče i

profili. Geometrija modela dijeli se na manje dijelove kako bi se postigli točniji rezultati. Odluka o veličini konačnog elementa značajan je parametar koji izravno utječe na rezultate analize. Iz tog razloga provodi se analiza konvergencije mreže za različite veličine elemenata kako bi se postigla najprikladnija veličina konačnog elementa. Na temelju usporedne analize te analize osjetljivosti rezultata za veličine između 10 i 30 mm, određuje se veličina konačnog elementa od 15 mm uzimajući u obzir vrijeme, kao i usporedbu rezultata ispitivanja i analize. Model s konačnim elementima S1-C uzorka prikazan je na slici 10.

Drugi važni parametri numeričke analize su određivanje prirasta vremena i vremenskih koraka. Prirast vremena i vremenski koraci definirani su od početka do kraja kretanja čeličnog utega. Budući da je priroda problema dinamički prirast, primjenjuje se kraći vremenski intervali kako bi se postigli ispravni rezultati. Stoga je odabran prirast vremena od  $2 \times 10^{-8}$  sekundi za 5000 vremenskih koraka kad postoji kontakt između utega i ispitnog uzorka. Numeričke analize ponavljaju se za vrijednosti prirasta vremena i vremenske korake sve dok ne dostignu konačne vrijednosti. Druga je stvar simulacija kontaktnih površina u programu. Koristi se svojstvo interakcije kako bi se osigurala veza između geometrija u kontaktu. Kontakt između površina odabire se za površine čeličnog



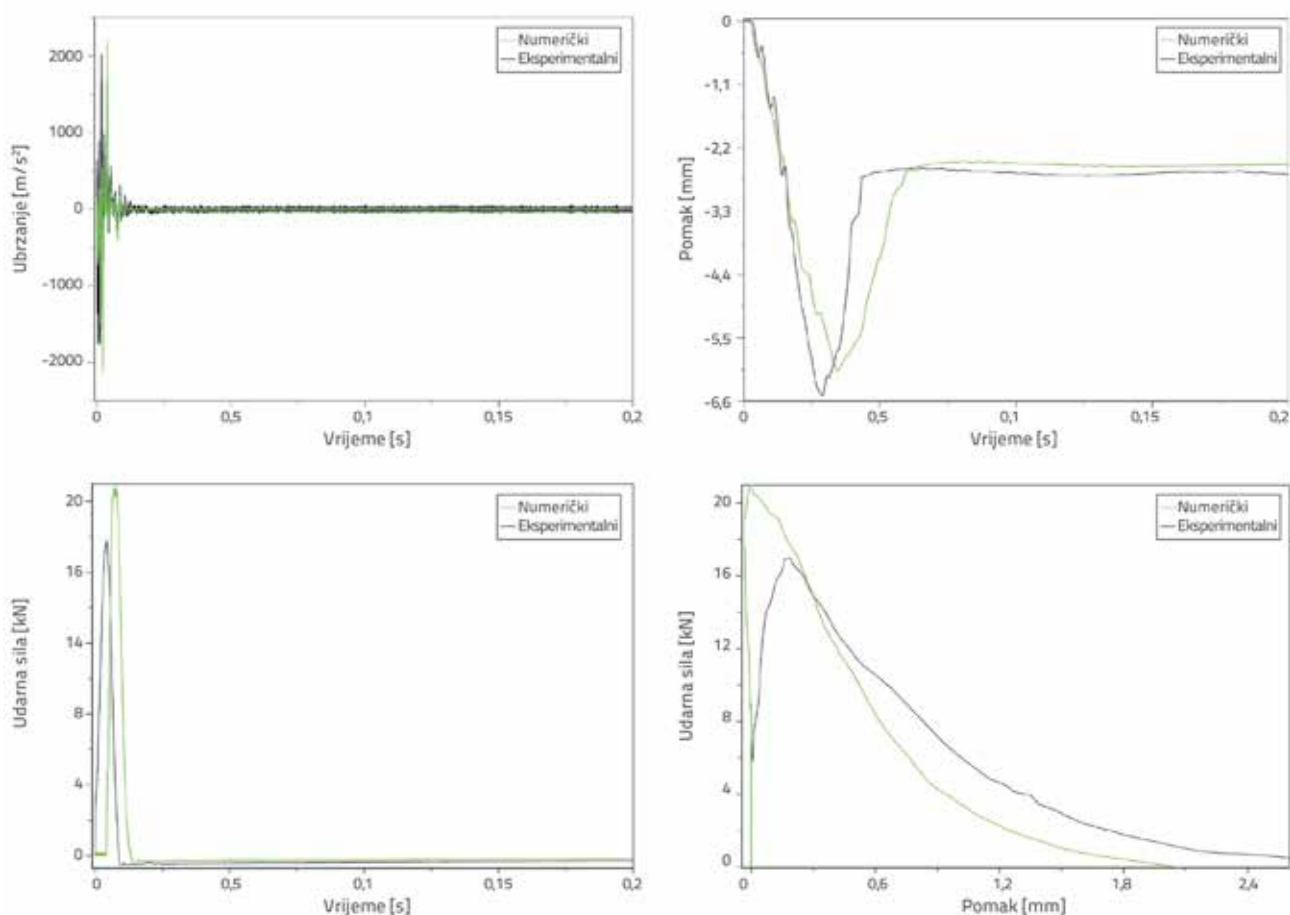
Slika 10. Model s konačnim elementima S1-C

