

# Utjecaj brzine ispitivanja na vlačno ispitivanje čelika za armiranje

---

Šimić Jozić, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:121282>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sanja Šimić Jozić**

**Utjecaj brzine ispitivanja na vlačno ispitivanje čelika za armiranje**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023. godina.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij**  
**Građevinarstvo**  
**Osnove betonskih i zidanih konstrukcija**

**Sanja Šimić Jozić**  
**JMBAG: 0112066403**

**Utjecaj brzine ispitivanja na vlačno ispitivanje čelika za armiranje**

**Rijeka, 2023. godina.**

# IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

A handwritten signature in black ink, reading "Šimić Jozić Sanja", written over a horizontal line.

Sanja Šimić Jozić

**U Rijeci, 28.08.2023.**

# IZJAVA

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**POBOLJŠANJE PRORAČUNSKIH MODELA ZA OCJENU STANJA GRAĐEVINSKIH  
KONSTRUKCIJA**

Voditelj projekta	prof. dr. sc. Ivana Štimac Grandić
Šifra projekta	uniri-tehnic-18-127
Financijer projekta	<u>Sveučilište u Rijeci</u>
Pravna nadležnost	<u>Republika Hrvatska</u>

U Rijeci, 17.7.2023.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Željko Smolčić



## SAŽETAK

U radu je detaljno opisan i prikazan postupak ispitivanja čelika koji se koristi za armiranje. Počinjemo sa pripremom uzoraka pa sve do zadnjeg ispitivanja uzoraka prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010 koja je povezana sa normom HRN EN ISO 6892-1:2016. Ovim ispitivanjem dobiti ćemo na uvid mehanička svojstva čelika ovisno o brzini dodavanja opterećenja. Norma HRN EN ISO 6892-1:2016 definira metode ispitivanja A i B, gdje se metoda A koristi za kontrolu brzine deformacije. U radu je izvršeno i opisano vlačno ispitivanje na uzorcima šipki armature B500B prema metodi A1 iz norme HRN EN ISO 6892-1:2016.

**Ključne riječi:** vlačno ispitivanje, čelik za armiranje, norma, metoda A1

## ABSTRACT:

The thesis describes and presents the testing procedure for the steel used for reinforcement. We start with preparation of the samples until the last test of the samples according to the HRN EN ISO 6892-1:2010 norm, which is related to the HRN EN ISO 6892-1:2016 norm. Through this test we will gain insight into the mechanical properties of steel depending on the speed of loading. Norm HRN EN ISO 6892-1:2016 defines test methods A and B, where method A is used to control the rate of deformation. In the paper, a tensile test was performed and described on samples of B500B reinforcement bars according to method A1 from the HRN EN ISO 6892-1:2016 standard.

**Key words:** tensile testing, steel for the reinforcement, norm, method A1

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KIDALICA – ZWICK Z 600E</b> .....	<b>4</b>
<b>3. NORME</b> .....	<b>4</b>
3.1. HRN EN ISO 15630-1:2010 .....	5
3.2. HRN EN ISO 6892-1:2016 .....	8
3.2.1. <i>Mjere uvjetovane normom za uređaj za ispitivanje i ekstenzometar</i> .....	9
3.3. BRZINE ISPITIVANJA BAZIRANE NA BRZINI DEFORMACIJE (METODA A) .....	9
3.3.1. <i>Brzine deformacije za utvrđivanje <math>R_{eH}</math> ili <math>R_p</math> ili <math>R_t</math></i> .....	11
3.3.2. <i>Brzine deformacije za određivanje <math>R_{eL}</math> i <math>A_e</math></i> .....	11
3.3.3. <i>Brzine deformacije za određivanje <math>R_m</math>, <math>A</math>, <math>A_{gt}</math>, <math>A_g</math> i <math>Z</math></i> .....	11
<b>4. PROCES PRIPREME ISPITNIH UZORAKA ZA ISPITIVANJE</b> .....	<b>12</b>
4.1. UREĐAJI KORIŠTENI ZA KONDICIONIRANJE UZORAKA .....	12
4.2. PROCES UMJETNOG STARENJA .....	13
<b>5. VLAČNO ISPITIVANJE ČELIKA ZA ARMIRANJE</b> .....	<b>15</b>
5.1. PRIPREMA ZA ISPITIVANJE .....	15
5.2. PRED OPTEREĆENJE .....	16
5.3. PODRUČJE I – ELASTIČNO PODRUČJE .....	16
5.4. PODRUČJE II- PODRUČJE POPUŠTANJA.....	17
5.5. PODRUČJE III – PLASTIČNO PODRUČJE .....	17
<b>6. REZULTATI PROVEDENIH ISPITIVANJA -METODA A1</b> .....	<b>21</b>
6.1. PREPORUČENE BRZINE .....	22
6.1.1. <i>Uzorak br. 1 ispitan na preporučene brzine</i> .....	22
6.1.2. <i>Uzorak br. 2 ispitan na preporučene brzine</i> .....	23
6.1.3. <i>Uzorak br. 3 ispitan na preporučene brzine</i> .....	24
6.1.4. <i>Svi rezultati ispitanih uzoraka</i> .....	25
6.2. MAKSIMALNE BRZINE .....	29
6.2.1. <i>Uzorak br. 1 ispitan na maksimalne brzine</i> .....	29
6.2.2. <i>Uzorak br. 2 ispitan na maksimalne brzine</i> .....	30
6.2.3. <i>Uzorak br. 3 ispitan na maksimalne brzine</i> .....	31
6.2.4. <i>Svi rezultati ispitanih uzoraka</i> .....	32
6.3. MINIMALNE BRZINE .....	36
6.3.1. <i>Uzorak br. 1 ispitan na minimalne brzine</i> .....	36
6.3.2. <i>Uzorak br. 2 ispitan na minimalne brzine</i> .....	37
6.3.3. <i>Uzorak br. 3 ispitan na minimalne brzine</i> .....	38
6.3.4. <i>Svi rezultati ispitanih uzoraka</i> .....	39
6.4. SVI REZULTATI – OBJEDINJENO.....	43
6.5. DRUGO ISPITIVANJE – OKRUGLA GLATKA ČELIČNA ŠIPKA .....	44
6.5.1. <i>Ispitivanje prema normi ISO 6892 A2</i> .....	44
6.5.2. <i>Ispitivanje glatkih okruglih čeličnih šipki na veće brzine</i> .....	46
6.5.3. <i>Dijagrami</i> .....	48
<b>7. NAČINI OZNAČAVANJA U NORMAMA</b> .....	<b>50</b>
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>51</b>
<b>9. LITERATURA</b> .....	<b>52</b>

## 1. UVOD

Prvi dio rada sadržava opisivanje normi za ispitivanje čelika korištenog za armiranje koji mora osigurati nepromjenjive mehaničke, kemijske i fizikalne osobine neovisno o zemlji porijekla, a gledano prema globalnoj razini i određenim uvjetima. Cilj ispitivanja je provjera svojstava definiranih odgovarajućim standardom. U samom procesu ispitivanja i određivanja svojstava bitno je ispitati mehanička svojstva, a da je pri tome osigurana kvaliteta proizvoda. Ispitivanje se dijeli na nekoliko vrsta, a to su: ispitivanje na tlak, ispitivanje na vlak, ispitivanje na zamor i ispitivanje na savijanje.

Postupak pripreme uzoraka za ispitivanje i ispitivanje svojstava čelika u Hrvatskoj se provodi prema normi HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] u kojoj je postavljena osnovna metoda ispitivanja čelika na vlak, te koja se poziva na HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] normu. HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] je osnovna norma za ispitivanje na vlak metalnih materijala provedenih pri sobnoj temperaturi.

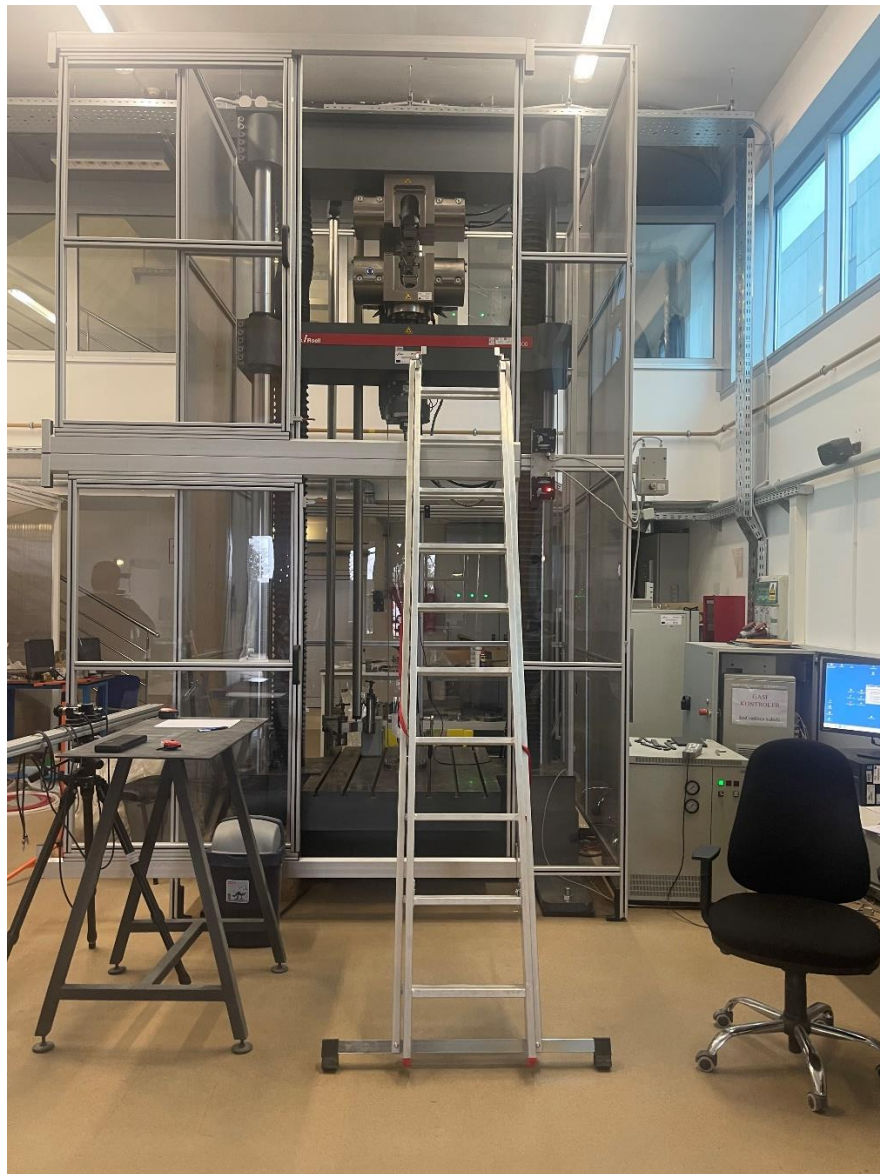
Ispitivanje na vlak prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] dijeli se na metodu A i B, a metoda A dijeli se još na A1 metodu i A2 metodu. U ovom radu korištena je metoda A1, drugim imenom metoda zatvorene petlje („closed loop“) koja uključuje kontrolu brzine deformacije i temelji se na povratnim informacijama iz ekstenzometra, dok je metoda A2 metoda otvorene petlje („open loop“) i uključuje kontrolu procijenjene brzine nastanka deformacije preko paralelne duljine.

Mehanička svojstva čelika ovise o brzini nanošenja opterećenja. Kod pojedinih metala dolazi do velike osjetljivosti na granicu popuštanja koja je uzrokovana brzinom samog ispitivanja, kada se to uzme u obzir bitno je smanjiti varijacije brzine ispitivanja na minimum dok se ne odredi granica popuštanja kako bi se smanjile greške koje se pojavljuju pri očitavanju rezultata. Krutost samog uređaja koji se koristi za ispitivanje, u ovom slučaju kidalica, također utječe na rezultate ispitivanja. Što je veća krutost kidalice pri jednakoj brzini pomaka pomične grede to će biti veća brzina deformacije uzorka, kao i veća mehanička svojstva.



Metoda A je metoda koja je preporučena za ispitivanje prema normi HRN RN ISO 6892-1:2016 [2] zbog baziranja na kontroli brzine deformacije – A1 ili metoda A2 koja se bazira na procijenjenoj brzini deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka. Same tolerancije su u ovim metodama iznimno stroge i iznose  $\pm 20\%$ .

Uređaj korišten za ispitivanje čelika za armiranje na vlak je kidalica ZWICK Z 600 E (slika 1. i slika 2.), to je univerzalni vlačno-tlačni uređaj koji je nabavljen projektom naziva RISK [4] i zadovoljava uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].



*Slika 1 Tlačno-vlačni stroj za ispitivanje armature- KIDALICA*



*Slika 2 Stroj za vlačno ispitivanje armature- KIDALICA -hidraulična čeljust*

## **2. KIDALICA – ZWICK Z 600E**

Kidalica je univerzalni tlačno-vlačni stroj koji služi za ispitivanje. Laboratorijsko ispitivanje koje je opisano u ovom radu izvodilo se na kidalici ZWICK Z 600E koja je kapaciteta 600kN i pokreće se elektromotorom. Glavna namjena je statičko ispitivanje, a moguća su i nisko ciklička ispitivanja do 0,5 Hz. Ispitivanja su moguća uz kontrolu pomaka, kontrolu sile i deformacije (pomoću ekstenzometra). Brzina ispitivanja pri kontroli pomaka je od 0,001 do 320 mm/min.

Sami radni prostor je podijeljen na dva dijela, tj. na dva radna prostora. Gornji radni prostor (Slika 2.) namijenjen je za vlačna ispitivanja, a donji za tlačna ispitivanja i ispitivanja na savijanje.

Prihvat uzoraka vrši se pomoću hidrauličnih čeljusti (600 kN), pneumatske čeljusti (10 kN) i mehaničke čeljusti (10kN).

Prije ispitivanja uređaj je kalibriran i verificiran prema normi HRN EN ISO 7500-1:2007/ Ispr. 1:2009 [5] i za takve potrebe mora biti minimalno klasa 1.

## **3. NORME**

Norme koje su korištene za ispitivanje prihvaćene su za norme u Hrvatskom zavodu i kao takve se primjenjuju u Republici Hrvatskoj. Svi standardi i potrebni uvjeti za izvršavanje ispitivanja, a korišteni u ovom radu, definirani su normama HRN EN ISO 15630-1:2020 [1] i HRN RN ISO 6892-1:2016 [2].

### 3.1. HRN EN ISO 15630-1:2010

U ovom radu korištene su metode koje su definirane normom HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] i one se u ovom dijelu rada odnose na vlačno ispitivanje armature.

