

Proračun nosivosti stupa od lijevanog željeza

Bogdanić, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:157:708589>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



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**

Marija Bogdanić

Proračun nosivosti stupa od lijevanog željeza

Završni rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni preddiplomski studij
Građevinarstvo
Osnove čeličnih konstrukcija**

**Marija Bogdanić
JMBAG: 0114033819**

Proračun nosivosti stupa od lijevanog željeza

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom 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.

Marija Bogdanić

U Rijeci, 14. rujna 2022.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici doc.dr.sc. Paulini Krolo dipl.ing.građ na iskazanome razumijevanju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se Gradu Rijeci koji je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci donirao stupove od lijevanog željeza iz prostora nekadašnjeg industrijskog kompleksa Rikard Benčić u Rijeci, te time omogućio provedbu laboratorijskih ispitivanja predstavljenih u ovom radu.

SAŽETAK

Tvrdoća, kao važno mehaničko svojstvo materijala, je polazišna točka ovoga završnog rada, ispitana je na uzorcima stupova od lijevanog željeza prijenosnim uređajem za ispitivanje tvrdoće Krautkramer MIC 20 u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci. Kao metoda ispitivanja odabrana je metoda odskoka. Na temelju rezultata ispitivanja tvrdoće, proveden je izračun čvrstoće materijala i nosivosti stupova od lijevanog željeza te je napravljena usporedba s nosivosti stupova od čelika klase S275. Lijevano željezo, unatoč svom krutom ponašanju, ima zadovoljavajuću čvrstoću što omogućuje njegovu daljnju primjenu.

KLJUČNE RIJEČI: tvrdoća, ispitivanje tvrdoće, metoda odskoka, lijevano željezo, čelik S275, stup

ABSTRACT

Hardness, as an important mechanical property of the material, is the starting point of this final work, was tested on cast iron columns specimens using the Krautkramer MIC 20 portable hardness test device in the Structure Laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. The rebound method was chosen as the test method. Based on the hardness test results, the material strength and load capacity of cast iron columns were calculated and compared with the load capacity of S275 class steel columns. Despite its brittle behavior, cast iron has sufficient strength which enables its further application.

KEY WORDS: hardness, hardness test, rebound method, cast iron, steel S275, column

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE	4
2.1. Oblik i dimenzije uzoraka.....	4
2.2. Ispitivanje tvrdoće materijala.....	5
2.3. Metoda odskoka.....	5
2.4. Tijek ispitivanja	7
3. REZULTATI ISPITIVANJA	11
4. IZRAČUN ČVRSTOĆE	17
5. IZRAČUN NOSIVOSTI STUPOVA.....	20
5.1. Izračun nosivosti stupa od lijevanoga željeza.....	21
5.2. Izračun nosivosti stupa od čelika klase S275.....	25
5.3. Usporedba nosivosti stupova od lijevanog željeza i čelika klase S275	29
6. ZAKLJUČAK.....	31
7. LITERATURA	32

POPIS TABLICA

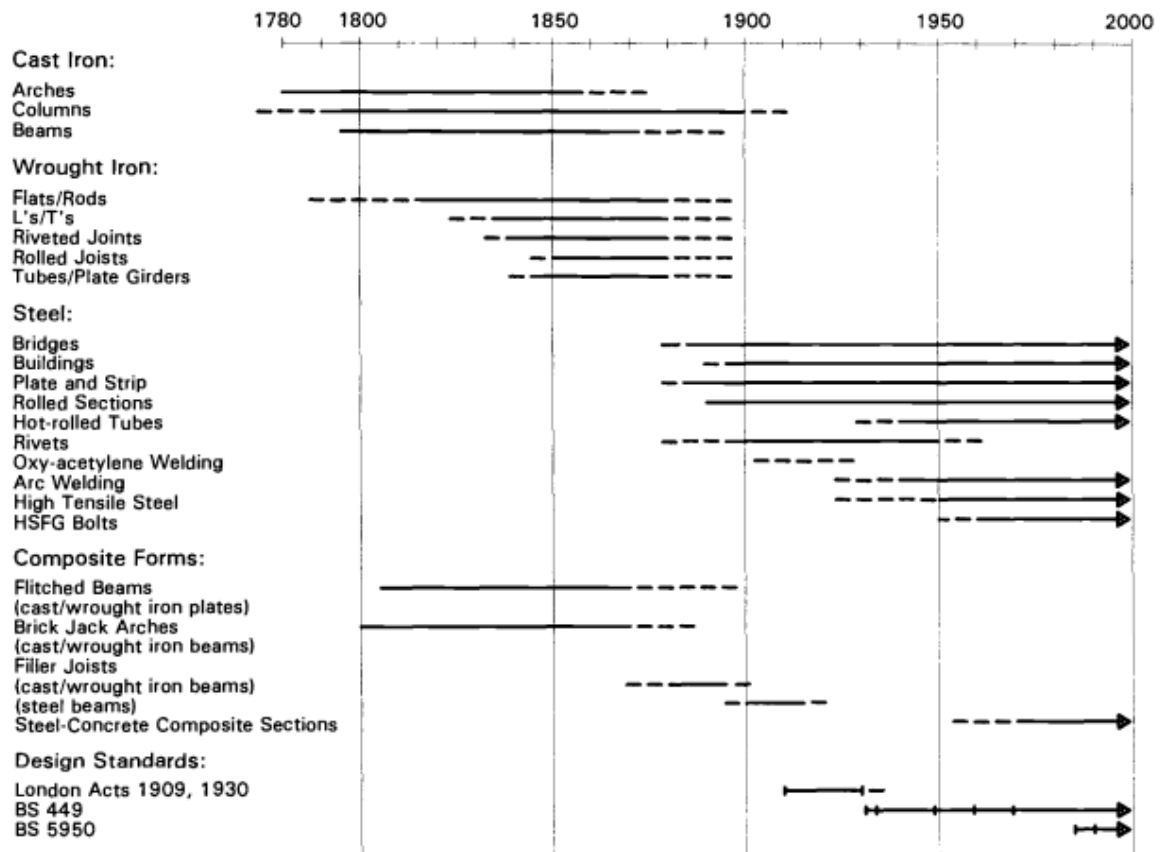
<i>Tablica 1: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_1</i>	11
<i>Tablica 2: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_2</i>	11
<i>Tablica 3: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_3</i>	11
<i>Tablica 4: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_4</i>	12
<i>Tablica 5: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak B</i>	12
<i>Tablica 6: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_1</i>	12
<i>Tablica 7: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_2</i>	13
<i>Tablica 8: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_3</i>	13
<i>Tablica 9: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_4</i>	13
<i>Tablica 10: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak C</i>	13
<i>Tablica 11: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_1</i>	14
<i>Tablica 12: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_2</i>	14
<i>Tablica 13: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_3</i>	14
<i>Tablica 14: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_4</i>	15
<i>Tablica 15: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak D</i>	15
<i>Tablica 16: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_1</i>	15
<i>Tablica 17: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_2</i>	15
<i>Tablica 18: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_3</i>	16
<i>Tablica 19: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_4</i>	16
<i>Tablica 20: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak E</i>	16
<i>Tablica 21: Prikaz srednje izmjerene vrijednosti tvrdoće materijala uzoraka</i>	17