utega i ispitnog uzorka. Površina utega koji nanosi udarno opterećenje na uzorak odabire se kao glavna. Odgovarajući dio ispitnog uzorka odabire se kao podređeni u analizi. Stoga nije dopušteno da površine koje su definirane takvim odnosom prodiru jedna u drugu. Interakcija se odvija kroz kontaktne površine u analizi. Svojstvo kontakta površine na površinu koristi se između kontaktnih površina. Osim toga, interakcija kontaktnih površina u programu definirana je tangencijalnim ponašanjem. S druge pak strane, povratno kretanje utega s uzorka modelirano je kontaktnim ponašanjem normalno na kontaktnu površinu.

U analizi je uzet koeficijent trenja od 0,02 jer nije moguće ukloniti utjecaj trenja tijekom eksperimentalnog ispitivanja. Kako bi se potvrdili rezultati ispitivanja, provode se analize dinamičkog prirasta za prvo ispuštanje čeličnog utega, i to uporabom računala visokih performansi kako bi se

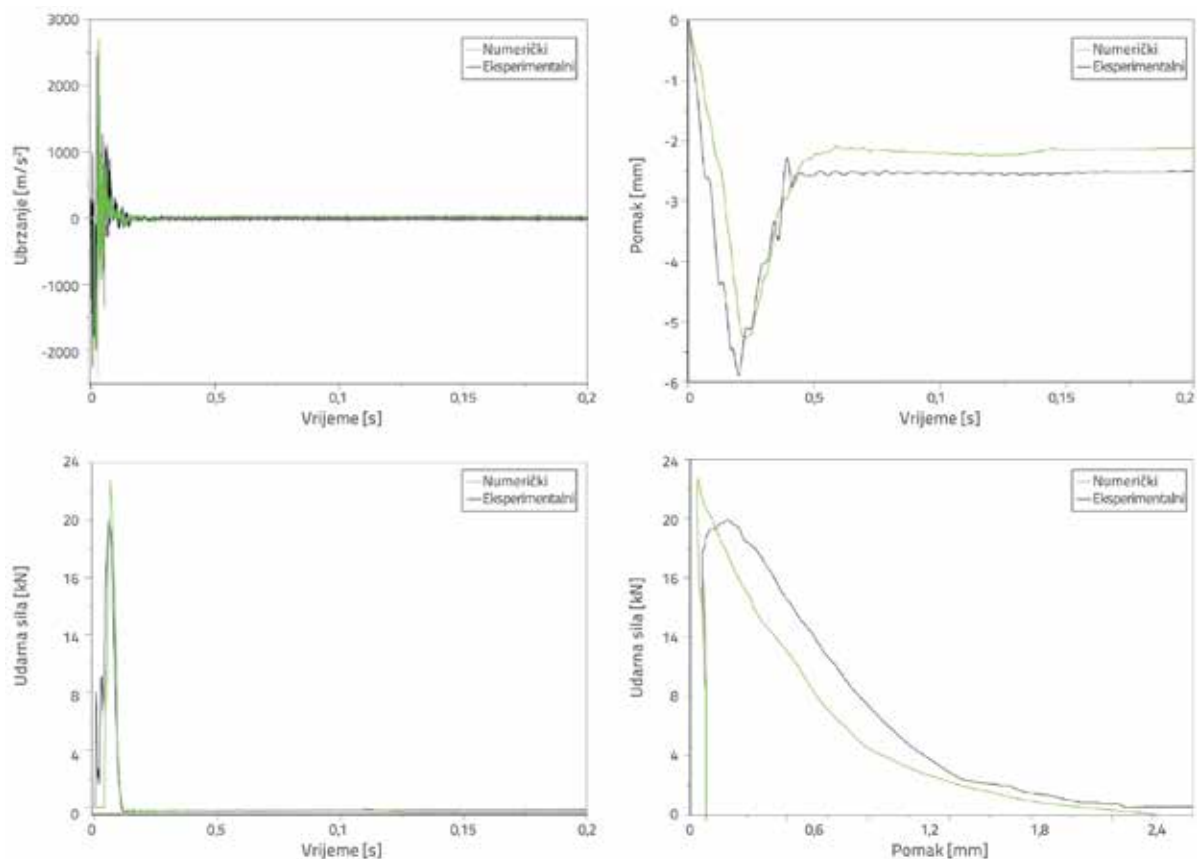
brzo postigli što točniji rezultati. U sljedećim tablicama usporedno su prikazane prosječne vrijednosti ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja za svaki ispitni uzorak. Određeni su grafički prikazi koji pokazuju odnos ubrzanja i vremena, pomaka i vremena te udarnog opterećenja i vremena. Štoviše, grafički prikazi koji pokazuju odnos udarnog opterećenja i pomaka određeni su za isti vremenski interval kako bi postigli vrijednosti energije kapaciteta kao i kod ispitnih uzoraka. Grafički prikazi za sve ispitne uzorke nalaze se na slikama 11. do 14.