Ova norma obuhvaća i druge metode koje se koriste za ispitivanje armature, kao što su ispitivanje na zamor, kemijska analiza, ispitivanje na savijanje i mjerenje geometrijskih karakteristika no to nije osnovni dio ovog rada, te se nisu vršila takva ispitivanja prilikom laboratorijskog ispitivanja.

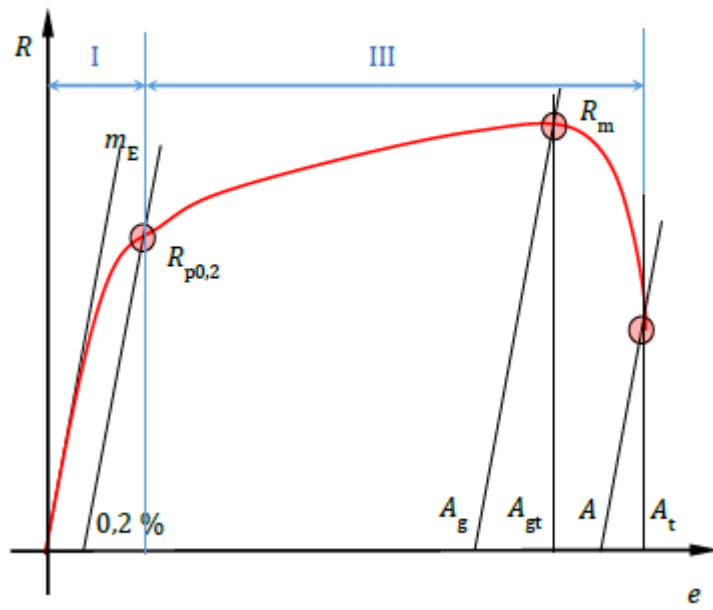
Norme HRN EN ISO 15630-1:2010 [1] i HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] imaju skoro jednak način označavanja veličina, te su u radu veličine označavane istim oznakama veličina kao i u normama [1] i [2]. U nastavku su prikazani primjeri dijagrama naprezanje-deformacija čelika, na slici 3. nalazi se navedeni dijagram bez izražene granice popuštanja, a na slici 4. dijagram sa izraženom granicom popuštanja.

Uobičajeno je uzimanje uzorka za ispitivanje iz žice, užeta ili šipke koji smo pripremili za ispitivanje. Prilikom uzimanja uzorka za ispitivanje mora se obratiti pažnja da uzorak ispunjava definirane i propisane norme proizvoda, te ukoliko je uzorak savijen mora se ispraviti uz minimalne plastične deformacije.

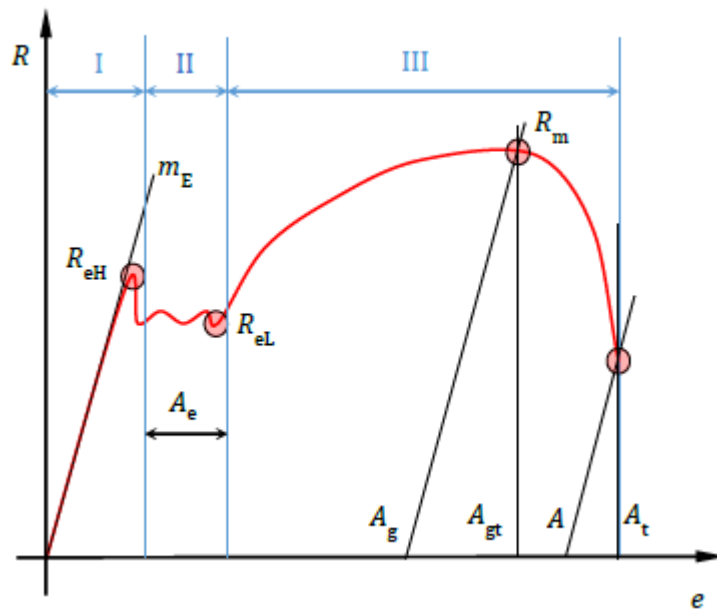
Za određivanje mehaničkih svojstava pri vlačnom ispitivanju moraju se ispuniti zahtjevi norme, a to su: zagrijavanje uzorka na 100 °C i zadržavanje te temperature ( $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) tijekom min nakon toga hlađenje na mirnom zraku do dostizanja sobne temperature. Ukoliko norma proizvoda zahtijeva proces umjetnog starenja za ispitivanje onda se uzorak izlaže tom procesu.

Kako bi uzorak ispunio potrebe ispitivanja, duljina „grip to grip“, koja se mjeri između čeljusti kidalice i naziva se slobodnom duljinom uzorka, mora biti dovoljna za određivanje trajne deformacije nakon loma koju izražavamo u postotcima.

Uvjeti propisani normom HRN EN ISO 7500-1:2007/ Ispr. 1:-2009 [5] nalažu da uređaj za ispitivanje – kidalica mora biti provjerene točnosti, ispitan i postavljen tako da odgovara metodi koja se koristi za ispitivanje. Još jedan od uvjeta je da uređaj za ispitivanje mora biti minimalno klase 1.

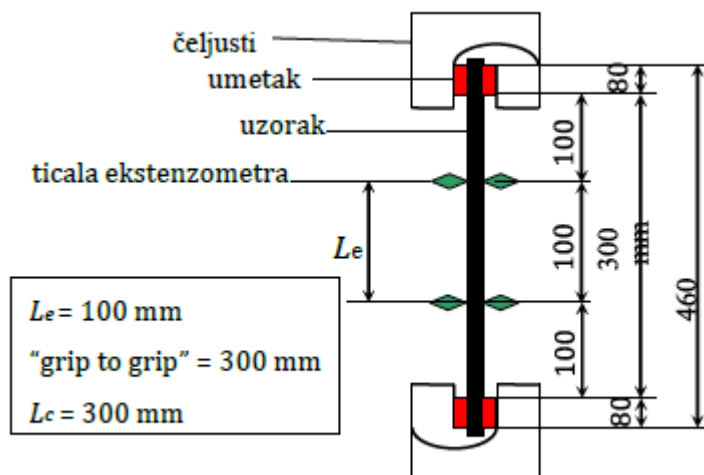


Slika 3 Dijagram naprezanje-deformacija bez granice popuštanja



Slika 4 Dijagram naprezanje-deformacija sa granicom popuštanja

Kod korištenja ekstenzometra mora se pobrinuti da bude u skladu s normom ISO 9513 [6], a to znači da mora biti minimalno klasa 1 za određivanje  $R_{p0,2}$  (granica popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2%) i minimalno klasa 2 za određivanje  $A_{gt}$  (ukupna deformacija pri najvećoj sili koja se izražava u postotcima). Za određivanje  $A_{gt}$ , mjerna duljina ekstenzometra -  $L_e$  mora biti zadovoljena, tj. Mora biti najmanje 100 mm.



Slika 5 Prikaz uzorka u hidrauličnim čeljustima

Postupak vlačnog ispitivanja koji se koristi u ovom radu definiran je normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. Kako bi se odredila granica popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2% ( $R_{p0,2}$ ), ako ravni dio dijagrama nije jasno definiran ili je ograničen, mora se pridržavati jedne od navedenih metoda:

- Procedura koja je preporučena normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]
- Ravnim dijelom dijagrama naprezanje-deformacija smatra se linija koja spaja točke koje odgovaraju  $0,2F_m$  (najvećoj sili u vlačnom ispitivanju) i  $0,5F_m$ .

Ukoliko se u rezultatu ispitivanja pojavi razlika nagiba linije za više od 10% od teorijske vrijednosti modula elastičnosti, onda se to ispitivanje smatra nevažećim.

Osim ako nije drugačije navedeno u normi odgovarajućoj za proizvod koji se koristi, za izračun vlačnih svojstava gornje granice popuštanja ( $R_{eH}$ ) ili granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2% ( $R_{p0,2}$ ) i vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) upotrebljava se nominalna površinu poprečnog presjeka ( $S_n$ ).

Ukoliko u čeljustima ili na razmaku čeljusti manjim od 20 mm ili manjim od nazivnog promjera (d) ako je veći od 20 mm dođe do prekida ispitivanje će biti nevažeće.

Da bi se odredila trajna post deformacija u postotcima (A), početna mjerna duljina (L<sub>0</sub>) mora biti jednaka 5d (nazivni promjer šipke), osim ako se ne navodi drugačije u odgovarajućoj normi proizvoda.

Da bi se odredila ukupna deformacija pri maksimalnoj sili (A<sub>gt</sub> – izražena u postotku) norma HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] primjenjuje se sa sljedećom izmjenom:

-ako se A<sub>gt</sub> određuje ručnom metodom nakon loma onda se primjenjuje sljedeći izraz za

izračun:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{2000} \quad (1)$$

-A<sub>g</sub>: trajna deformacija maksimalne sile izražena u postotcima.

### **3.2. HRN EN ISO 6892-1:2016**

Ovo poglavlje bazira se na vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi, gdje je osnovna norma HRN EN ISO 6892-1:2016 [2]. Kod ove norme treba posebno ukazati na jako stroge mjere koje se odnose na uređaj za ispitivanje i ekstenzometar. Ispitivanje po standardu ove norme predlaže također dvije metode ispitivanja, a to su metoda A i metoda B. S obzirom da je normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] preporučena metoda A, u ovom radu će se informacije i rezultati bazirati na metodu A. Zbog mogućeg ispitivanja na vlak kontrolom deformacije u zatvorenoj petlji („closed loop“), te njezine zahtjevnosti, istaknuti će se metodu A1 za koju je potrebna povratna informacija iz ekstenzometra.

Kako bi se moglo provesti ispitivanje temperatura zraka mora se održavati između 10°C i 35°C, ukoliko nije drugačije navedeno. Za ispitivanje u kontroliranim uvjetima ispitivanje se mora obavljati pri temperaturi 23°C (±5°).

### **3.2.1. Mjere uvjetovane normom za uređaj za ispitivanje i ekstenzometar**

Mjere koje su uvjetovane normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] za potrebe ispitivanja, a koje se odnose na uređaj za ispitivanje – kidalicu i ekstenzometar su iznimno stroge. Kako bi se postigli što točniji rezultati ispitivanja moraju se poštivati.

Normom HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr. 1:2009[5] definirani su uvjeti koje mora zadovoljiti mjerni sustav sile uređaja za ispitivanje (kidalice) pri određivanju modula elastičnosti kod čelika za armiranje, a to je da bude minimalno klase 1 u traženom području. Također su i za ekstenzometar normom ISO 9513 [6] definirani uvjeti za određivanje modula elastičnosti čelika za armiranje prema kojima ekstenzometar mora biti minimalno klase 0,5 u traženom području.

Kako bi sami mjerni sustav sile uređaja za ispitivanje bio u okvirima HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr. 1:2009 [5], on mora odgovarati minimalno klasi 1. Da bi se odredila granica popuštanja pri trajnoj deformaciji ( $R_p$ ) ili granica popuštanja pri ukupnoj deformaciji ( $R_t$ ) u traženom području, normom ISO 9513 [6] definirano je da ekstenzometar mora biti minimalno klase 1. Za rješavanje pitanja ostalih mehaničkih svojstava (s deformacijom koja je veća od 5%) ekstenzometar mora biti minimalno klase 2 u traženom području prema normi ISO 9613 [6].

### **3.3. Brzine ispitivanja bazirane na brzini deformacije (metoda A)**

Parametri koji su osjetljivi na brzinu ispitivanja veoma su kompleksni po pitanju njihove točnosti kada se provode višebrojna ispitivanja. Zbog toga je korištenje metode A prioritet kako bi njime same oscilacije rezultata ispitivanja svele na minimum. Postoje dva tipa kontrole brzine deformacije, a to su metoda A1 i metoda A2. Metodom A1 u zatvorenoj petlji („closed loop“) glavni dio ispitivanja brzine deformacije dobije se iz ekstenzometra, koja se sastoji od kontrole brzine deformacije i povratne informacije iz ekstenzometra. U Metodi A2 u otvorenoj petlji („open loop“) kontrolu koja uključuje deformaciju preko duljine ispitnog dijela uzorka dobijemo postizanjem kontrole brzine pomaka pomične grede koja je proračunata množenjem zahtijevane brzine deformacije s duljinom ispitnog dijela uzorka  $L_c$ .



U nastavku su zahtjevi kojima brzina deformacije mora udovoljavati:

- 1) Brzina deformacije za metodu A1 ili brzina pomaka pomične grede u metodi A2 mora se koristiti do trenutka određivanja gornje granice popuštanja ( $R_{eH}$ ), granice popuštanja pri trajnoj deformaciji ( $R_p$ ) ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji ( $R_t$ ). Za vjerodostojne rezultate ispitivanja, korištenje ekstenzometra je neophodno. Ekstenzometar će poništiti djelovanje krutosti kidalice i dati točan rezultat mjerenja deformacije [3]. U slučaju da se ne može kontrolirati brzina deformacije na kidalici onda se primjenjuje metoda A2.
- 2) Do potrebe za uzimanjem procijenjene brzine deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka dolazi zbog diskontinuiranog popuštanja, te se u ovom području javlja problem prilikom uporabe ekstenzometra. Problem pri uporabi dolazi zbog toga što brzinu deformiranja nije moguće svesti na kontrolirane granice što može dovesti do lokalnog popuštanja izvan mjerne duljine  $L_e$ . Rješenje za ovaj problem nalazi se u brzini pomične grede  $v_c$  u otvorenoj petlji. Brzina pomaka pomične grede  $v_c$  ima konstantnu brzinu koja je dovoljne točnosti da se uzme kao procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka. Za izračun brzine koristi se izraz:

$$v_c = L_c \times \dot{\epsilon}_{Lc} \quad (2)$$

- 3) Za područje koje dolazi nakon granice popuštanja pri trajnoj deformaciji ( $R_p$ ) ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji ( $R_t$ ) ili koje dolazi pri kraju popuštanja treba se uzeti brzina deformacije. Zbog postojanja mogućnosti da se suženje presjeka ostvari izvan mjerne duljine ekstenzometra i da ne dođe do problema prilikom postizanja čvrstoće uzorka koristi se brzina deformacije.

### **3.3.1. Brzine deformacije za utvrđivanje $R_{eH}$ ili $R_p$ ili $R_t$**

Trenutak utvrđivanja gornje granice popuštanja ( $R_{eH}$ ), granice popuštanja pri trajnoj deformaciji ( $R_p$ ) ili granice popuštanja pri ukupnoj deformaciji ( $R_t$ ) je definiran konstantnom brzinom deformacije. Postoje dva raspona u kojima se mora kretati brzina deformacije tokom određivanja svojstava materijala, a to su:

- Raspon 1:  $e_{Le} = 0,00007 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$
- Raspon 2:  $e_{Le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$  (preporučeno)

Ako kidalica nije u mogućnosti kontrolirati brzinu deformacije biti će uvjetovano izravno primjenjivanje metode A2.