POPIS SLIKA

Slika 1: Glavna razdoblja građevinske uporabe lijevanoga te kovanoga željeza i čelika [1]	1
Slika 2: Detalj otiska na stupu iz 1899. godine [4].....	2
Slika 3: Razmještaj stupova unutar Dječje kuće [4].....	3
Slika 4: Stupovi od lijevanoga željeza.....	4
Slika 5: Oblik i dimenzije stupa od lijevanoga željeza.....	5
Slika 6: Presjek udarnog mehanizma [6].....	6
Slika 7: Shematski prikaz tijeka naponskog signala prije i nakon udara [6].....	6
Slika 8: Prikaz osnovne opreme uređaja Krautkramer MIC 20 [10].....	7
Slika 9: Stup A zahvaćen korozijom nepovoljan za provedbu ispitivanja	8
Slika 10: Prikaz mjernog mjesta pripremljenog za ispitivanje	8
Slika 11: Prikaz opreme za umjeravanje uređaja.....	9
Slika 12: Prikaz uzorka E i jednog mjernog mjesta.....	10
Slika 13: Patersson - Iske dijagram [8].....	17
Slika 14: Kolo dijagram [8]	18
Slika 15: Dijagram odnosa sile F i izduženja ΔL lijevanoga željeza i čelika [11]	19
Slika 16: Tlačno opterećenje nanoseno na stup	20
Slika 17: Poprečni presjek stupa.....	20
Slika 18: Kritične duljine izvijanja [9]	23
Slika 19: Ugradnja nove unutarnje ispune u postojeće stupove [4]	30

1. UVOD

U posljednjih nekoliko stoljeća mogućnosti primjene lijevanog željeza u graditeljstvu bile su raznovrsne. Tako je lijevano željezo svoju primjenu dobilo i pri izradi različitih stupova te greda, korištenih prvenstveno u tvornicama tekstila i skladištima od 1800. godine (Slika 1.). Spomenuti elementi nastavljaju koristiti i kasnije, no lijevano željezo tijekom 20. stoljeća sve više biva zamijenjeno materijalima poput kovanoga željeza koji je iskazivao bolja svojstva [1].



Slika 1: Glavna razdoblja građevinske uporabe lijevanoga te kovanoga željeza i čelika [1]

U 19. stoljeću najčešće je korišteno lijevano željezo sivoga lijeva. Za ovaj materijal karakterističan je visoki udio ugljika vrijednosti između 2% i 5%, čime se postiže visoka tlačna čvrstoća [3]. Istovremeno, visoki udio ugljika pridonosi razvitku pukotina čime se zamjetno smanjuje vlačna čvrstoća materijala. Današnja nastojanja poboljšanja svojstava

lijevanoga željeza dovode do materijala legiranog silicijem i magnezijem čime se postiže veća duktilnost te bolja vlačna svojstva.

Primjena stupova od lijevanog željeza u novije vrijeme donosi potrebu za ispitivanjem njihovih mehaničkih svojstava, pogotovo tvrdoće i čvrstoće ne bi li se postiglo saznanje o njihovoj mogućoj nosivosti i ostalim karakteristikama. Ovakva se saznanja posebice dovode u pitanje kada je riječ o projektima rekonstrukcija industrijskih kompleksa i drugih povijesnih građevina.

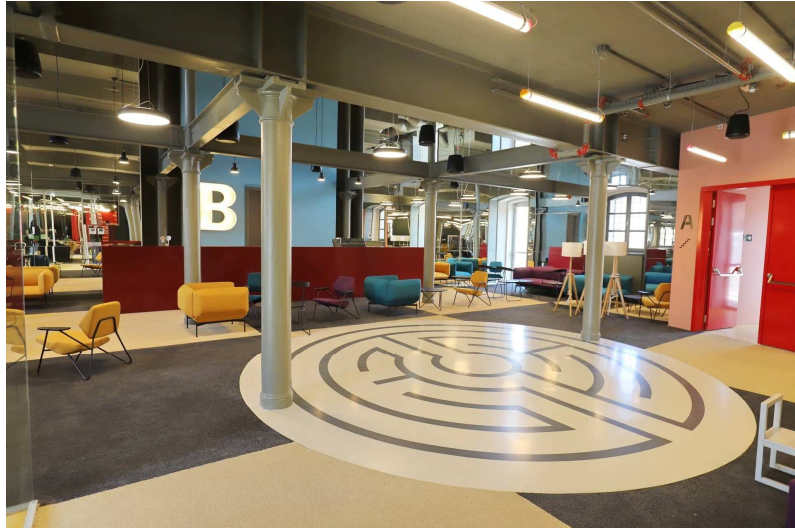
Primjer jednog takvog projekta bio je projekt rekonstrukcije i revitalizacije nekadašnjeg industrijskog kompleksa Rikard Benčić. Projekt započet 2019. godine obuhvaćao je rekonstrukciju Ciglene zgrade i opremanje iste kao Dječje kuće.