Raspodjela ekvivalentnih Von-Misesovih naprezanja na uzorcima postignuta je u trenutku kad je udarno opterećenje preneseno na uzorke. Raspodjele naprezanja paralelne su s razvojem oštećenja ispitnih uzoraka u eksperimentalnom programu. Slika 15. prikazuje raspodjele naprezanja za sve ispitne uzorke.

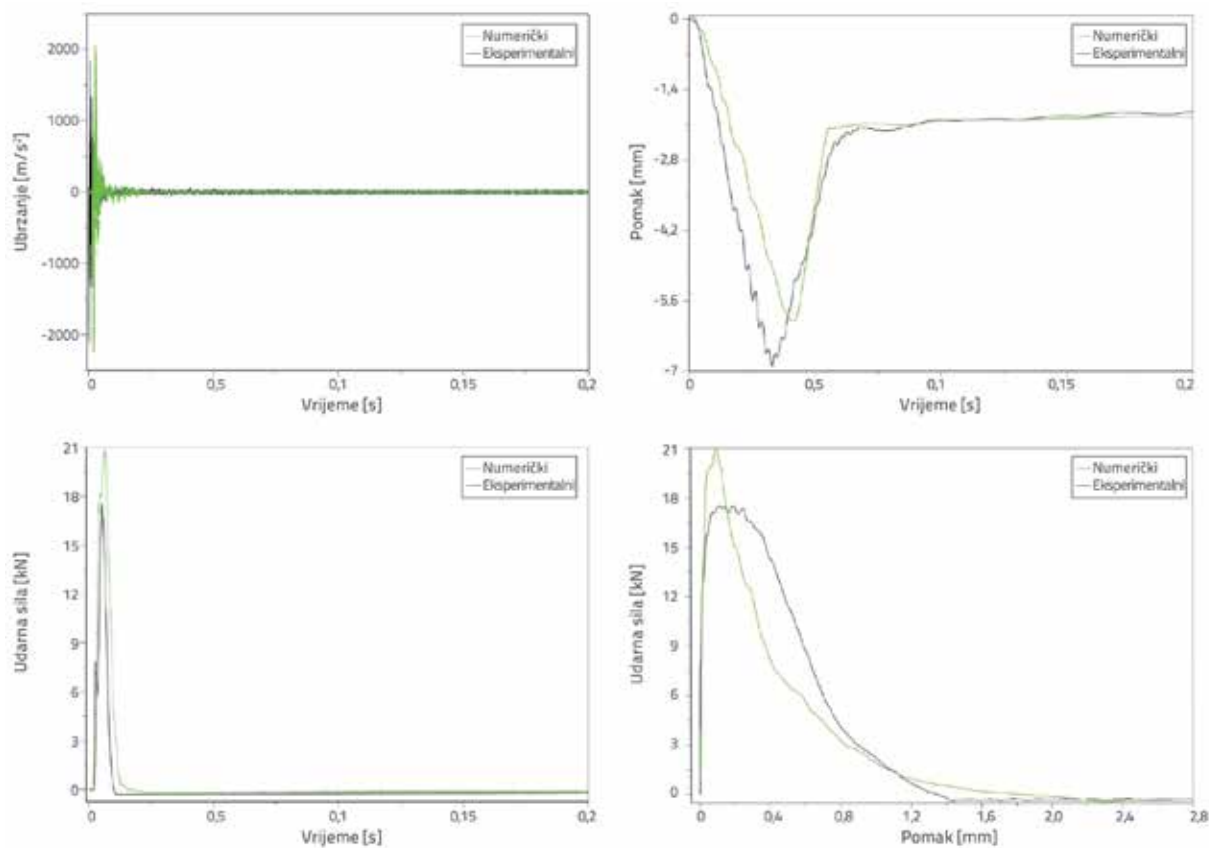


Slika 11. Rezultati ispitivanja za uzorak S1-C

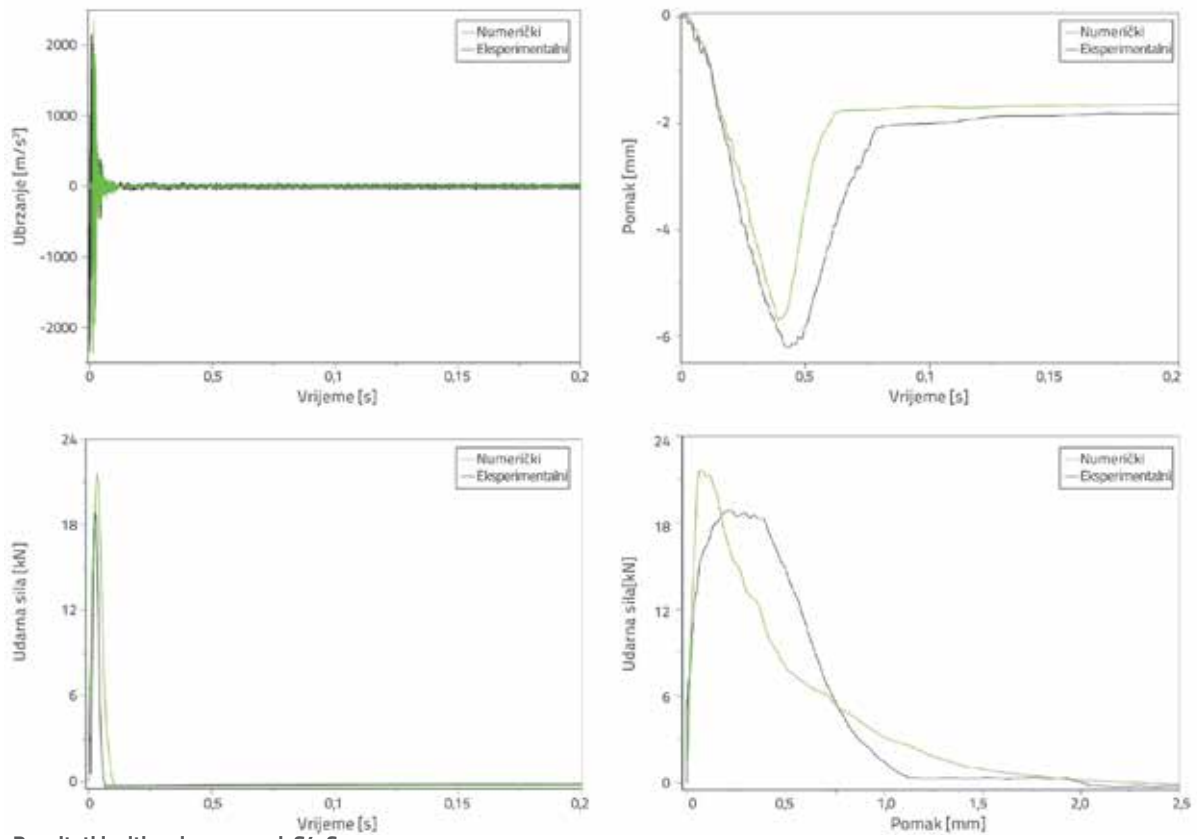




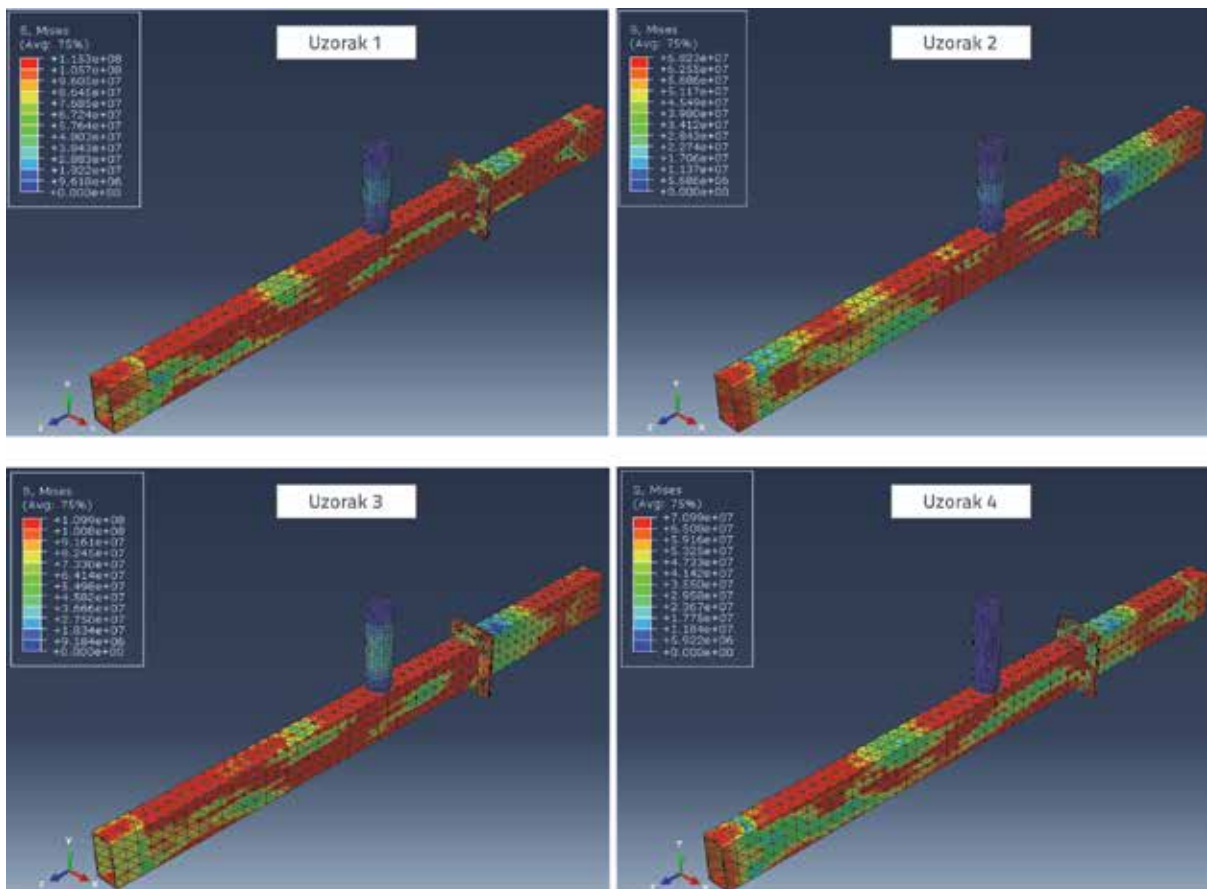
Slika 12. Rezultati ispitivanja za uzorak S2-C



Slika 13. Rezultati ispitivanja za uzorak S3-C



Slika 14. Rezultati ispitivanja za uzorak S4-C



Slika 15. Raspodjela ekvivalentnih Von-Misesovih naprezanja (naprezanja su iskazana u N/mm<sup>2</sup>)