### **3.3.2. Brzine deformacije za određivanje $R_{eL}$ i $A_e$**

Da bi se odredila donja granica popuštanja ( $R_{eL}$ ) i deformacija granice popuštanja ( $A_e$ ) izražena u postocima, mora se paziti da tijekom ispitivanja procijenjena brzina deformacije ostane nepromijenjena, tj. Da ne bude variranja u procijenjenoj brzini deformiranja na duljini ispitnog dijela uzorka do samog kraja diskontinuiranog popuštanja. Postoje dva raspona u kojima se mora kretati brzina deformacije tokom određivanja svojstava materijala, a to su:

- Raspon 2:  $e_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$  (preporučeno)
- Raspon 3:  $e_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$

### **3.3.3. Brzine deformacije za određivanje $R_m$ , $A$ , $A_{gt}$ , $A_g$ i $Z$**

Tijekom određivanja vlačne čvrstoće ( $R_m$ ), trajne deformacije nakon loma ( $A$ ) izražene u postocima, ukupne deformacije pri najvećoj sili ( $A_{gt}$ ) izražene u postocima, trajne deformacije pri najvećoj sili ( $A_g$ ) izražene u postocima i suženja površine poprečnog presjeka ( $Z$ ) izraženo u postocima procijenjena brzina deformacije mora biti u jednom od sljedećih raspona:

- Raspon 2:  $e_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$
- Raspon 3:  $e_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$
- Raspon 4:  $e_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$  (preporučeno)

## 4. PROCES PRIPREME ISPITNIH UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Za ispitivanje je korišten čelik B500B promjera 8mm. Kako bi sve duljine uzoraka bile jednake, šipka promjera 8mm izrezana je na uzorke duljine 500mm. U radu je korištena metoda A1 vlačnog ispitivanja, te je za svaku brzinu korišteno po 3 uzorka šipki.

### 4.1. Uređaji korišteni za kondicioniranje uzoraka

- 1) Memmert sušionik UF260 [9] – ventilirajući sušionik koji služi za sušenje i kondicioniranje uzoraka. Volumen mu je 256 litara, a raspon temperature je od temperature okoliša +10°C do 300°C (slika 6.).
- 2) KIMO KISTOCK KTT310 [10] SET uređaj sa sondama P TF-50 i softverom KIC2-N je ujedno termometar, data logger, te software za obradu podataka. Služi za mjerenje temperature sa mogućnosti pohrane podataka. Mjerno područje temperature ovisi o tipu sonde: (slika 7.).
  - K sonda: od -200°C do 1000°C
  - J sonda: od -100°C do 750°C
  - T sonda: od 200°C do 400°C



Slika 6 Memmert sušionik UF260



*Slika 7 KIMO KISTOCK KTT310 SET sa sondama P TF-50*

#### **4.2. Proces umjetnog starenja**

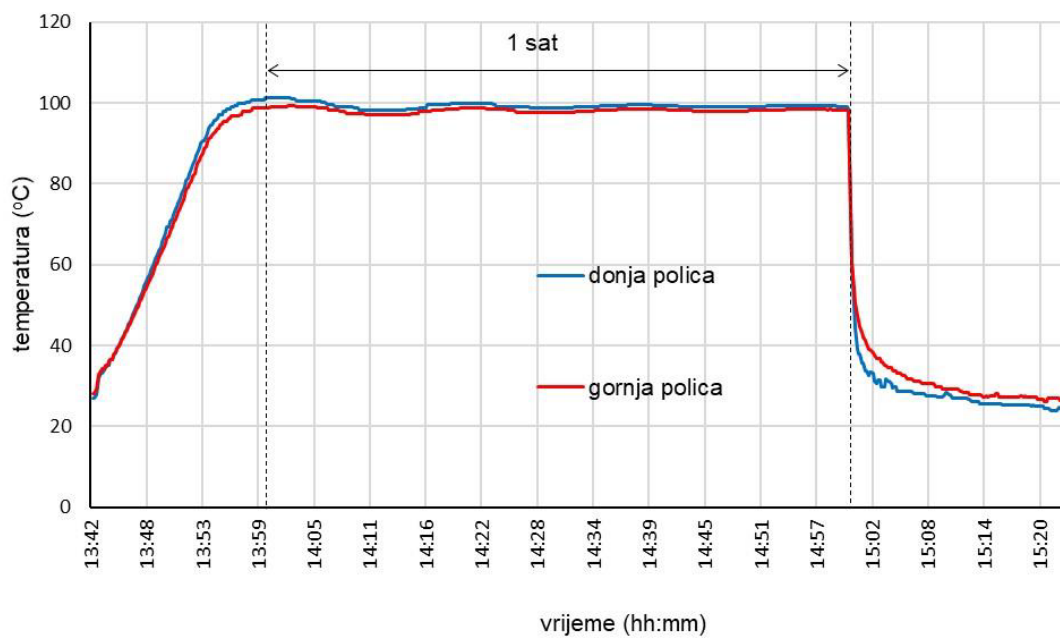
Kako bi se pripremio uzorak za ispitivanje mora se izvršiti proces umjetnog starenja (slika 8. i 9.). Postupak je takav da se uzorci zagrijavaju na 100°C i zadržavaju se na toj temperaturi otprilike 1h i 15min sa oscilacijama  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , te se potom uzorci hlade na mirnom zraku do dosizanja sobne temperature. (slika 10.).



*Slika 8 Sonde koje bilježe temperaturu unutar samog sušionika*



*Slika 9 Proces umjetnog starenja*



*Slika 10 Dijagram temperature u vremenu*

## 5. VLAČNO ISPITIVANJE ČELIKA ZA ARMIRANJE

Za ispitivanje armature na vlak korišten je tlačno-vlačni stroj za ispitivanje- kidalica *Zwick Z 600E* kapaciteta 600 kN. Glavna namjena ovog stroja je monotono statičko ispitivanje. Ispitivanja je moguće raditi uz kontrolu sile, kontrolu pomaka i kontrolu deformacije ( pomoću ekstenzometra). Kidalica ispunjava uvjete ispitivanja prema metodi A1 norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

Vlačno ispitivanje provedeno je na tri uzorka armature B500B promjera 8mm, te je podijeljeno na nekoliko glavnih cjelina vlačnog ispitivanja armature [8]. Započinje se pripremom za ispitivanje, nakon toga se na uređaju podešava pred opterećenje pa se zatim prate deformacije koje se pojavljuju u procesu ispitivanja.

### 5.1. Priprema za ispitivanje

Na samom početku priprema se hidraulična čeljust i u nju se postavljaju ulošci za prihvat okruglih uzoraka promjera 8 do 18 mm hidraulične čeljusti kidalice. Za praćenje nanošenja sile koristi se mjerna ćelija kapaciteta 600 kN, a za praćenje deformacija uzoraka koristi se ekstenzometar s odgovarajućim ticalima. Pri ispitivanju se mjere sljedeći podaci: pomak pomične grede, deformacija ekstenzometra, sila na mjernoj ćeliji i vrijeme trajanja ispitivanja.

Kidalicom se upravlja putem računala, programom *testXpert II* [4,7] pomoću kojeg se zadaju osnovni parametri ispitivanja. Slobodna duljina uzorka „grip to grip“ između čeljusti je 300 mm (slika 5.). Prilikom postavljanja uzorka u čeljust bitno je da se uzorak postavi prvo u donju čeljust koja je povezana na mjernu ćeliju, ona prihvaća uzorak pritiskom od 30 bara na umetke donjih čeljusti. Na gornje čeljusti postavlja se uzorak tek kada mjerna ćelija nulira, a pritisak je jednak kao na donjim čeljustima. Pri pokretanju pritisak u čeljustima povećava se sa 30 bara na 100 bara. Tijekom povećanja pritiska pojavljuje se mala tlačna sila u uzorku, te se automatski povećava slobodna duljina uzorka između čeljusti da bi se sila održavala na veličini približnoj 0 N.

## 5.2. Pred opterećenje

Pred opterećenje je od velikog značaja jer na uzorku uklanja moguće pomake uzorka pri manjim silama do kojih ponekad dolazi zbog početnog klizanja između umetka čeljusti i uzorka i eventualno potrebnog izravnjanja osi uzorka. Pred opterećenje se postavlja na veličinu manju od 5% očekivane granice popuštanja. Na ispitivanju je korišteno pred opterećenje koje je iznosilo 5MPa, što je otprilike 1% od očekivane granice popuštanja, te zbog toga bilježenje na dijagramu počinje od 5MPa. Brzina pred opterećenja iznosila je 1mm/min, a nakon dostizanja pred opterećenja pomiču se ticala ekstenzometra na uzorak sa nuliranjem ekstenzometra.

## 5.3. Područje I – elastično područje

Ovo područje predstavlja gotovo ravan dio na dijagramu naprezanje-deformacija, to je područje prije samog popuštanja. U ovom području nema značajnih deformacija zbog svojstava uzorka, te je zbog toga na dijagramu gotovo ravan prikaz. Do mogućih početnih odstupanja od pravca dolazi zbog daljnjeg izravnavanja osi uzorka.

Korištena brzina u procesu ispitivanja po metodi A1 bila je u rasponu 2, a to je:  $e_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$ . Metodom je definirana deformacija u zatvorenoj petlji, a to znači da je potrebno koristiti kontrolu deformacije u trajanju ispitivanja jer je iznimno osjetljivo i moraju se poštivati granice tolerancije od  $\pm 20 \%$  prilikom kontrole brzine deformacije. Za vrijeme ispitivanja ekstenzometar šalje povratne informacije o veličini deformacije što omogućava neprekidnu korekciju brzine pomaka pomične grede tijekom vlačnog ispitivanja. Kontroler kidalice omogućava pravilan rad kontrole deformacije u zatvorenoj petlji („closed-loop“) i zbog toga je od velike važnosti.

Modul elastičnosti armature, koji je definiran stavkama norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] za elastično područje, određuje se preko tangensa kuta pod kojim je nagib pravca linearne regresije u dijagramu naprezanje-deformacija u rasponu od 10%  $R_{eH}$  ili  $R_{p0,2}$  i 40% od  $R_{eH}$  ili  $R_{p0,2}$ .

#### 5.4. Područje II- područje popuštanja

U ovom području prilikom ispitivanja dostiže se granica popuštanja. Čelik je materijal sa izraženom granicom popuštanja, te u dijagramu naprezanje-deformacija dolazi do naglog pada nakon dostizanja gornje granice popuštanja. Potom dolazi područje koje karakterizira značajno povećanje deformacije sa neznatnim promjenama naprezanja.

Norma u ovom području zahtjeva promjenu načina kontroliranja ispitivanja zbog nemogućnosti kontrole brzine pomoću ekstenzometra. Kontrola brzine više ne zadovoljava te se samim time odabire drugi način kontrole, a to je kontrola pomaka pomične grede. U ovom području koristi se preporučena brzina deformacije koja je u rasponu 2 i iznosi:  $\dot{e}_{LC} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$ . Preporučena procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka će se održavati automatski s pomoću brzine pomaka pomične grede u otvorenoj petlji („open-loop“) koja je konstantna. To je prikazano u jednadžbi (2):

$$v_c = L_c \times \dot{e}_{LC} = 300\text{mm} \times 0,00025 \text{ s}^{-1} = 0,075 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (3)$$

Funkcija ekstenzometra u području popuštanja je isključivo mjerenje deformacije uzorka, dok je kontrola ispitivanja definirana kontrolom pomaka pomične grede konstantnom brzinom (3).

#### 5.5. Područje III – plastično područje

Nakon područja popuštanja dolazi plastično područje i ono traje sve do loma uzorka. Prema pravilima norme brzina se u ovom području može značajno ubrzati kako bi skratili vrijeme ispitivanja. U ovoj fazi ispitivanja korištena je brzina deformacije u rasponu 4 koja je preporučena i iznosi:  $\dot{e}_{LC} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$ , s relativnom tolerancijom od  $\pm 20 \%$ . Preporučena procijenjena brzina deformacije preko duljine ispitnog dijela uzorka će se održavati automatski s pomoću brzine pomaka pomične grede u otvorenoj petlji („open-loop“) koja je konstantna. To je prikazano u jednadžbi (4):

$$v_c = L_c \times \dot{e}_{LC} = 300\text{mm} \times 0,0067 \text{ s}^{-1} = 2,01 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (4)$$



Funkcija ekstenzometra u plastičnom području jednaka je kao i u prethodnoj fazi, a to je isključivo mjerenje deformacije uzorka, dok je kontrola ispitivanja definirana kontrolom pomaka pomične grede konstantnom brzinom (4).

U trenutku kada sila  $F$  u vlačnom ispitivanju padne za 80% vrijednosti  $F_m$  ispitivanje će se zaustaviti.

Korišteni tipovi kontrole vlačnog ispitivanja, odgovarajuće brzine deformacije i brzine pomaka pomične grede prikazani su u tablici 1. Prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] i korištenim brzinama ispitivanja način označavanja biti će ISO 6892-1:2016 A224, gdje oznaka A prikazuje da je ispitivanje provedeno po metodi A – u našem slučaju A1, dok oznaka 224 označava raspon brzina koje su korištene u područjima:

Područje I: raspon 2; Područje II: raspon2; Područje III: raspon 4.

*Tablica 1. Korištene brzine ispitivanja*

TIP KONTROLE ISPITIVANJA	BRZINE DEFORMACIJE	BRZINE POMAKA POMIČNE GREDE
<b>Kontrola deformacije - Područje I</b>	$\dot{\epsilon}_{Le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$	-
<b>Kontrola pomaka -Područje II</b>	$\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$	$v_c = 0,075 \frac{mm}{s}$
<b>Kontrola pomaka -Područje III</b>	$\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$	$v_c = 2,01 \frac{mm}{s}$

Na slici 11. prikazana je hidraulična čeljust neposredno prije ispitivanja sa postavljenim uzorkom čelika za armiranje koji ispitujemo, a na slici 12. prikazan je uzorak u hidrauličnoj čeljusti neposredno nakon završetka ispitivanja.



*Slika 11 Hidraulična čeljust sa uzorkom neposredno prije ispitivanja*



*Slika 12 Uzorak u hidrauličnoj čeljusti neposredno nakon ispitivanja*

## 6. REZULTATI PROVEDENIH ISPITIVANJA -METODA A1

Za ovaj rad provedena su vlačna ispitivanja u dva dijela. Prvi dio ispitivanja temelji se na ispitivanju rebrastih šipki za armiranje. Ispitano je 9 uzoraka šipke, uzorci su promjera 8 mm i svi su jednake duljine koja iznosi 500 mm. Provedeno je ispitivanje na preporučene brzine, maksimalne i minimalne brzine. Za svaku brzinu korištena su po 3 uzorka ispitana na različitim brzinama. Drugi dio ispitivanja je dodatno ispitivanje koje je provedeno kako bi se vidjelo koje su promjene moguće ako se za uzorak uzme okrugla glatka čelična šipka i izloži brzinama prema normi, te promjene ukoliko se te iste šipke izlože većim brzinama. Za ispitivanje je korišteno 9 uzoraka šipke promjera 8mm i duljine 500mm.