Mađarski lijevano-željezni stupovi proizvedeni 1899. godine zbog svoje su unikatnosti uvršteni pod zaštitu konzervatora (Slika 2.).



Slika 2: Detalj otiska na stupu iz 1899. godine [4]

U sklopu projekta, stupovi su uklonjeni iz zgrade, a kasnije je dio stupova saniran ugradnjom nove unutarnje ispune i spojeva te vraćen na predviđena mjesta (Slika 3.) [4].



Slika 3: Razmještaj stupova unutar Dječje kuće [4]

Stupovi koji zbog nedostatne visine nisu vraćeni na svoja mjesta, poslužili su kao eksperimentalni uzorci razmatrani u nastavku ovoga rada. Ispitivanje tvrdoće pružilo je izravnu poveznicu za određivanje čvrstoće materijala stupova, dok je na temelju dobivenih rezultata, proračunata nosivost stupova od lijevanog željeza te uspoređena s nosivošću stupova od čelika standardne kvalitete S275. Ispitivanja tvrdoće provedena su u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

2. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE

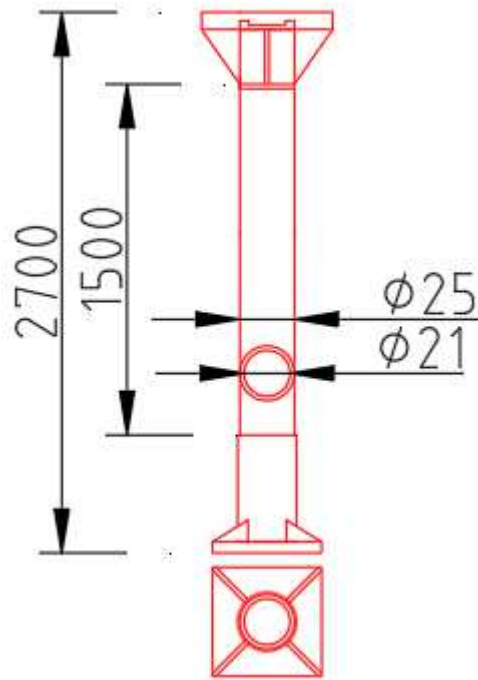
2.1. Oblik i dimenzije uzoraka

Stupovi od lijevanoga željeza razmatrani u ovome radu visine su oko 150 cm (Slika 4.).



Slika 4: Stupovi od lijevanoga željeza

Kružnoga su, prstenastog, poprečnog presjeka. Izmjerama je ustanovljeno da vanjski promjer stupova iznosi 25 cm, dok je unutarnji promjer veličine 21 cm. Debljina stijenke stupova iznosi 20 mm. Iako u stvarnome zdanju stupovi nisu jednakoga oblika duž cijele visine, pretpostavlja se ujednačen, prstenasti poprečni presjek radi pojednostavljenja izvedbe potrebnih mjerenja (Slika 5.).



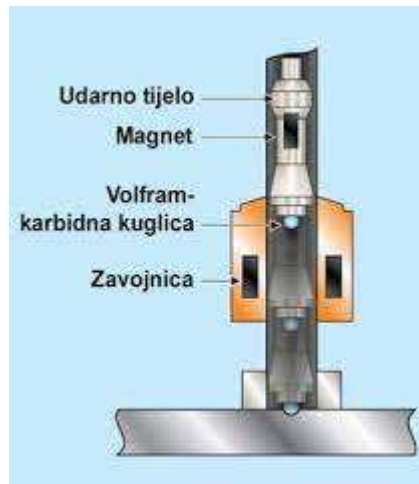
Slika 5: Oblik i dimenzije stupa od lijevanoga željeza

2.2. Ispitivanje tvrdoće materijala

Tvrdoća kao bitno mehaničko svojstvo materijala, definira se kao otpor kojim se jedno tijelo odupire prodiranju drugog, tvrdog tijela u svoju površinu [7]. Ona je, također, pokazatelj jačine veza između atoma promatranog materijala te načina njihovog slaganja unutar kristalne rešetke pri utiskivanju nekog tvrdog tijela. Tvrdoća nije fizikalna veličina te iz toga razloga nema mjernu jedinicu.

2.3. Metoda odskoka

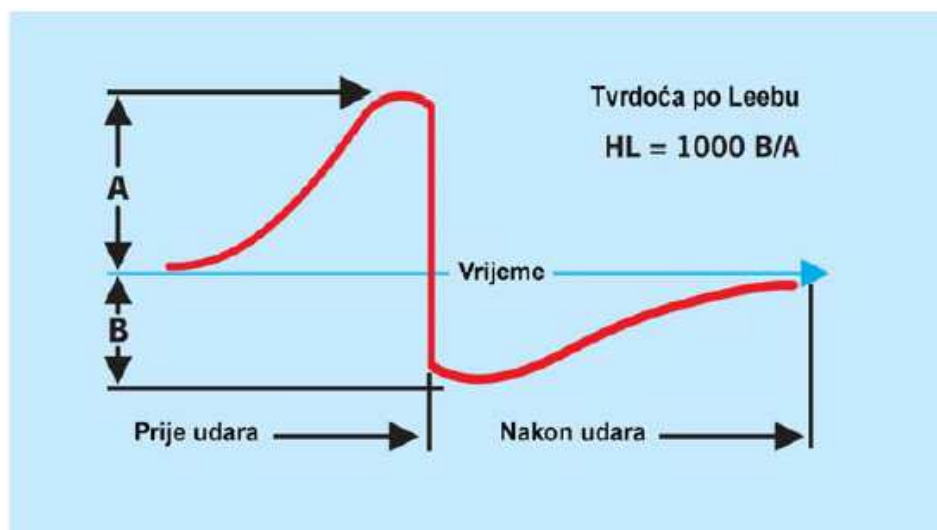
Leeb metoda predstavlja dinamičku metodu ispitivanja tvrdoće koja djeluje na principu odskoka [5]. Ispitivanje tvrdoće ovom metodom provodi se pomoću prijenosnih uređaja, čija je ispitna sonda za metodu odskoka (Rebound method) prikazana na Slici 6.