## 5. Zaključak

Konstruktivski čelik sve se više koristi kao materijal u konstrukcijama zbog dostignuća u tehnologiji i znanosti o materijalima. Međutim, vrlo je važno dimenzionirati konstrukcijske elemente koji bi bili otporni na različite uvjete opterećenja. U tu svrhu istraživači su razvili sustave za ispitivanje s ciljem da istraže konstrukcijske elemente pod različitim opterećenjima. Budući daje utjecaj udarnog opterećenja najmanje poznat, najčešće se i ne uzima u obzir u fazi dimenzioniranja konstrukcije. Udarne ispitivanja na konstrukcijskim elementima temelje se na nekoliko mjernih uređaja. U posljednje vrijeme istraživači jednako tako razvijaju sustave za ispitivanje kako bi odredili ponašanje uzoraka pri udaru. U ovom istraživanju se za početak se čelični uzorci s različitim vrstama priključaka ispituju pod udarnim opterećenjem. Vrijednosti mase i visine ispuštanja čeličnog utega uzimaju se kao konstante kako bi se nanijela ista količina energije na ispitne uzorke. Pri određivanju ponašanja ispitnih uzoraka upotrebljava se nekoliko mjernih uređaja kao što su akcelerometar, LVDT osjetilo, optička fotoosjetila te uređaj za bilježenje podataka. Udarne ispitivanje uzoraka nastavlja se dok se ne uoči oštećenje pri slomu. U nastavku se navode ključni rezultati u sklopu ovog istraživanja.

Vrijednosti ubrzanja mjere se akcelerometrima u dvije simetričke točke za svako ispuštanje čeličnog utega. Uočeno je da, što se ispitni uzorak više bliži oštećenju pri slomu, vrijednosti ubrzanja se smanjuju. Osim toga, na vrijednosti utječe i krutost ispitnih uzoraka koja ovisi o vrsti korištenog priključka. Najveće vrijednosti ubrzanja postižu se za ispitni uzorak S2-C za čije spajanje je korišteno deset vijaka s glavom.

Pomaci se određuju pomoću LVDT osjetila koje se nalazi ispod srednjeg dijela uzorka. Najveće vrijednosti pomaka izmjerene su za ispuštanje čeličnog utega kada dolazi do sloma.

Pri proučavanju priključaka, vrijednosti najvećeg pomaka postignute su za ispitne uzorke tipa S1-C i S3-C koji su oblikovani

sa šest vijaka raspoređenih jedan blizu drugoga. S druge strane, nakon eksperimentalnog i numeričkog istraživanja, vrijednost najmanjeg pomaka postignuta je za S2-C uzorak.

Udarne opterećenje mjeri se dinamičkim senzorom za mjerenje sile koji se nalazi na rubnim dijelovima utega. Pri prvom ispuštanju utega postignute su najveće vrijednosti, dok su najmanje vrijednosti određene za ispuštanje čeličnog utega kada dolazi do sloma. Krivulje koje prikazuju odnos opterećenja i pomaka formirane su uzimajući u obzir vrijednosti udarne sile i pomaka za isti vremenski interval. Stoga se kapacitet energije računa prema površini ispod krivulje sila-pomak. Uočeno je da se maksimalni kapacitet energije dobiva za uzorak S2-C.

Kako bi se potvrdili rezultati ispitivanja, provedene su numeričke analize za svaki uzorak. Eksplisitni modul programskog paketa Abaqus za analizu konačnih elementa koristi se u svrhu provedbe analize dinamičkog prirasta. Uspoređuju se rezultati ispitivanja i analize za prvo ispuštanje utega. Izračunane su prosječne vrijednosti za omjer rezultata dobivenih ispitivanjem i analizom. Osim toga, određuje se raspodjela naprezanja za ispitne uzorke. Kao što je i očekivano, vrijednosti najvećega naprezanja događaju se oko točke udara. Uspostavlja se dobra korelacija između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, iako postoje manje pogreške u vrijednostima ubrzanja, pomaka, udarne sile i kapaciteta energije. Smatra se da bi mogući razlozi za to mogli biti uvjeti oslanjanja u eksperimentalnom programu i odstupanja koja se pojavljuju između uvjeta u kojima se provode eksperimentalna ispitivanja i numeričke analize. Naposljetku, istraživanje se dodatno može poboljšati primjenom različitih razina udarne energije na ispitne uzorke.

## Zahvale

Ispitne uzorke i uređaje u ovom istraživanju financirali su Scientific Research Project Coordination Unit Sveučilišta Manisa Celal Bayar.