Ispitivanja su izvršena metodom A1 u skladu sa normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] za vlačno ispitivanje čelika za armiranje i njezinim zahtjevima.

Za prvo ispitivanje korišteni su uzorci duljine 500mm, promjera 8mm koji su rezani iz rebraste čelične šipke za armiranje. Uzorci su rezani od jedne šipke kako bi imali jednaka svojstva i kako bi se provelo što preciznije ispitivanje. Na slici 13. prikazani su uzorci pripremljeni za ispitivanje. Za ispitivanje je pripremljeno 12 uzoraka šipke, 3 su korištena za samu pripremu hidraulične čeljusti, provjeru postavki i probu, te za njih nisu bilježeni rezultati. Ostalih 9 je korišteno za navedena ispitivanja sa različitim brzinama.



*Slika 13 Uzorci pripremljeni za ispitivanje*

## 6.1. Preporučene brzine

### 6.1.1. Uzorak br. 1 ispitan na preporučene brzine

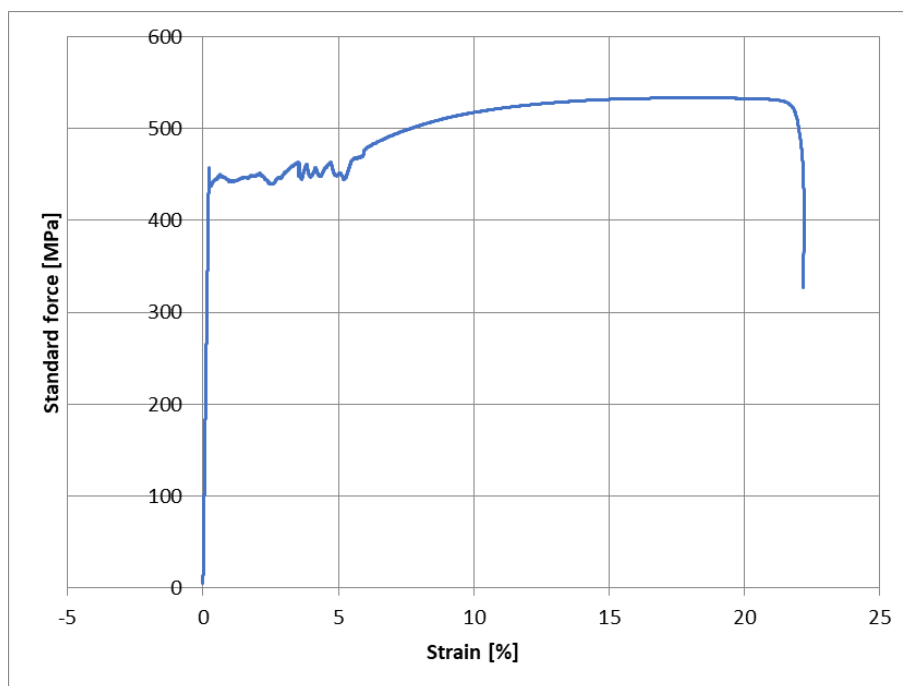
Tablica 2. prikazuje mehanička svojstva za prvi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na preporučenim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija. To su:

- Modul elastičnosti (  $E$  )
- Gornja granica popuštanja (  $R_{eH}$  )
- Vlačna čvrstoća (  $R_m$  )
- Ukupna deformacija pri najvećoj sili – u postocima (  $A_{gt}$  )

Tablica 2. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	$E$ [GPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{gt}$ [%]
Ø8 -1	199	479	591	15,01

Dijagram naprezanje-deformacija za prvi od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 14.



Slika 14 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka RECI

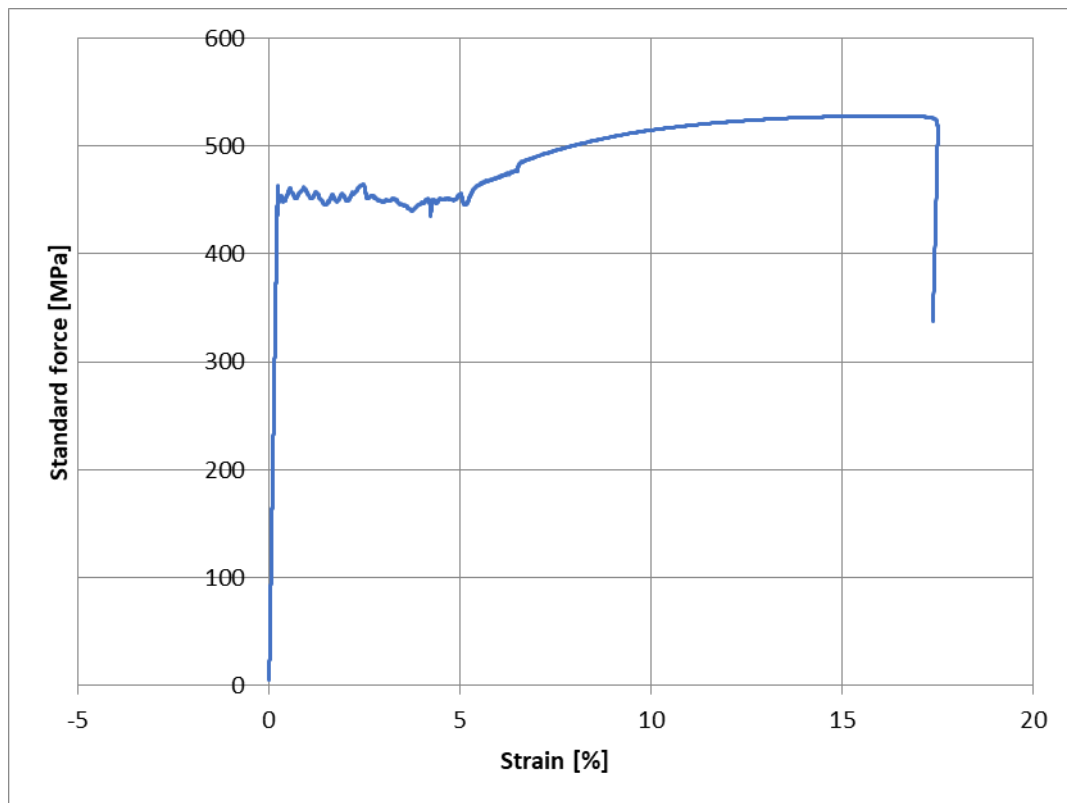
### 6.1.2. Uzorak br. 2 ispitan na preporučene brzine

Tablica 3. prikazuje mehanička svojstva za drugi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na preporučenim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 3. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -2	184	485	596	14,66

Dijagram naprezanje-deformacija za drugi od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 15.



Slika 15 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka REC2

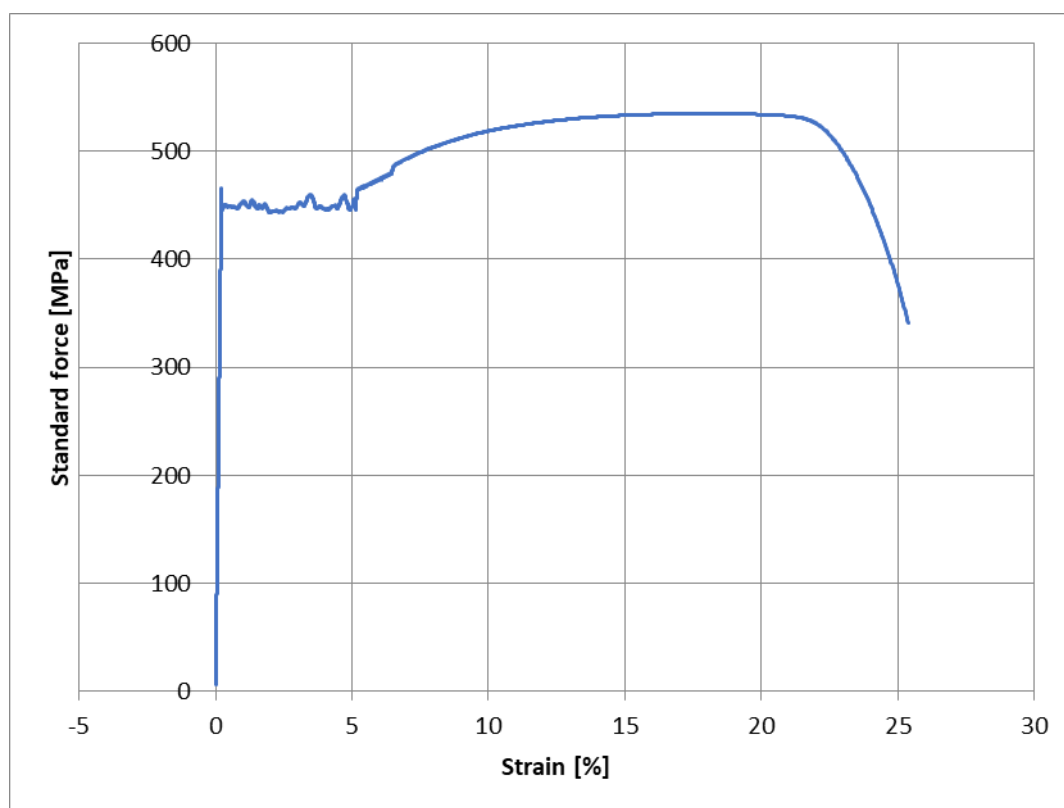
### 6.1.3. Uzorak br. 3 ispitan na preporučene brzine

Tablica 4. prikazuje mehanička svojstva za treći od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na preporučenim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 3. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -3	201	487	594	13,92

Dijagram naprezanje-deformacija za treći od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 16.



Slika 16 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka REC3

### 6.1.4. Svi rezultati ispitanih uzoraka

Tablica 5. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za sva tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na preporučenim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 5. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -1	199	479	591	15,01
Ø8 -2	184	485	596	14,66
Ø8 -3	201	487	594	13,92

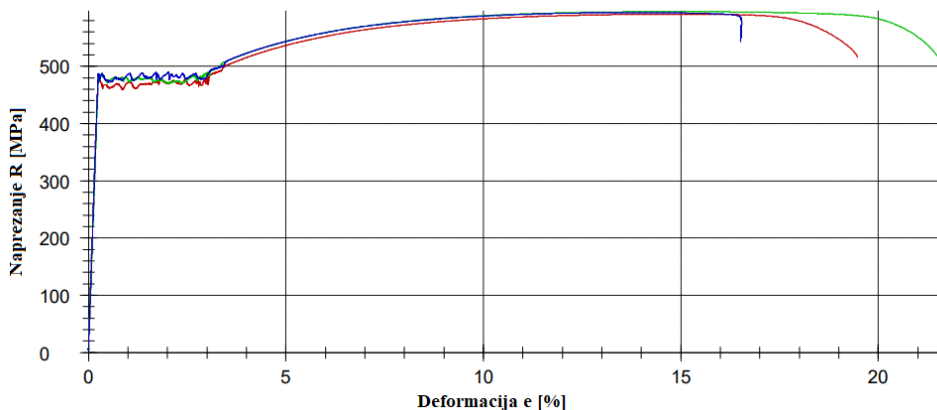
Osnovne parametre statističke obrade rezultata tri vlačno ispitana uzorka armature prikazuje tablica 6. U njoj se nalaze osnovne statističke veličine, a to su:

- Srednja vrijednost ( $\bar{x}$ )
- Standardna devijacija (s)
- Koeficijent varijacije (v)

Tablica 6. Osnovni statistički parametri

n=3	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
$\bar{x}$	194	484	594	14,53
s	9	4	2	0,56
v [%]	4,86	0,92	0,37	3,84

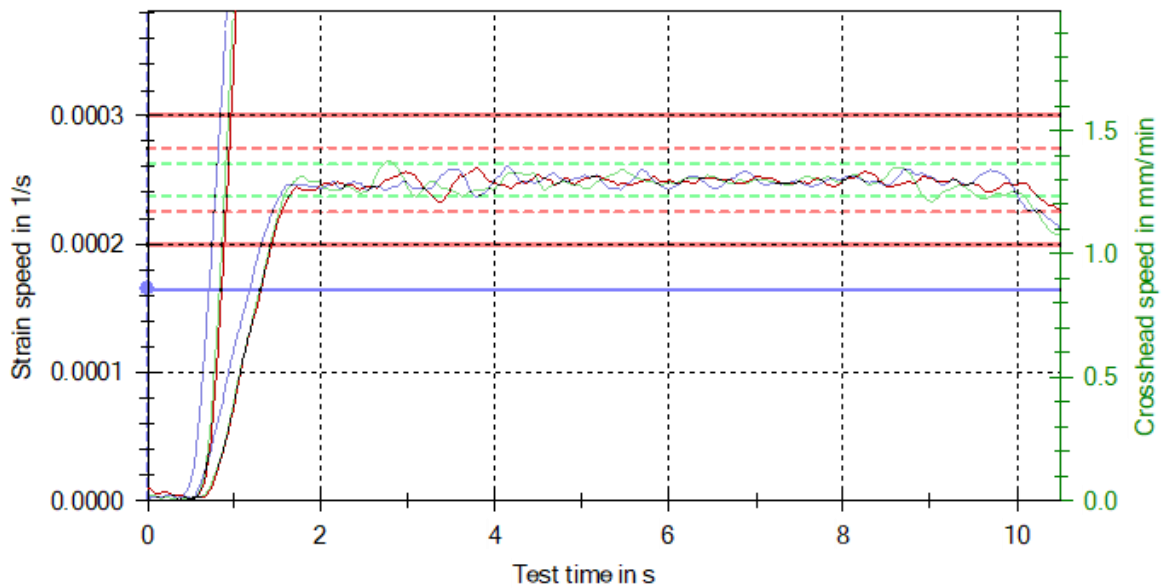
Dijagram naprezanje-deformacija za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 17.



Slika 17 Dijagram naprezanje-deformacija za sva tri uzorka



Dijagram brzina deformacije( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja (t) za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 18.



Slika 18 Dijagram brzina deformacije ( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja (t)-REC

Prilikom ispitivanja na preporučene brzine do pucanja je dolazilo u donjoj zoni hidraulične čeljusti. Slike 19. i 20. prikazuju uzorke prije ispitivanja na preporučenim brzinama i uzorke nakon ispitivanja.