Slika 6: Presjek udarnog mehanizma [6]

Ova metoda razvijena sredinom 1970-ih, zasniva se na omjeru brzine udarnog tijela nakon udara i prije udara [5]. Veći omjer brzina ukazuje na višu tvrdoću ispitivanih uzoraka.

Princip utvrđivanja tvrdoće ovom metodom, koristeći se prikladnim dijagramom, prikazan je na Slici 7.



Slika 7: Shematski prikaz tijeka naponskog signala prije i nakon udara [6]

Uređaj u ispitivanu površinu izbacuje udarno tijelo pomoću opruge. Udarno tijelo određene mase potrebne za postizanje dostatne kinetičke energije pri udaru, na vrhu sadrži kuglicu određenoga promjera, izrađenu od tvrdoga materijala poput metala, keramike ili dijamanta.

Pri udaru udarno tijelo gubi dio svoje energije, a kao posljedica toga javlja se plastična deformacija ispitivanoga uzorka. Samim time što udarno tijelo gubi kinetičku energiju, ono istovremeno smanjuje i brzinu pri povratku.

Pri ispitivanju uzorka manje tvrdoće, bilježi se veći gubitak brzine. Tako se omjer brzina udarnog tijela nakon udara i prije udara smanjuje te je izmjerena tvrdoća niža [5].

Ova metoda pogodna je za ispitivanja uzoraka veće mase i grublje površine, a minimalna preporučena debljina stijenke ispitivanoga uzorka iznosi 20 mm.

2.4. Tijek ispitivanja

Ispitivanja izvršena na Građevinskome fakultetu Sveučilišta u Rijeci, provedena su prijenosnim uređajem Krautkramer MIC 20 (Slika 8.).



Slika 8: Prikaz osnovne opreme uređaja Krautkramer MIC 20 [10]

Prije provedbe ispitivanja, određena su četiri ispitna uzorka (B, C, D i E) pogodna za provedbu ispitivanja. Valja napomenuti da su za provedbu ispitivanja odabrana svega četiri uzorka koja su u najmanjoj mjeri bila zahvaćena korozijom kako bi rezultati ispitivanja bili što pouzdaniji i točniji (Slika 9.).



Slika 9: Stup A zahvaćen korozijom nepovoljan za provedbu ispitivanja

Ispitni uzorci pripremljeni su za ispitivanje na način da su na svakome od uzoraka određena mjerna mjesta. Zatim su mjerna mjesta označena te pripremljena za ispitivanje brušenjem površina ne bi li se postigla dostatna glatkoća mjerne površine (Slika 10.).



Slika 10: Prikaz mjernog mjesta pripremljenog za ispitivanje

Ispitivanje je započeto provjerom opreme te umjeravanjem uređaja (Slika 11.).

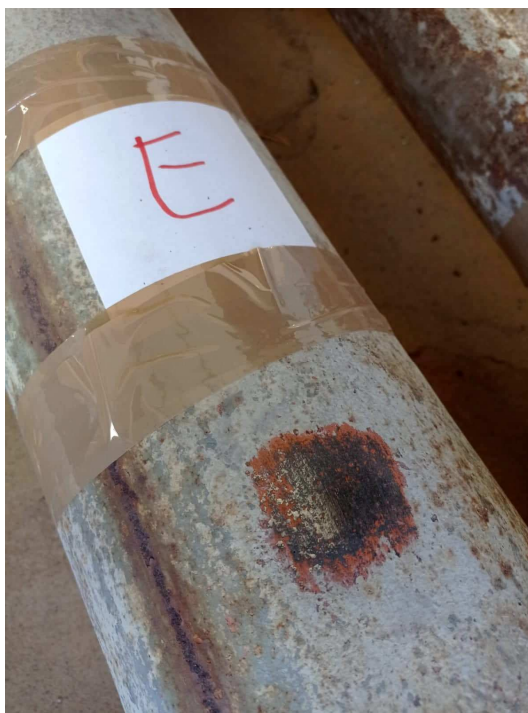


Slika 11: Prikaz opreme za umjeravanje uređaja

Kako bi se umjeravanje uređaja provelo ispravno, najprije je potrebno odabrati željenu vrstu materijala, što omogućuje grubo kalibriranje. Korištene sonde kalibrirane su prema etalonskim pločicama modula elastičnosti (Youngov modul) vrijednosti $E = 210\,000\text{ MPa}$, što omogućuje primjenu sonde za željezne materijale približnih vrijednosti modula elastičnosti bez potrebe za provođenje posebnog kalibriranja.

Ispitivanja su provedena sondom tipa D. Udarni mehanizam za ispitivanje tvrdoće metodom odskoka je Dyna D s penetratorom u obliku 3 mm Volfram – karbidne kuglice čija energija pri udaru iznosi 12 Nmm, a uobičajena primjena ovoga modela je općenito ispitivanje homogenih materijala. Kao materijal odabrano je lijevano željezo sivog lijeva (Gray Cast Iron).

Na svakome uzorku (B, C, D i E) provedena su mjerenja na četiri mjerna mjesta raspoređena od vrha prema dnu stupa, dok je na jednome mjernome mjestu provedeno ukupno pet mjerenja (Slika 12.). Na svakome uzorku provedeno je ukupno dvadeset mjerenja.