## LITERATURA

- [1] Singh, R.K., Murty, H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K.: Development of composite sustainability performance index for steel industry, *Ecological Indicators*, 7 (2007) 3, pp 565-588.
- [2] Kyei, C., Braimah, A.: Effects of transverse reinforcement spacing on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading, *Engineering Structures*, 142 (2017), pp. 148-164.
- [3] Remennikov, A.M., Kong, S.Y., Uy, B.: Response of foam- and concrete-filled square steel tubes under low-velocity impact loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25 (2011) 5, pp. 373-381.
- [4] Al-Zubaidy, H., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L.: Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads, *Composite Structures*, 94 (2012) 2, pp. 510-518.
- [5] Yilmaz, T., Kırac, N., Anil, Ö., Erdem, R.T., Kaçaran, G.: Experimental investigation of impact behaviour of rc slab with different reinforcement ratios, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24 (2020) 1, pp. 241-254.
- [6] Yousuf, M., Uy, B., Tao, Z., Remennikov, A., Liew, J.Y.R.: Impact behaviour of pre-compressed hollow and concrete filled mild and stainless steel columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 96, (2014), pp. 54-68.
- [7] Park, H.: Investigation on low velocity impact behavior between graphite/epoxy composite and steel plate, *Composite Structures*, 171 (2017) 1, pp. 126-130.
- [8] Gruben, G., Langseth, M., Fagerholt, E., Hopperstad, O.S.: Low-velocity impact on high-strength steel sheets: An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, 88 (2016), pp. 153-171.

- [9] ASTM E23-00, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2002).
- [10] Erdem, R.T., Kantar, E., Gücüyen, E., Alicioğlu, M.B.: Experimental study on different joint configurations of rectangular hollow sections under impact loading, *Gradevinar*, 72 (2020) 5, pp. 401-410, <https://doi.org/10.14256/JCE.2776.2019>
- [11] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [12] Erdem, R.T., Gücüyen, E., Kantar, E., Bağcı, M.: Impact effect on different sized reinforced concrete specimens, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22 (2015), pp. 597-603.
- [13] Othman, H., Marzouk, H.: An experimental investigation on the effect of steel reinforcement on impact response of reinforced concrete plates, *International Journal of Impact Engineering*, 88 (2016), pp. 12-21.
- [14] Weiyi, Z., Quanquan, G., Xuqianq, D., Yao, Z., Yinghua, Y.: Impact response of steel-concrete composite panels: Experiments and FE analyses, *Steel and Composite Structures*, 26 (2018) 3, pp. 255-263.
- [15] Erdem, R.T., Gücüyen, E., Kantar, E., Bağcı, M.: Impact behavior of concrete beams, *Gradevinar*, 66 (2014) 11, pp. 981-986.
- [16] Zhao, W., Guo, Q.: Experimental study on impact and post-impact behavior of steel-concrete composite panels, *Thin-Walled Structures*, 130 (2018), pp. 405-413.
- [17] Kadhim, M.M.A., Wu, Z., Cunningham, L.S.: Experimental study of CFRP strengthened steel columns subject to lateral impact loads, *Composite Structures*, 185 (2018) 1, pp. 94-104.
- [18] Kantar, E., Erdem, R.T., Gücüyen, E., Alicioğlu, M.B.: Investigation of imperfect steel connections under impact effect, *Scientific Research Project*, Manisa Celal Bayar University, (2019).
- [19] Kantar, E., Anil, Ö.: Low velocity impact behavior of concrete beam strengthened by CFRP strip, *Steel and Composite Structures*, 12 (2012) 3, pp. 207-230.
- [20] Bambach, M.R.: Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads, *Thin Walled Structures*, 49 (2011) 10, pp. 1251-1260.
- [21] Al-Thairy, H., Wang, Y.C.: A numerical study of the behaviour and failure modes of axially compressed steel columns subjected to transverse impact, *International Journal of Impact Engineering*, 38 (2011) 8-9, pp. 732-744.
- [22] Ahmed, A.: Modeling of a reinforced concrete beam subjected to impact vibration using ABAQUS, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 4 (2014) 3, pp. 227-236.
- [23] Gilbert, B.P., Rasmussen, K.J.R.: Impact tests and parametric impact studies on drive-in steel storage racks, *Engineering Structures*, 33 (2011) 5, pp. 1410-1422.
- [24] Iqbal, M.A., Kumar, V., Mittal, A.K.: Experimental and numerical studies on the drop impact resistance of prestressed concrete plates, *International Journal of Impact Engineering* 123 (2019), pp. 98-117.