*Slika 19 Uzorci prije vlačnog ispitivanja na preporučenim brzinama*



*Slika 20 Uzorci nakon vlačnog ispitivanja na preporučenim brzinama*

## 6.2.      **Maksimalne brzine**

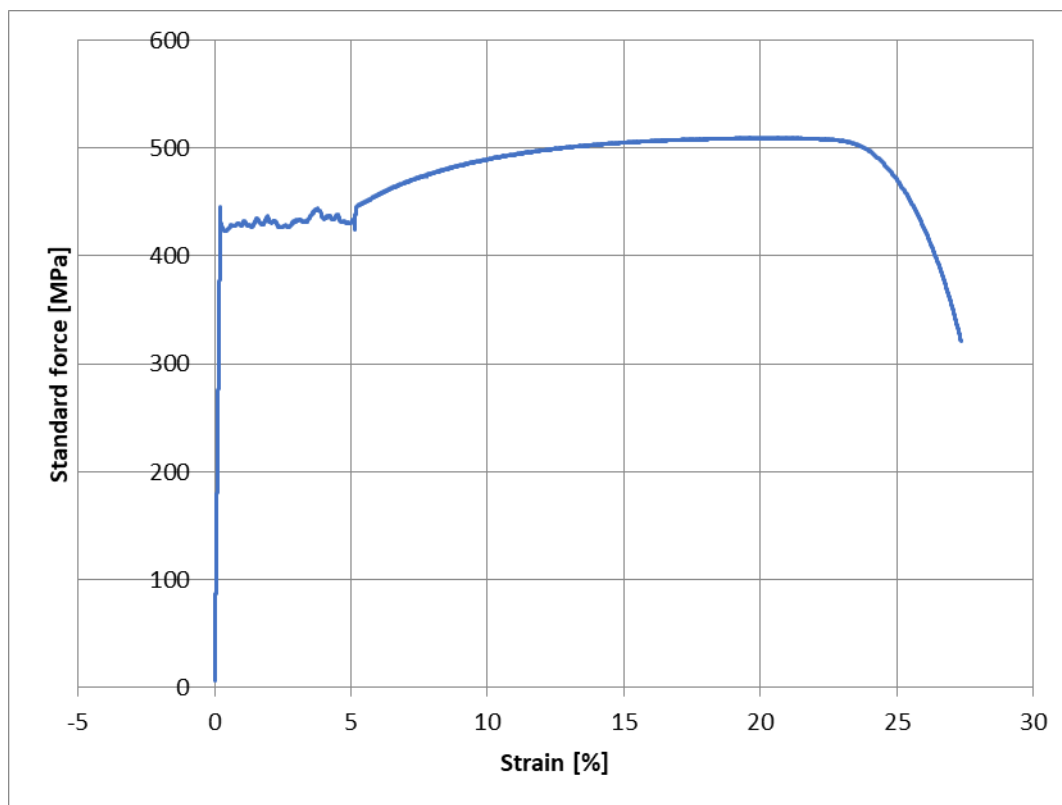
### 6.2.1. *Uzorak br. 1 ispitan na maksimalne brzine*

Tablica 7. prikazuje mehanička svojstva za prvi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na maksimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

*Tablica 7. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje*

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -4	201	490	605	11,24

Dijagram naprezanje-deformacija za prvi od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 21.



*Slika 21 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka MAX1*

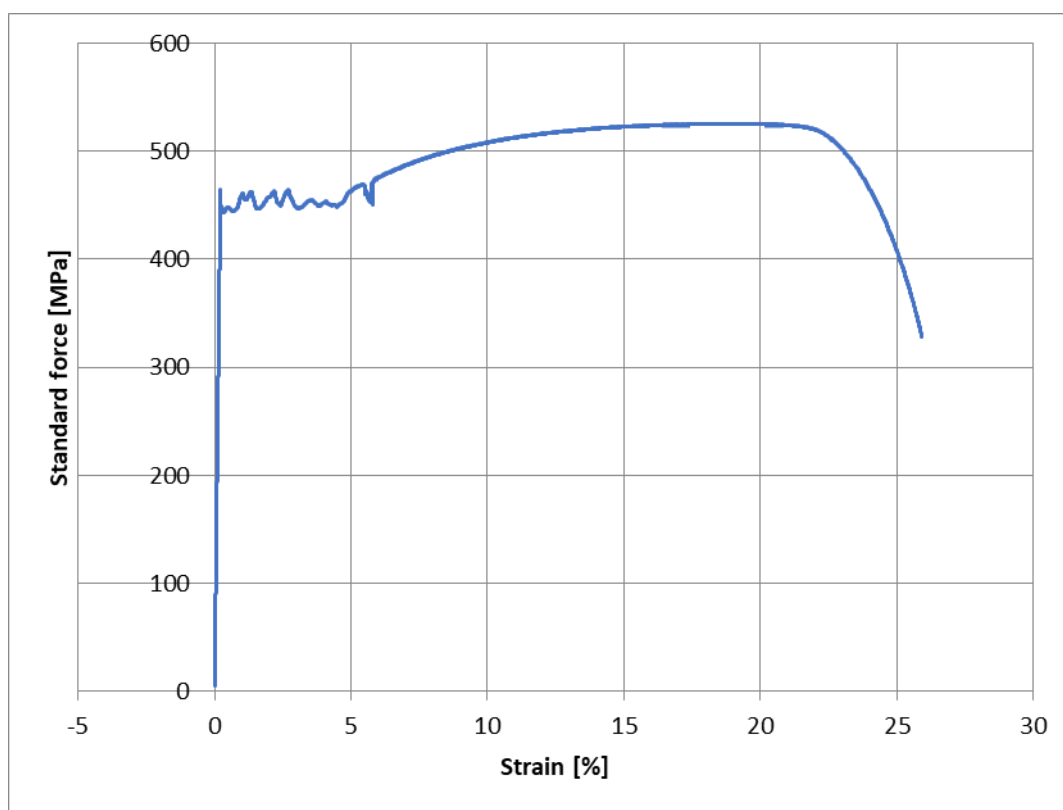
### 6.2.2. Uzorak br. 2 ispitan na maksimalne brzine

Tablica 8. prikazuje mehanička svojstva za drugi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na maksimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 8. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -5	189	490	606	11,34

Dijagram naprezanje-deformacija za drugi od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 22.



Slika 22 Dijagram naprezanje-deformacija za uzorak MAX2

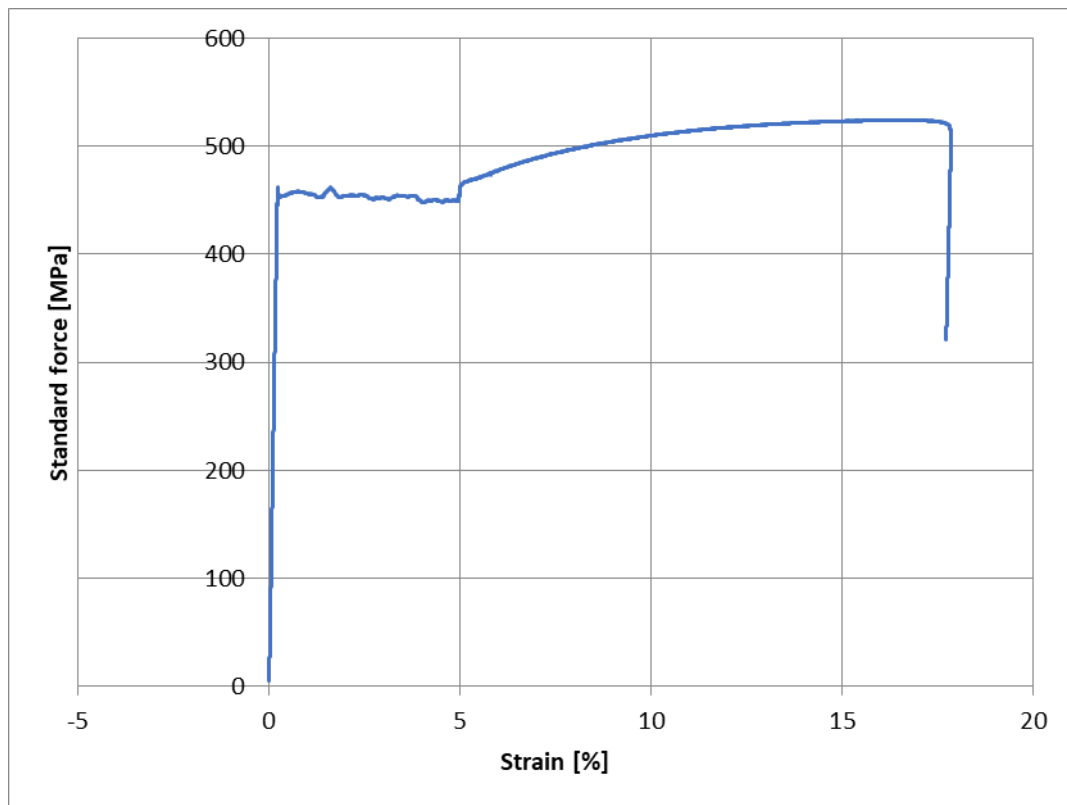
### 6.2.3. Uzorak br. 3 ispitan na maksimalne brzine

Tablica 9. prikazuje mehanička svojstva za treći od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na maksimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 9. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [Gpa]	R <sub>eh</sub> [Mpa ]	R <sub>m</sub> [Mpa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -6	192	491	600	12,19

Dijagram naprezanje-deformacija za treći od tri vlačno ispitana uzorka prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 23.



Slika 23 Dijagram naprezanje-deformacija za uzorak MAX3

#### 6.2.4. Svi rezultati ispitanih uzoraka

Tablica 10. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za sva tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na maksimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 10. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

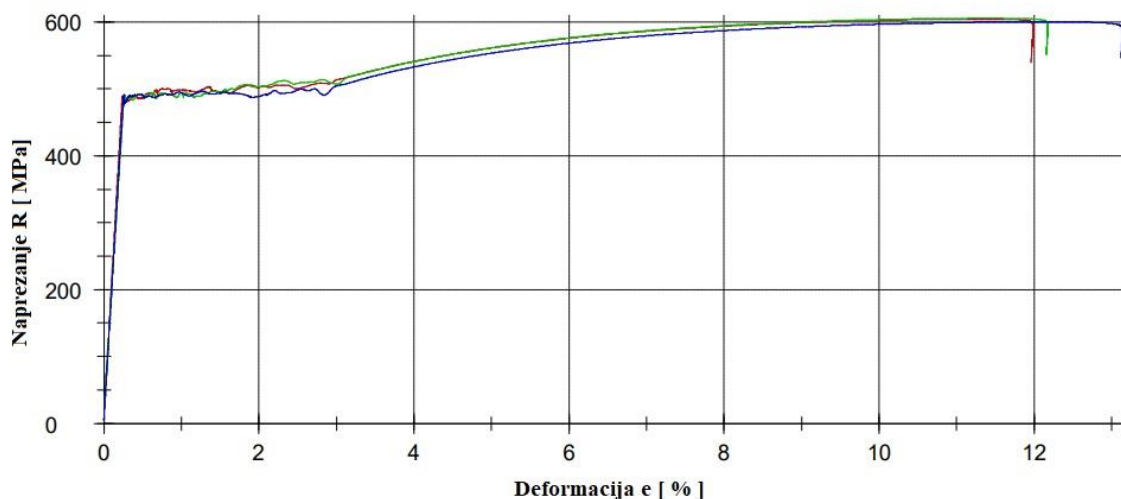
UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -4	201	490	605	11,24
Ø8 -5	189	490	606	11,34
Ø8 -6	192	491	600	12,19

Osnovne parametre statističke obrade rezultata tri vlačno ispitana uzorka armature prikazuje tablica 11. U njoj se nalaze osnovne statističke veličine.

Tablica 11. Osnovni statistički parametri

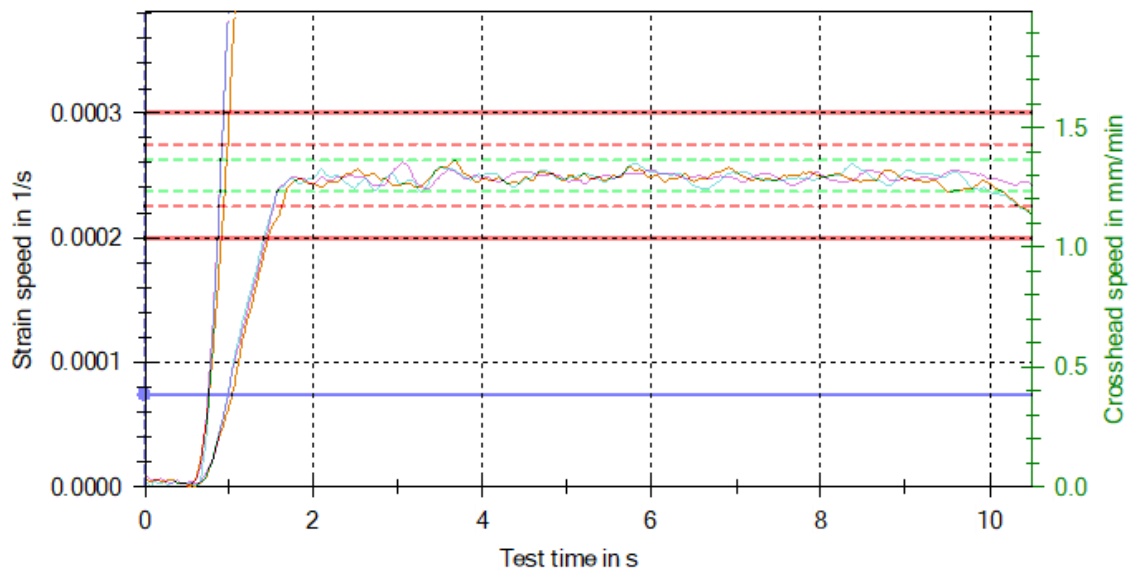
n=3	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
$\bar{x}$	194	490	604	11,59
s	6	1	3	0,52
v [%]	3,04	0,17	0,47	4,5

Dijagram naprezanje-deformacija za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 24.



Slika 24 Dijagram naprezanje-deformacija za sva tri uzorka- MAX

Dijagram brzina deformacije( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja (t) za ispitane uzorke prema maksimalnim brzinama prikazan je na slici 25.



Slika 25 Dijagram brzina deformacije( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja (t)

Prilikom ispitivanja na maksimalne brzine do pucanja je dolazilo u gornjoj zoni hidraulične čeljusti. Slike 26. i 27. prikazuju uzorke prije ispitivanja na maksimalnim brzinama i uzorke nakon ispitivanja.