Slika 12: Prikaz uzorka E i jednog mjernog mjesta

Po izvršenome mjerenju, na ekranu uređaja vidljivi su podaci o izmjerenim vrijednostima tvrdoće, iskazani u obliku brojčane vrijednosti s dodatkom oznake HL. Kada je riječ o vrijednosti tvrdoće po Leebu (HL), nazvanoj po izumitelju metode odskoka D. Leebu, izračun se vrši pomoću omjera povratne i udarne brzine.

Tako se dobivenu tvrdoću može definirati kao [6]:

$$HL = \frac{V_R}{V_1} * 1000 \quad (1)$$

gdje je:

V_R – povratna brzina (brzina nakon udara)

V_1 – udarna brzina (brzina prije udara)

Prednost uređaja jest mogućnost prikaza rezultata u više različitih skala. Iako za to ne postoje pogodne matematičke formule i izrazi, nakon dostatnog broja provedenih ispitivanja empirijski su utvrđene pretvorbene tablice na način da se prethodno odredila tvrdoća određenoga materijala pomoću nekoliko različitih metoda ispitivanja te je na temelju toga utvrđen odnos između pojedinih skala. Tako su rezultati mjerenja dani u nastavku prikazani u HL i HB skali.

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja tvrdoće izmjereni metodom odskoka (rebound method) prikazuju se za četiri uzorka (B, C, D i E) sa četiri mjerna mjesta, dok su na temelju rezultata dobivenih za svako pojedino mjerno mjesto iskazane i srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka za svaki pojedini ispitni uzorak.

Uzorak B

Tablica 1: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_1

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	514	201
2.	503	191
3.	581	262
4.	504	192
5.	527	212
Srednja vrijednost	526	212

Tablica 2: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_2

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	496	185
2.	564	246
3.	644	326
4.	611	291
5.	472	166
Srednja vrijednost	557	243

Tablica 3: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_3

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	510	197
2.	545	228
3.	487	178
4.	525	210
5.	581	262
Srednja vrijednost	530	215

Tablica 4: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – B_4

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	498	186
2.	572	253
3.	559	241
4.	493	182
5.	545	228
Srednja vrijednost	533	218

Tablica 5: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak B

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	526	212
2.	557	243
3.	530	215
4.	533	218
Srednja vrijednost	537	222

Uzorak C

Tablica 6: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_1

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	516	202
2.	535	219
3.	519	205
4.	528	212
5.	535	219
Srednja vrijednost	527	211

Tablica 7: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_2

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	513	200
2.	572	253
3.	544	227
4.	561	243
5.	565	247
Srednja vrijednost	551	234

Tablica 8: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_3

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	530	214
2.	551	233
3.	522	208
4.	526	211
5.	562	244
Srednja vrijednost	538	222

Tablica 9: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – C_4

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	480	172
2.	472	166
3.	479	171
4.	511	198
5.	520	206
Srednja vrijednost	492	183

Tablica 10: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak C

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	527	211
2.	551	234
3.	538	222
4.	492	183
Srednja vrijednost	527	213

Uzorak D

Tablica 11: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_1

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	521	207
2.	557	239
3.	556	238
4.	517	203
5.	542	225
Srednja vrijednost	539	222

Tablica 12: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_2

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	515	202
2.	467	162
3.	520	206
4.	502	190
5.	465	160
Srednja vrijednost	494	184

Tablica 13: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_3

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	498	186
2.	476	169
3.	561	243
4.	489	179
5.	438	139
Srednja vrijednost	492	183

Tablica 14: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – D_4

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	532	216
2.	569	250
3.	560	242
4.	535	219
5.	540	223
Srednja vrijednost	547	230

Tablica 15: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak D

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	539	222
2.	494	184
3.	492	183
4.	547	230
Srednja vrijednost	518	205

Uzorak E

Tablica 16: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_1

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	524	209
2.	549	231
3.	509	196
4.	617	297
5.	515	202
Srednja vrijednost	543	227

Tablica 17: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_2

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	471	165
2.	455	152
3.	476	169
4.	463	158
5.	502	190
Srednja vrijednost	473	167

Tablica 18: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_3

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	471	165
2.	493	182
3.	524	209
4.	512	199
5.	518	204
Srednja vrijednost	504	192

Tablica 19: Rezultati ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – E_4

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	499	187
2.	498	186
3.	545	228
4.	586	266
5.	618	298
Srednja vrijednost	549	233

Tablica 20: Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće metodom odskoka – Uzorak E

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
1.	543	227
2.	473	167
3.	504	192
4.	549	233
Srednja vrijednost	517	205

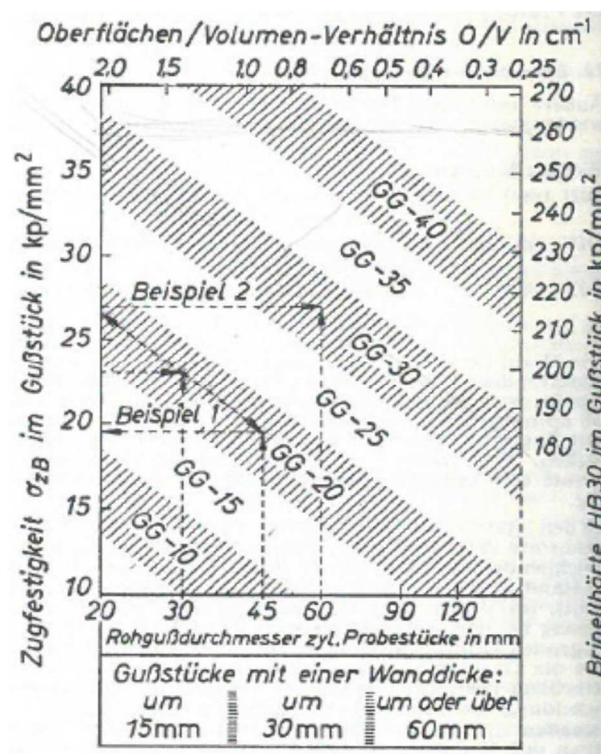
4. IZRAČUN ČVRSTOĆE

S obzirom da se vlačna čvrstoća ne može odrediti ispitivanjem, na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem tvrdoće lijevano – željeznih stupova te izraza i dijagrama (Slika 13. i Slika 14.), usklađenih s DIN EN 1561, proveden je izračun čvrstoće lijevanog željeza prikazan u nastavku.

Za određivanje vlačne čvrstoće materijala uzoraka (B, C, D i E) usvajaju se srednja izmjerena vrijednost tvrdoće materijala kako je prikazano u Tablici 21.

Tablica 21: Prikaz srednje izmjerene vrijednosti tvrdoće materijala uzoraka

Uzorak	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HB
B	537	222
C	527	213
D	518	205
E	517	205
Srednja vrijednost	525	211



Slika 13: Patersson - Iske dijagram [8]

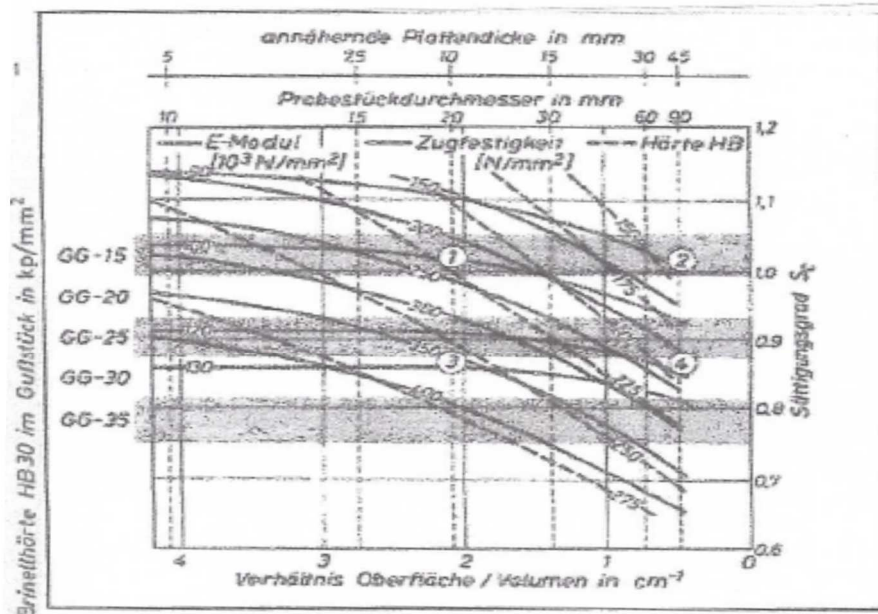


Abb. 11: Verbessertes Betriebschaubild für Grauguss mit Werkstoffbändern nach DIN 1691 (heute DIN EN 1561) nach R. Döpp [16].

Slika 14: Kolo dijagram [8]

Promatrajući prikazane dijagrame odnosa tvrdoće materijala po Brinellu i vlačne čvrstoće materijala prema DIN 1691 (danas DIN 1561), za tvrdoću materijala 211 HB i debljinu stijenke 20 mm očitava se vlačna čvrstoća od približno 257 MPa na Paterson – Iske i Kolo dijagramu, što upućuje na kvalitetu sivoga lijeva oznake po DIN 50150 GG 20.

U literaturi se, također, pronalazi odnos između vlačne čvrstoće i tvrdoće HB izražen kao [8]:

$$R_m = \frac{(HB - 100)}{0,45} \quad (2)$$

Za vrijednost izmjerene čvrstoće 211 HB slijedi:

$$R_m = \frac{(211-100)}{0,45} = 247 \text{ MPa}$$

Vlačna čvrstoća ljevano-željeznih stupova:

$$f_u = 257 \text{ MPa}$$

Za granicu popuštanja f_y usvaja se vrijednost 55% vlačne čvrstoće:

$$f_y = 0,55 * f_u = 0,55 * 257 = 141,35 \text{ MPa} \quad (3)$$

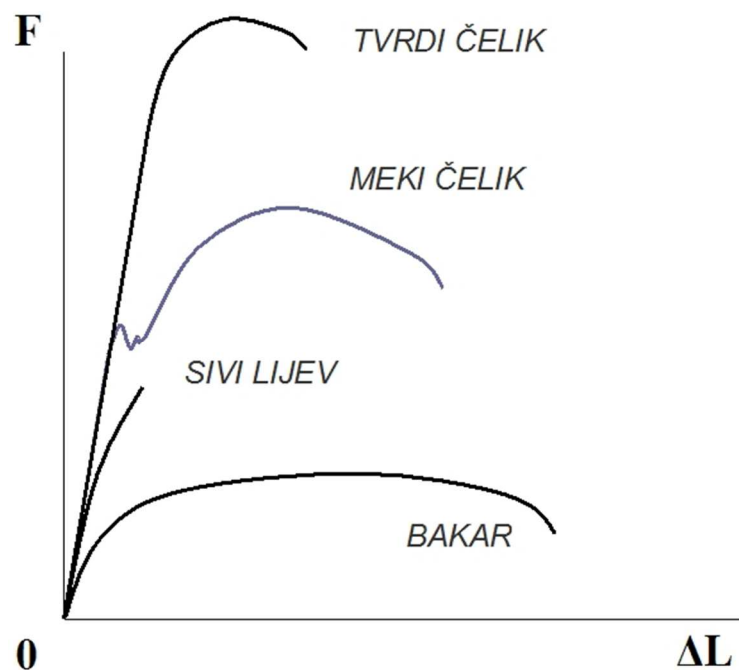
Tlačna čvrstoća lijevano-željeznih stupova:

$$f_u = 2,47 * HB = 2,47 * 211 = 521 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$f_{yc} = 0,55 * f_u = 0,55 * 521 = 287 \text{ MPa} \quad (5)$$

Provođenjem proračuna potvrđeno je da lijevano željezo sivoga lijeva spada u krte materijale čiji je dijagram odnosa sile F i izduženja ΔL dan na Slici 15. Pri tome se vlačna i tlačna čvrstoća uvelike razlikuju. Dok vlačna čvrstoća lijevanoga željeza dobivena proračunom iznosi $f_u = 257 \text{ MPa}$, tlačna čvrstoća prema proračunu dostiže $f_u = 521 \text{ MPa}$.