*Slika 26 Uzorci nakon vlačnog ispitivanja na maksimalnim brzinama*



*Slika 27 Uzorci nakon vlačnog ispitivanja na maksimalnim brzinama*

### 6.3. Minimalne brzine

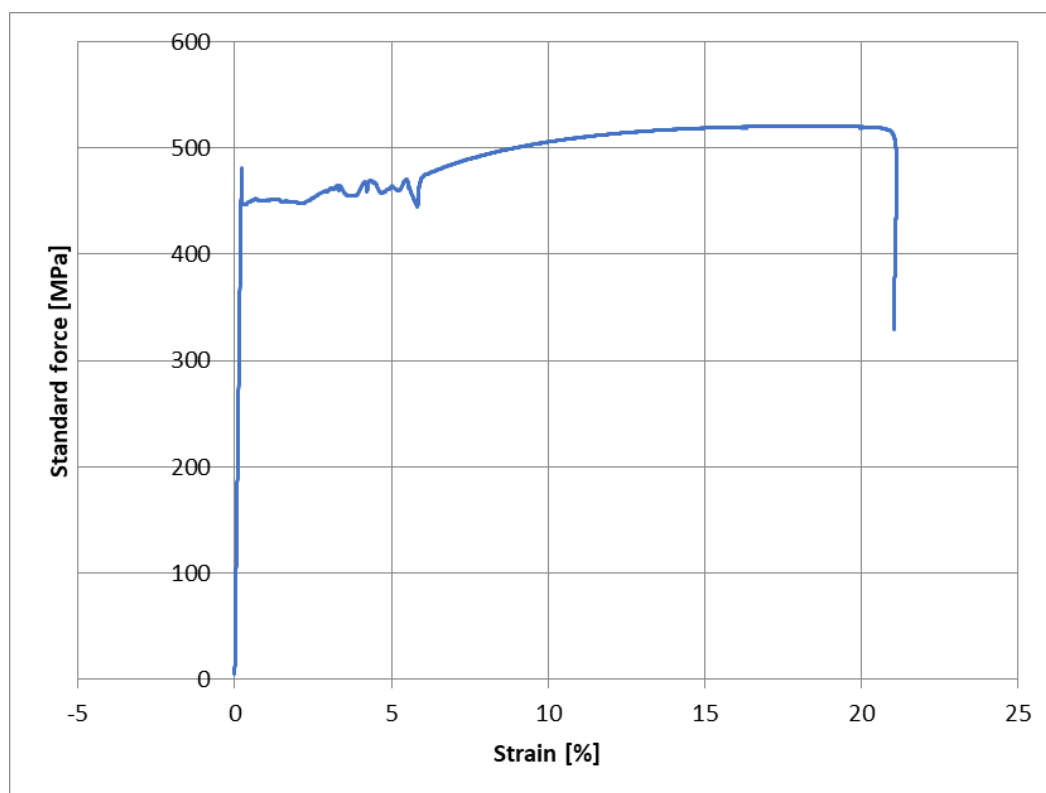
#### 6.3.1. Uzorak br. 1 ispitan na minimalne brzine

Tablica 12. prikazuje mehanička svojstva za prvi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na minimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 12. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -7	197	481	586	16,09

Dijagram naprezanje-deformacija za prvi od tri vlačno ispitana uzorka prema minimalnim brzinama prikazan je na slici 28.



Slika 28 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka MINI

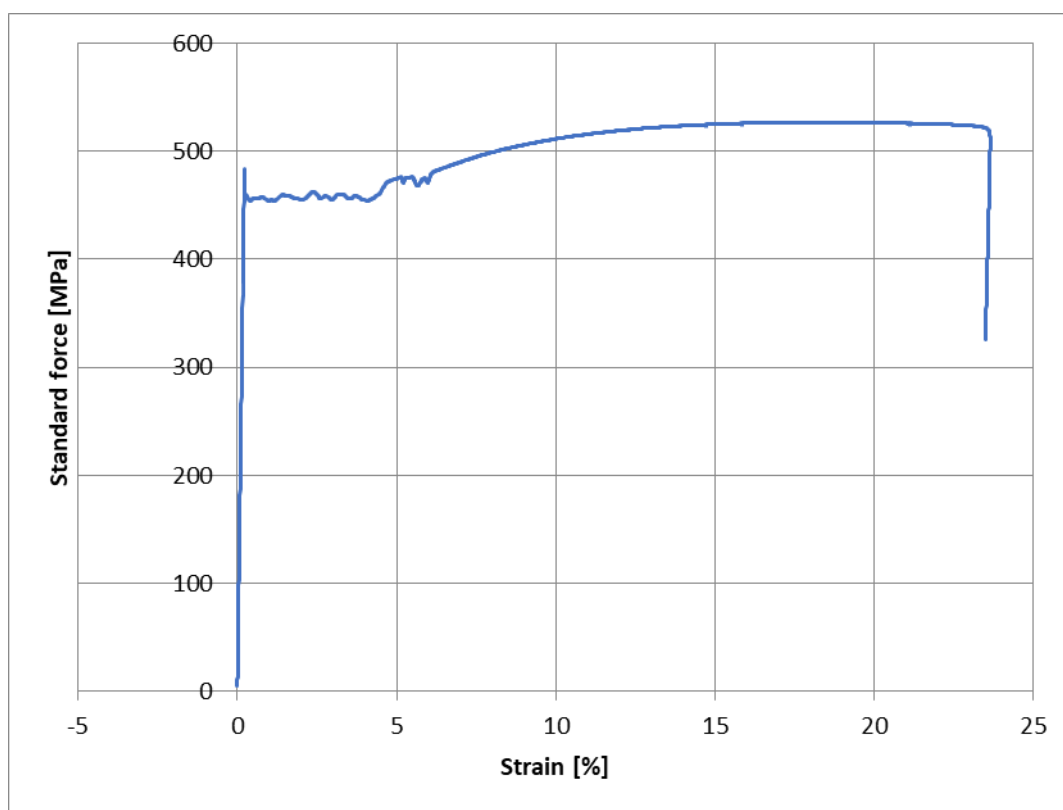
### 6.3.2. Uzorak br. 2 ispitan na minimalne brzine

Tablica 13. prikazuje mehanička svojstva za drugi od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na minimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 13. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>gt</sub> [%]
Ø8 -8	198	479	583	12,58

Dijagram naprezanje-deformacija za drugi od tri vlačno ispitana uzorka prema minimalnim brzinama prikazan je na slici 29.



Slika 29 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka MIN2

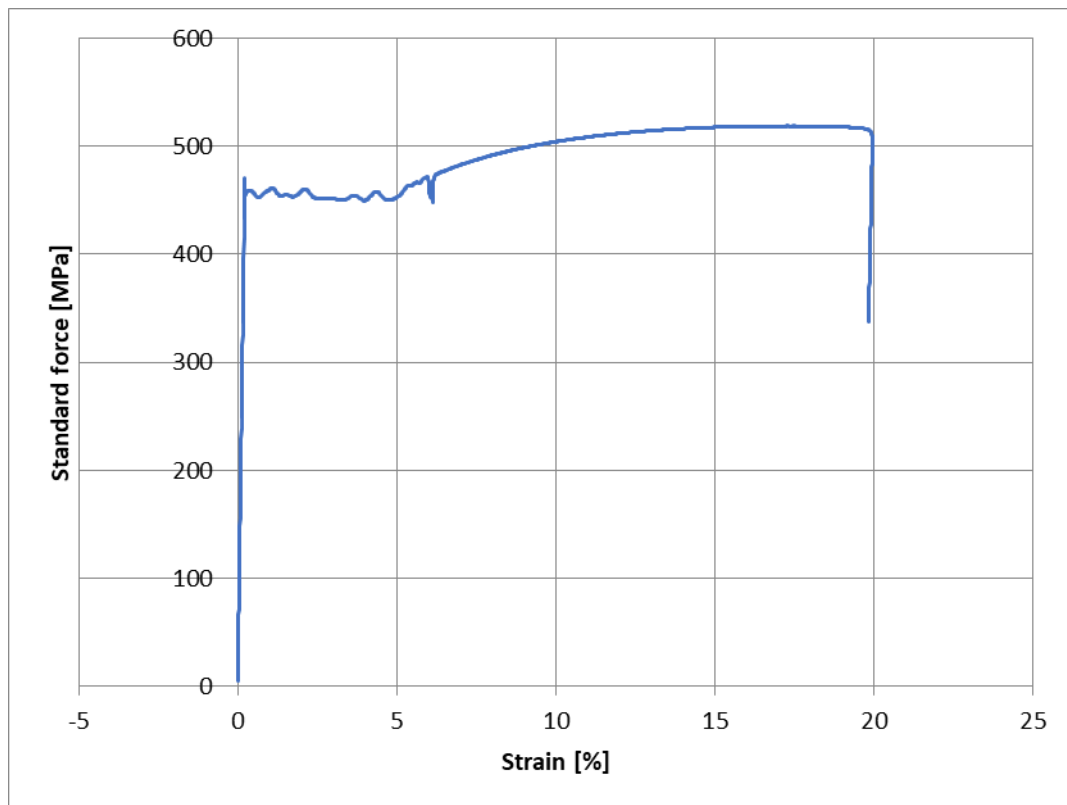
### 6.3.3. Uzorak br. 3 ispitan na minimalne brzine

Tablica 14. prikazuje mehanička svojstva za treći od tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na minimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 14. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -9	197	482	587	15,86

Dijagram naprezanje-deformacija za treći od tri vlačno ispitana uzorka prema minimalnim brzinama prikazan je na slici 30.



Slika 30 Dijagram naprezanje-deformacija uzorka MIN3

### 6.3.4. Svi rezultati ispitanih uzoraka

Tablica 15. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za sva tri uzorka čelika za armiranje koja su ispitana na minimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 15. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

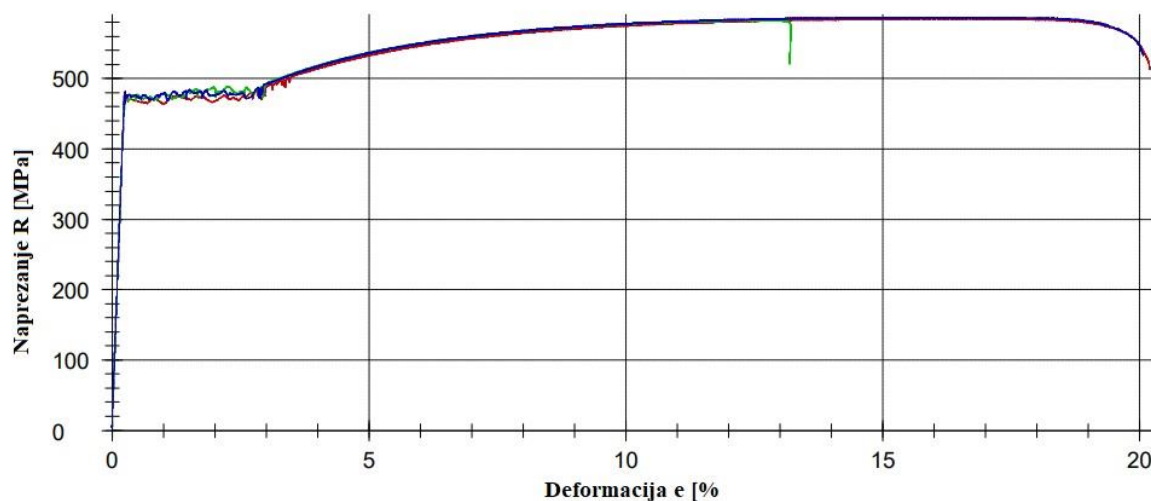
UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
Ø8 -7	197	481	586	16,09
Ø8 -8	198	479	583	12,58
Ø8 -9	197	482	587	15,86

Osnovne parametre statističke obrade rezultata tri vlačno ispitana uzorka armature prikazuje tablica 16. U njoj se nalaze osnovne statističke veličine.

Tablica 16. Osnovni statistički parametri

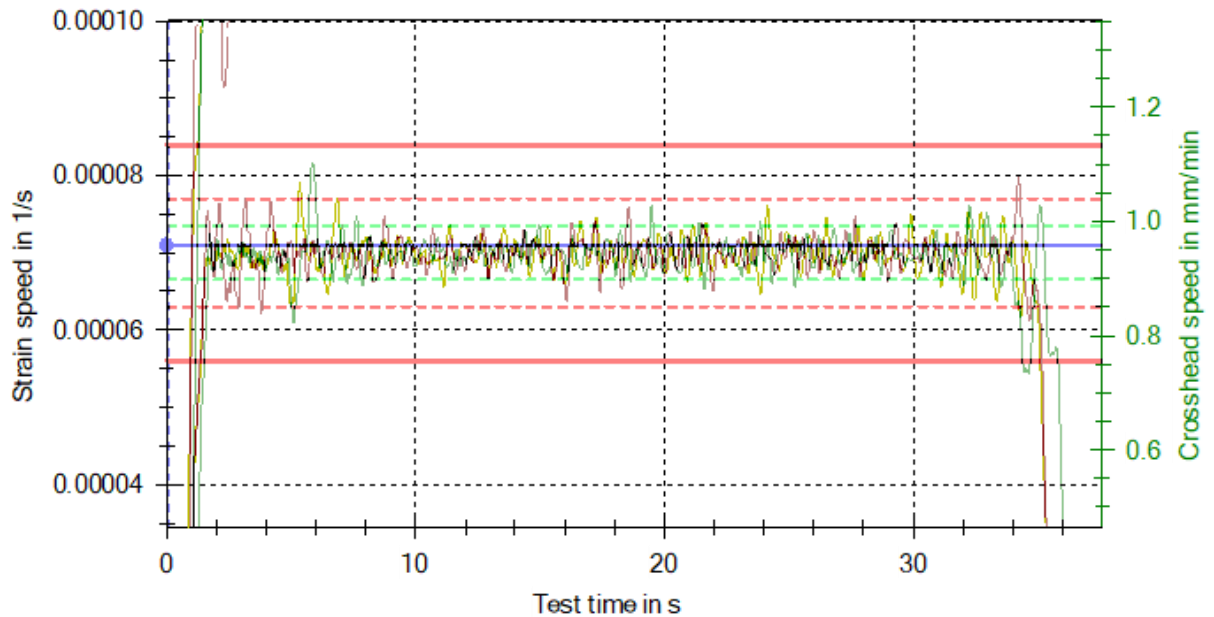
n=3	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
$\bar{x}$	197	481	585	14,84
s	1	1	2	1,96
v [%]	0,29	0,29	0,33	13,23

Dijagram naprezanje-deformacija za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 31.



Slika 31 Dijagram naprezanje-deformacija za sva tri uzorka- MIN

Dijagram brzina deformacije( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja ( $t$ ) za ispitane uzorke prema minimalnim brzinama prikazan je na slici 32.



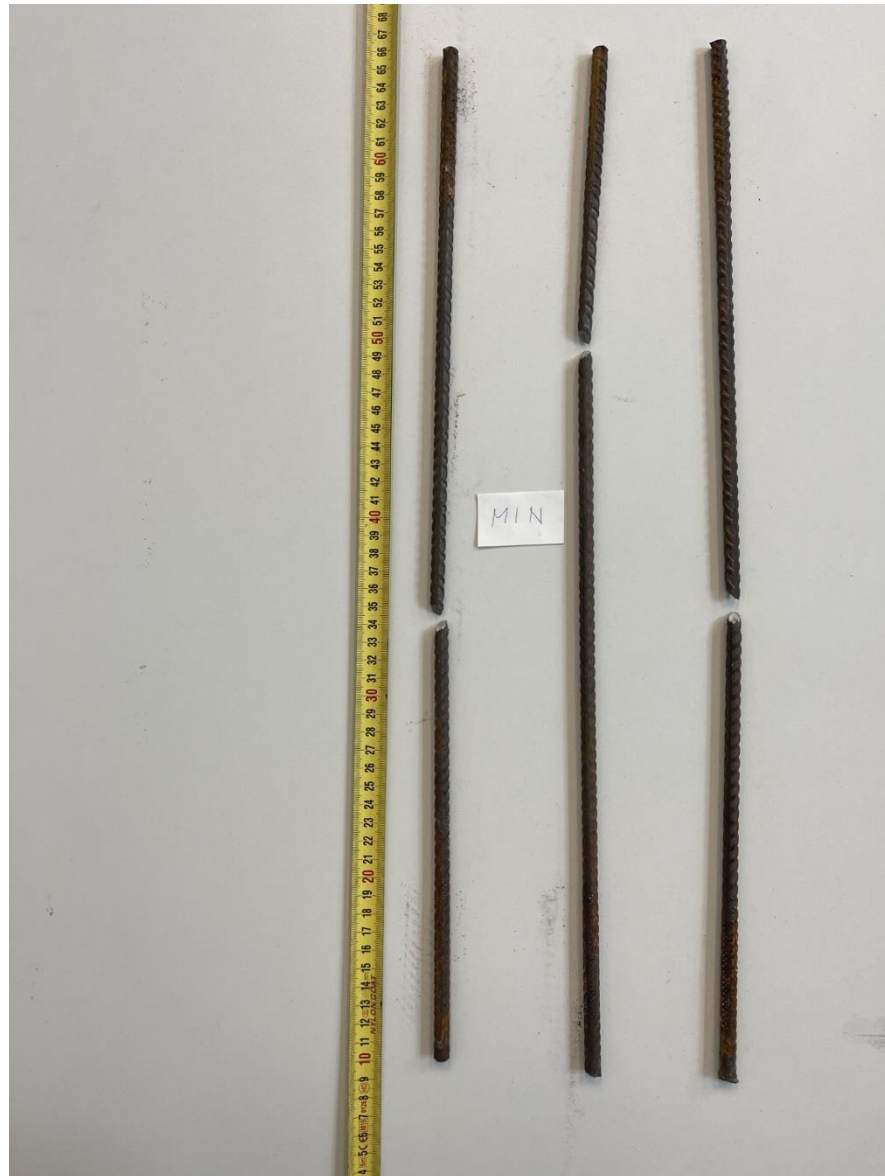
Slika 32 Dijagram brzina deformacije( $\dot{\epsilon}_{L_e}$ )-vrijeme ispitivanja ( $t$ )

Prilikom ispitivanja na minimalne brzine do pucanja je dolazilo u gornjoj zoni hidraulične čeljusti kod 1. i 3. uzorka, a u gornjoj zoni kod 2. uzorka. Slike 33. i 34. prikazuju uzorke prije ispitivanja na minimalnim brzinama i uzorke nakon ispitivanja.



*Slika 33 Uzorci prije vlačnog ispitivanja na minimalnim brzinama*





*Slika 34 Uzorci nakon vlačnog ispitivanja na minimalnim brzinama*

#### 6.4. Svi rezultati – objedinjeno

Tablica 17. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za svih devet uzoraka čelika za armiranje koja su ispitana na preporučenim, maksimalnim i minimalnim brzinama. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 17. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

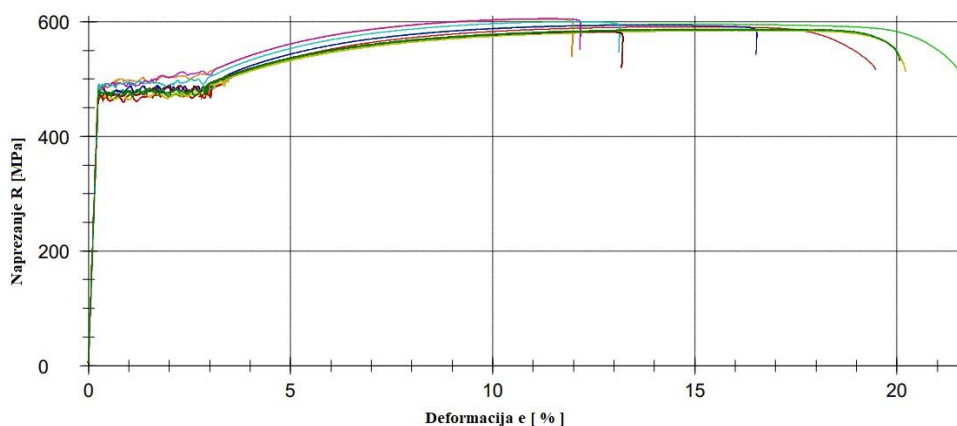
UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
G-6892 A2-1	199	479	591	15,01
G-6892 A2-2	184	485	596	14,66
G-6892 A2-3	201	487	594	13,92
G-X1	201	490	605	11,24
G-X2	189	490	606	11,34
G-X4	192	491	600	12,19
G-X8	197	481	586	16,09
G-X16	198	479	583	12,58
G-X32	197	482	587	15,86

Osnovne parametre statističke obrade rezultata devet vlačno ispitanih uzorka armature prikazuje tablica 18. U njoj se nalaze osnovne statističke veličine.

Tablica 18. Osnovni statistički parametri

n=9	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
$\bar{x}$	195	485	594	13,65
s	6	5	8	1,88
v [%]	2,96	1,01	1,37	13,75

Dijagram naprezanje-deformacija za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 35.



Slika 35 Dijagram naprezanje-deformacija za svih devet ispitanih uzoraka

Prema usporedbi rezultata ispitivanja vidljivo je da se kod većih brzina povećavala otpornost materijala na deformaciju. Granice elastičnosti i tečenja, te vlačna čvrstoća materijala se povećavaju proporcionalno sa brzinom nanošenja opterećenja. Bitno je naglasiti da je korišteni čelik za ispitivanje B500, iako je vidljivo u rezultatima da je granica popuštanja uvijek bila ispod 500MPa. U odnosu na rezultate zaključuje se da su rezultati slični bez obzira na maksimalne, minimalne i preporučene brzine. Sve brzine ispitivanja bile su u strogim granicama  $\pm 20\%$  za sve uzorke unutar 10 sekundi.

## 6.5. Drugo ispitivanje – okrugla glatka čelična šipka

U laboratoriju je na kitalici *Zwick Z 600E* izvršeno dodatno ispitivanje. Za ispitivanje je pripremljeno 9 uzoraka glatke čelične šipke promjera 8mm i duljine 500mm kao u prethodnom ispitivanju. Šipke su obični okrugli čelik koji nije namijenjen za armiranje. Ispitivanje je provedeno prema pravilima norme ISO 6892 A2 na 3 uzorka, dok je ostalih 6 uzoraka, od kojih je po jedan uzorak predviđen za svaku brzinu, ispitano na većim brzinama kako bi se vidjelo koje će se promjene dogoditi kada se poveća brzina.

### 6.5.1. Ispitivanje prema normi ISO 6892 A2

Prema pravilima norme ISO 6892 A2 provedeno je ispitivanje na šipkama običnog okruglog glatkog čelika. U tablici 19. prikazane su korištene brzine za 3 uzorka ispitana prema normi ISO 6892 A2.

Tablica 19. Korištene brzine ispitivanja

TIP KONTROLE ISPITIVANJA	BRZINE DEFORMACIJE
Kontrola deformacije - Područje I	$\dot{\epsilon}_{Le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$
Kontrola pomaka -Područje II	$\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$
Kontrola pomaka -Područje III	$\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$

Tablica 20. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za sva tri uzorka glatke čelične šipke koja su ispitana na brzinama navedenim u tablici 19. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

Tablica 20. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

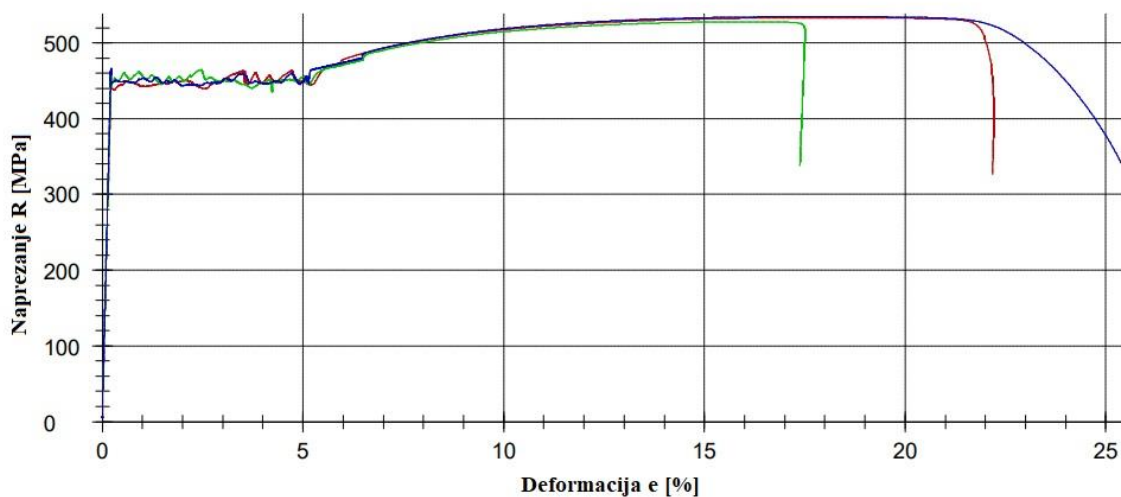
UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
G-6892 A2-1	207	457	533	18,29
G-6892 A2-2	209	464	528	16,14
G-6892 A2-3	209	466	535	17,87

Osnovne parametre statističke obrade rezultata tri vlačno ispitana uzorka glatke čelične šipke prikazuje tablica 21. U njoj se nalaze osnovne statističke veličine.

Tablica 21. Osnovni statistički parametri

n=3	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
$\bar{x}$	208	462	532	17,44
s	1	5	4	1,14
v [%]	0,57	1,02	0,68	6,53

Dijagram naprezanje-deformacija za ispitane uzorke prema preporučenim brzinama prikazan je na slici 36.



Slika 36 Dijagram naprezanje-deformacija za sva tri ispitana uzorka

### 6.5.2. Ispitivanje glatkih okruglih čeličnih šipki na veće brzine

U nastavku je opisano ispitivanje glatkih čeličnih šipki na većim brzinama deformacije. U pravilu se za svaku brzinu koriste po tri uzorka ali se za potrebe rada koristio po jedan uzorak za svaku brzinu. U tablici 22. prikazane su korištene brzine za 6 uzoraka ispitanih sa povećanim brzinama, za svaku je brzinu korišten po jedan uzorak.

Tablica 22. Brzine korištene za ostale uzorke

povećanje brzine	brzina deformacije
x1	0,00025
x2	0,00050
x4	0,00100
x8	0,00200
x16	0,00400
x32	0,00800

Tablica 23. prikazuje objedinjeno mehanička svojstva za svih 6 uzoraka glatke čelične šipke koja su ispitana na brzinama prema normi ISO 6892 A2 iz tablice 19. i većim brzinama navedenim u tablici 22. Prikazana su samo ona svojstva koja su potrebna za analizu i proračun armirano-betonskih konstrukcija.

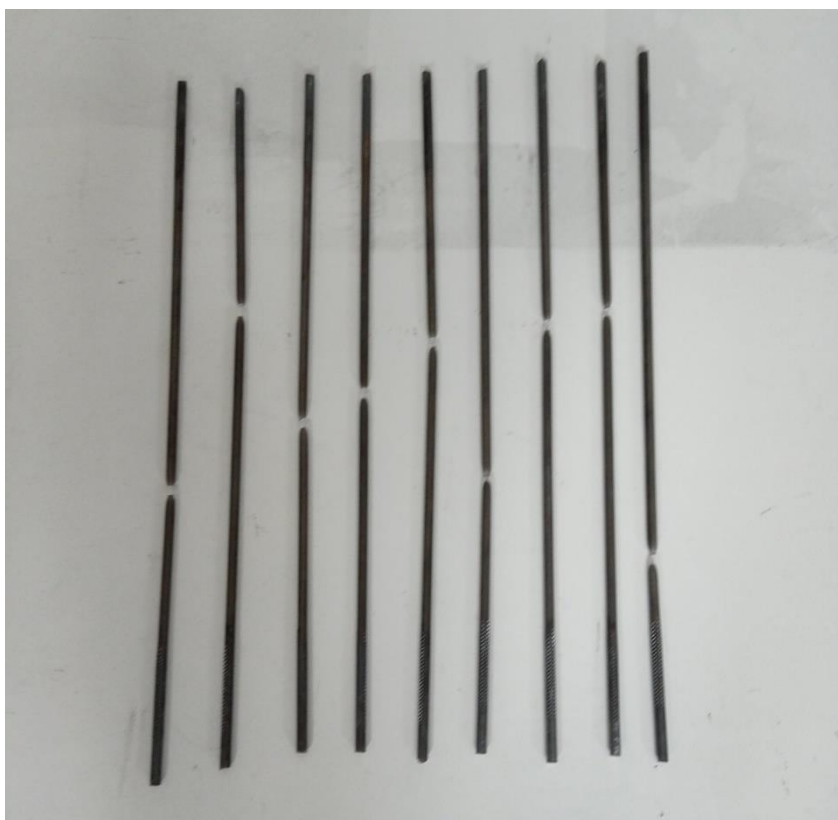
Tablica 23. Bitnija mehanička svojstva čelika za armiranje

UZORAK	E [GPa]	R <sub>eH</sub> [MPa ]	R <sub>m</sub> [MPa ]	A <sub>gt</sub> [ % ]
G-X1	199	445	509	20,43
G-X2	219	464	526	19,07
G-X4	211	463	524	16,47
G-X8	213	481	521	18,16
G-X16	210	484	527	18,41
G-X32	214	471	519	17,27

Slike 37. i 38. prikazuju uzorke prije ispitivanja i uzorke nakon ispitivanja.



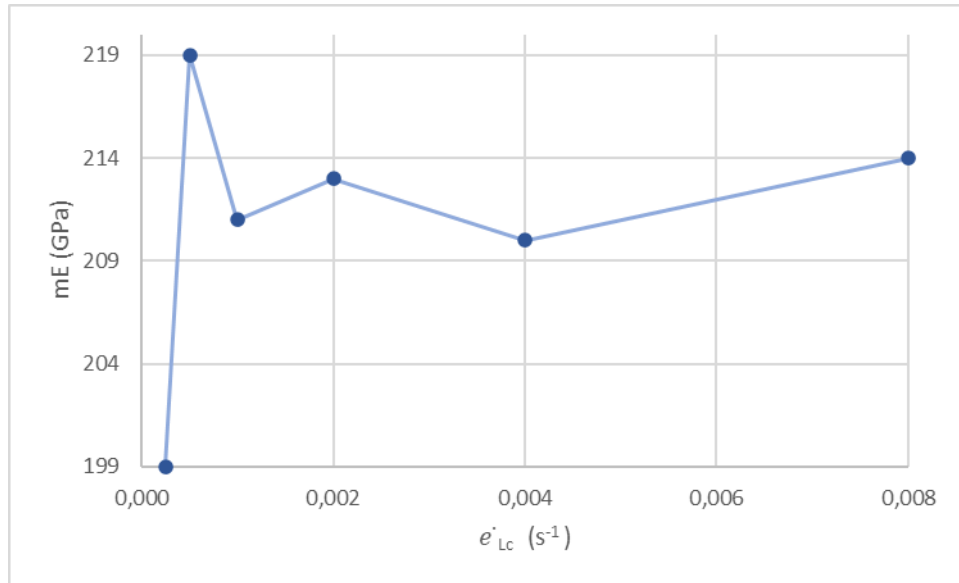
*Slika 37 Uzorci prije ispitivanja*



*Slika 38 Uzorci nakon ispitivanja*

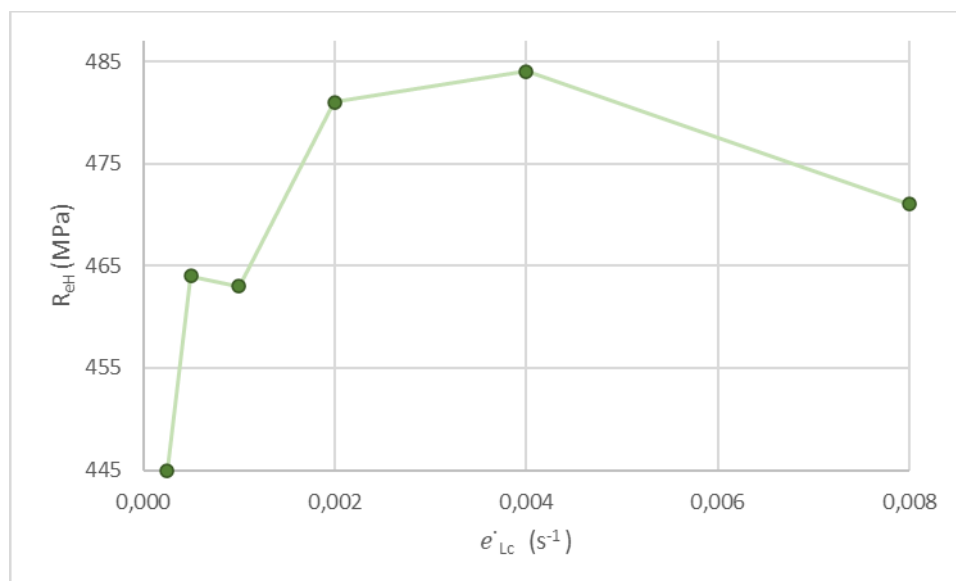
### 6.5.3. Dijagrami

Na slici 39. prikazan je dijagram modul elastičnosti-brzina deformacije, u kojem su prikazane promjene modula elastičnosti pri promjenama brzine. Pri prvom manjem povećanju brzine došlo je do porasta elastičnosti, pri većem povećanju brzine smanjuje se modul elastičnosti, te nakon toga ponovno raste.



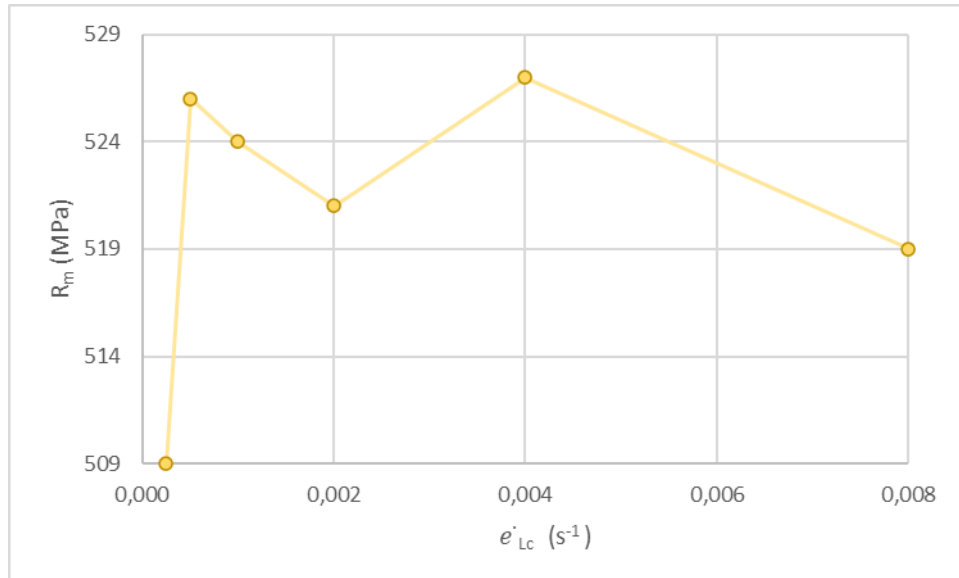
Slika 39 Dijagram  $mE - \dot{\epsilon}_{Lc}$

Na slici 40. prikazan je dijagram gornja granica popuštanja-brzina deformacije, u kojem su prikazane promjene granice popuštanja pri promjenama brzine. Pri povećanju brzine povećala se granica popuštanja ali se kod najveće brzine ponovno smanjila.



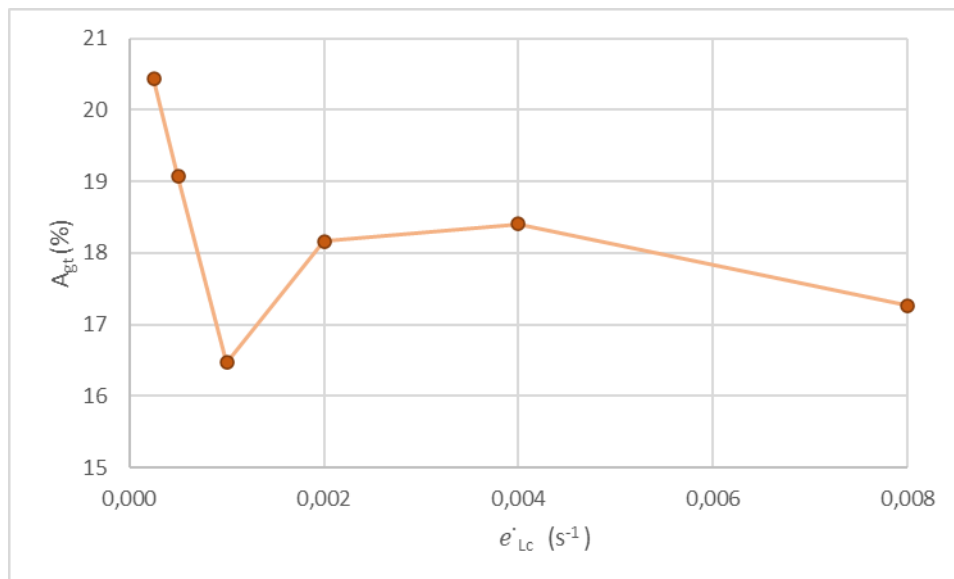
Slika 40 Dijagram  $ReH - \dot{\epsilon}_{Lc}$

Na slici 41. prikazan je dijagram vlačna čvrstoća-brzina deformacije, u kojem su prikazane promjene vlačne čvrstoće pri promjenama brzine. Pri prvom povećanju brzine povećala se vlačna čvrstoća, u narednim povećanjima došlo je do smanjenja vlačne čvrstoće osim na brzini  $0,004\text{s}^{-1}$  gdje dostiže maksimum, te se ponovno smanjuje.



Slika 41 Dijagram  $R_m - \dot{\epsilon}_{Lc}$

Na slici 42. prikazan je dijagram deformacija-brzina deformacije, u kojem su prikazane promjene deformacija pri promjenama brzine. Pri prvoj brzini deformacija je bila najveća, dok se sa povećanjem brzine postotak deformacije smanjivao, pri većem povećanju je došlo do manjeg porasta deformacije ali se u narednim porastima brzine ponovno smanjivala deformacija.



Slika 42 Dijagram  $A_{gt} - \dot{\epsilon}_{Lc}$



## 7. NAČINI OZNAČAVANJA U NORMAMA

Kod označavanja Norme HRN EN ISO 15630-1:2010 [1], HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] i HRN EN 10080:2012 [11] (Čelik za armiranje betona- Zavarljivi čelik za armiranje – Općenito) imaju izrazitu sličnost, tj. Gotovo identičan način označavanja.

Kod betonskih konstrukcija i njihovog projektiranja u većini slučajeva koriste se norme sa različitim načinima označavanja kada se usporede sa normama iz ovog ispitivanja. U Hrvatskoj se za projektiranje betonskih konstrukcija koristi norma HRN EN 1992-1-1:2013 [12]. Za usporedbu oznaka u gore navedenim normama koristit će se tablica iz norme HRN EN 10080:2012 [11] kojom su prikazane usporedbe načina označavanja. Tablica 24.

*Tablica 24. Usporedba s oznakama prema normama*

Naziv	HRN EN 10080:2012 [12]	HRN EN 1992-1-1:2013 [13]
Granica popuštanja	$R_e$	$f_y$
Granica popuštanja pri trajnoj deformaciji 0,2%	$R_{p0,2}$	$f_{p0,2}$
Vlačna čvrstoća	$R_m$	$f_t$
Odnos vlačna čvrstoća/granica popuštanja	$R_m/R_e$	$f_t/f_y$
Ukupna deformacija pri najvećoj sili izražena u	$A_{gt}$	$\epsilon_u$
Nazivni promjer	d	$\emptyset$

## 8. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada je prikazati i objasniti postupak ispitivanja armaturnih šipki na vlačna naprezanja, te prikazati promjene u rezultatima u odnosu na promjene brzine deformacije na kojima se temeljilo ispitivanje. Preporukom iz norme HRN EN ISO 6892-1:2016 [2] za vlačno ispitivanje koristi se metoda A1 koja je detaljno opisana ovim radom. Također postoje i metode A2 i B koje u ovom radu nisu korištene, te fokus nije bio na njima nego na korištenoj metodi A1. Metoda A1 je preporučena radi mogućnosti uporabe kontrole brzine deformacije do same granice popuštanja, a uz to se ispitivanje provodi prema strogim granicama tolerancije brzina koja je  $\pm 20\%$ .

Ispitivanje je izvršeno u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci u kojem se nalazi kidalica sa potrebnom opremom, oprema za pripremu željeza za ispitivanje i računalo za praćenje napretka ispitivanja uzorka, promjena na uzorku, te samih rezultata ispitivanja. Sva oprema je odgovarajuća i u potpunosti ispunjava zahtjeve uvjetovane normom HRN EN ISO 6892-1:2016 [2].

Trajanje ispitivanja ovisi o korištenoj brzini, te je za svaki uzorak bilo individualno. Od samog postavljanja uzorka i pokretanja kidalice praćen je napredak sve do granice popuštanja-loma šipke. Tako je kod preporučenih i minimalnih brzina do pucanja dolazilo nešto sporije nego kod maksimalnih brzina. Kod maksimalnih brzina do loma je dolazilo relativno brzo i pucanje se događalo u gornjoj zoni, dok se kod minimalnih i preporučenih brzina pucanje događalo u sredini ili u donjoj zoni armaturne šipke.

Prema usporedbi rezultata možemo zaključiti da je kod velikih brzina nanošenja opterećenja materijal povećao mehaničke karakteristike. Dakle granica elastičnosti raste proporcionalno sa brzinom nanošenja opterećenja, kao i granica tečenja i vlačna čvrstoća materijala. Kao što je vidljivo u tablicama rezultata, na velikim brzinama vlačna čvrstoća ima najviše vrijednosti u odnosu na preporučene i minimalne brzine, gdje su vrijednosti vlačne čvrstoće najmanje kod minimalne brzine nanošenja opterećenja, a srednje kod preporučenih brzina.

## 9. LITERATURA

- [1] HZN: HRN EN ISO 15630-1:2010 Čelik za armiranje i prednapinjanje betona- Metode ispitivanja- 1. dio: Armaturne šipke, valjana žica i žica, 2010.
- [2] HZN: HRN EN ISO 6892-1:2016: Metalni materijali- Vlačno ispitivanje- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi, 2016.
- [3] ISO 6892-1:2016 Ambient Tensile Testing of Metallic Materials, <https://www.instron.com/-/media/literature-library/whitepapers/2016/04/iso6892.pdf> , 26.06.2023.
- [4] Cuculić, M., Mrakovčić, S., Jagodnik, V., Smolčić, Ž., Travaš, V: Potencijali istraživačkog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci, *ZAJEDNIČKE TEME - Sabor hrvatskih graditelja 2016*, Cavtat, pp. 953-962, 2016.
- [5] HZN: HRN EN ISO 7500-1:2007/Ispr.1:2009.(2009) Metalni materijali- Provjeravanje statičkih jedno osnih ispitnih uređaja- 1. dio: Ispitni uređaji za zatezanje/kompresiju- Provjeravanje i umjeravanje sustava za mjerenje sile, 2009.
- [6] HZN: EN ISO 9513:2012. (2012) Metalni materijali – Umjeravanje ekstenzimetara koji se upotrebljavaju u jednoosnome ispitivanju, 2012.
- [7] TestXpert II: Instruction Manual. Version 2.2, ZwickGmbH&Co.
- [8] Smolčić, Ž., Šćulac, P.: Tlačno ispitivanje kapitela stupa iz palače Moise u Cresu, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 21 (2018), pp. 133-143, doi: 10.32762/zr.21.1.8.
- [9] Universal oven Memmert UF260, <https://www.memmertusa.com/Content/files/Manuals/DataSheets/UF260.pdf>, 27.08.2023.
- [10] KISTOCK DATALOGGER HVAC range: KTT310, <http://kimo.vn/datalogger-ghi-nhiet-do-ktt310.htm>, 27.08.2023.
- [11] HZN: HRN EN 10080:2012 Čelik za armiranje betona- Zavarljivi čelik za armiranje - Općenito, 2012.

[12] HZN: HRN EN 1992-1-1:2013 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010), 2013.