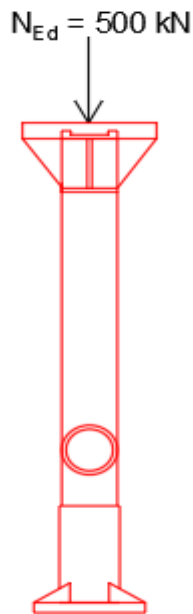
U daljnjem izračunu nosivosti lijevano-željeznih stupova uzete su vrijednosti $f_u = 521 \text{ MPa}$ te $f_{yc} = 287 \text{ MPa}$.



Slika 15: Dijagram odnosa sile F i izduženja ΔL lijevanoga željeza i čelika [11]

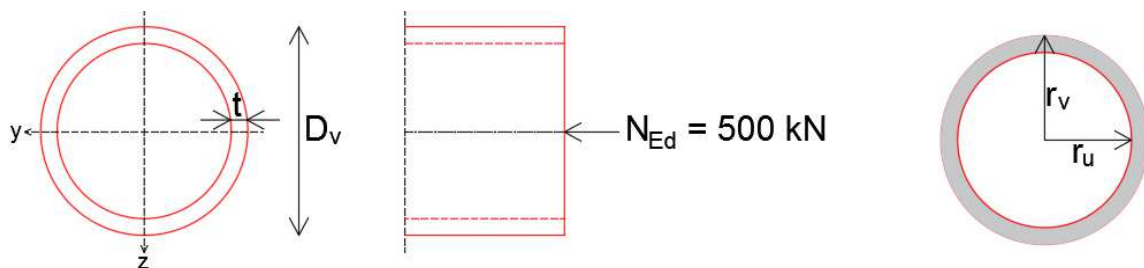
5. IZRAČUN NOSIVOSTI STUPOVA

Izračun nosivosti stupova proveden je za dvije vrste materijala, lijevano željezo i čelik klase S275. Tako je u nastavku prikazan izračun otpornosti centrički opterećenog tlačnog stupa visine 150 cm, prstenastog poprečnog presjeka. Predviđeno opterećenje u obliku tlačne sile iznosi $N_{Ed} = 500$ kN (Slika 16.).



Slika 16: Tlačno opterećenje naneseno na stup

Vanjski promjer poprečnog presjeka stupa iznosi 25 cm, unutarnji promjer iznosi 21 cm te debljina stijenke iznosi 20 mm kako je prikazano na Slici 17. Stup je u prvome slučaju izveden od lijevanoga željeza, dok je u drugome slučaju izveden od čelika klase S275.



Slika 17: Poprečni presjek stupa

Momenti inercije oko osi y i z:

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi}{4} (r_v^4 - r_u^4) \quad (6)$$

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi}{4} (12,5^4 - 10,5^4)$$

$$I_Y = I_Z = 9628,20 \text{ cm}^4$$

Karakteristike poprečnoga presjeka:

$$D_V = 250 \text{ mm}$$

$$D_U = 210 \text{ mm}$$

$$t = 20 \text{ mm}$$

$$A = 144,51 \text{ cm}^2$$

$$I_Y = I_Z = 9628,20 \text{ cm}^4$$

5.1. Izračun nosivosti stupa od lijevanoga željeza

Karakteristike materijala prema EN 1561:

$$E = 100\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\vartheta = 0,26$$

$$\rho = 7150 \text{ kg/m}^3$$

$$f_y = 287 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 521 \text{ N/mm}^2$$

Proračun je proveden prema EN 1993-1-1.

Klasifikacija poprečnoga presjeka

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{287}} = 0,90$$

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{d}{t} \leq 50 * \varepsilon^2 \quad (8)$$

$$\frac{250}{20} \leq 50 * 0,90^2$$

$$12,5 < 40,5$$

Poprečni presjek je klasa 1.

Otpornost poprečnoga presjeka na tlak

Uvjet za klasu 1:

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (9)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{144,51 * 28,7}{1,0}$$

$$N_{c,Rd} = 4\,147,44 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad (10)$$

$$500 \text{ kN} < 4\,147,44 \text{ kN}$$

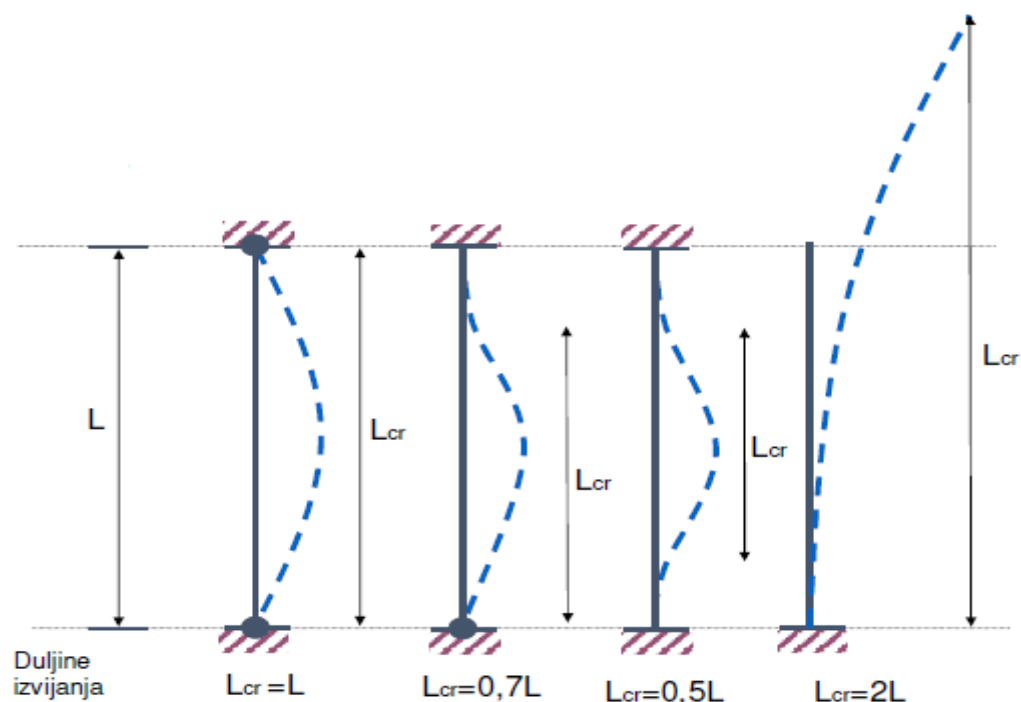
Iskoristivost poprečnoga presjeka:

$$\frac{500}{4 \cdot 147,44} = 0,1206 < 1 \quad (12,06 \%)$$

Otpornost tlačnoga elementa na izvijanje

Kritična duljina izvijanja:

Pri određivanju kritične duljine izvijanja uzima se u obzir uvjete oslanjanja tlačnoga elementa kako je prikazano na Slici 18.



Slika 18: Kritične duljine izvijanja [9]

$$l = 150 \text{ cm}$$

$$l_{cr} = l_{cr,y} = l_{cr,z} = 0,7 * l = 0,7 * 150 = 105 \text{ cm} \quad (11)$$

Eulerova kritična sila izvijanja:

$$N_{cr} = N_{cr,y} = N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_{cr}^2} \quad (12)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 10\,000 * 9\,628,20}{105^2}$$

$$N_{cr} = 86\,191,86 \text{ kN}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} \quad (13)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{144,51 * 28,7}{86\,191,86}}$$

$$\bar{\lambda} = 0,219$$

Faktor imperfekcije:

Faktor imperfekcije očitava se iz literature na temelju krivulje izvijanja kao vrijednost $\alpha = 0,21$ (vruće dogotovljeni šuplji presjeci).

Izvijanje:

$$\Phi = \Phi_y = \Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (14)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + 0,21(0,219 - 0,2) + 0,219^2 \right]$$

$$\Phi = 0,526$$

Faktor redukcije:

$$\chi = \chi_y = \chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (15)$$

$$\chi = \chi_y = \chi_z = \frac{1}{0,526 + \sqrt{0,526^2 - 0,219^2}}$$

$$\chi = 1,00$$

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (16)$$

$$N_{b,Rd} = 1,00 * \frac{144,51 * 28,7}{1,1}$$

$$N_{b,Rd} = 3\,770,40 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (17)$$

$$500 \text{ kN} < 3\,770,40 \text{ kN}$$

Iskoristivost poprečnoga presjeka:

$$\frac{500}{3\,770,40} = 0,1326 < 1 \quad (13,26 \%)$$

5.2. Izračun nosivosti stupa od čelika klase S275

Karakteristike materijala prema EN 1561:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\vartheta = 0,30$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 430 \text{ N/mm}^2$$

Klasifikacija poprečnoga presjeka

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Uvjet za klasu 1:

$$\frac{d}{t} \leq 50 * \varepsilon^2 \quad (19)$$

$$\frac{250}{20} \leq 50 * 0,92^2$$

$$12,5 < 42,32$$

Poprečni presjek je klasa 1.

Otpornost poprečnoga presjeka na tlak

Uvjet za klasu 1:

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (20)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{144,51 * 27,5}{1,0}$$

$$N_{c,Rd} = 3974,03 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad (21)$$

$$500 \text{ kN} < 3\,974,03 \text{ kN}$$

Iskoristivost poprečnoga presjeka:

$$\frac{500}{3\,974,03} = 0,1258 < 1 \quad (12,58 \%)$$

Otpornost tlačnoga elementa na izvijanje

Kritična duljina izvijanja:

$$l = 150 \text{ cm}$$

$$l_{cr} = l_{cr,y} = l_{cr,z} = 0,7 * l = 0,7 * 150 = 105 \text{ cm} \quad (22)$$

Eulerova kritična sila izvijanja:

$$N_{cr} = N_{cr,y} = N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_{cr}^2} \quad (23)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 21\,000 * 9\,628,20}{105^2}$$

$$N_{cr} = 181\,002,90 \text{ kN}$$

Vitkost elementa:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} \quad (24)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{144,51 * 27,5}{181\,002,90}}$$

$$\bar{\lambda} = 0,148$$

Faktor imperfekcije:

Faktor imperfekcije očitava se iz literature na temelju krivulje izvijanja kao vrijednost $\alpha = 0,21$ (vruće dogotovljeni šuplji presjeci).

Izvijanje:

$$\Phi = \Phi_y = \Phi_z = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (25)$$

$$\Phi = 0,5[1 + 0,21(0,148 - 0,2) + 0,148^2]$$

$$\Phi = 0,505$$

Faktor redukcije:

$$\chi = \chi_y = \chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (26)$$

$$\chi = \chi_y = \chi_z = \frac{1}{0,505 + \sqrt{0,505^2 - 0,148^2}}$$

$$\chi = 1,00$$

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (27)$$

$$N_{b,Rd} = 1,00 * \frac{144,51 * 27,5}{1,1}$$

$$N_{b,Rd} = 3\,612,75 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (28)$$

$$500 \text{ kN} < 3\,612,75 \text{ kN}$$

Iskoristivost poprečnoga presjeka:

$$\frac{500}{3\,612,75} = 0,1384 < 1 \quad (13,84 \%)$$

5.3. Usporedba nosivosti stupova od lijevanog željeza i čelika klase S275

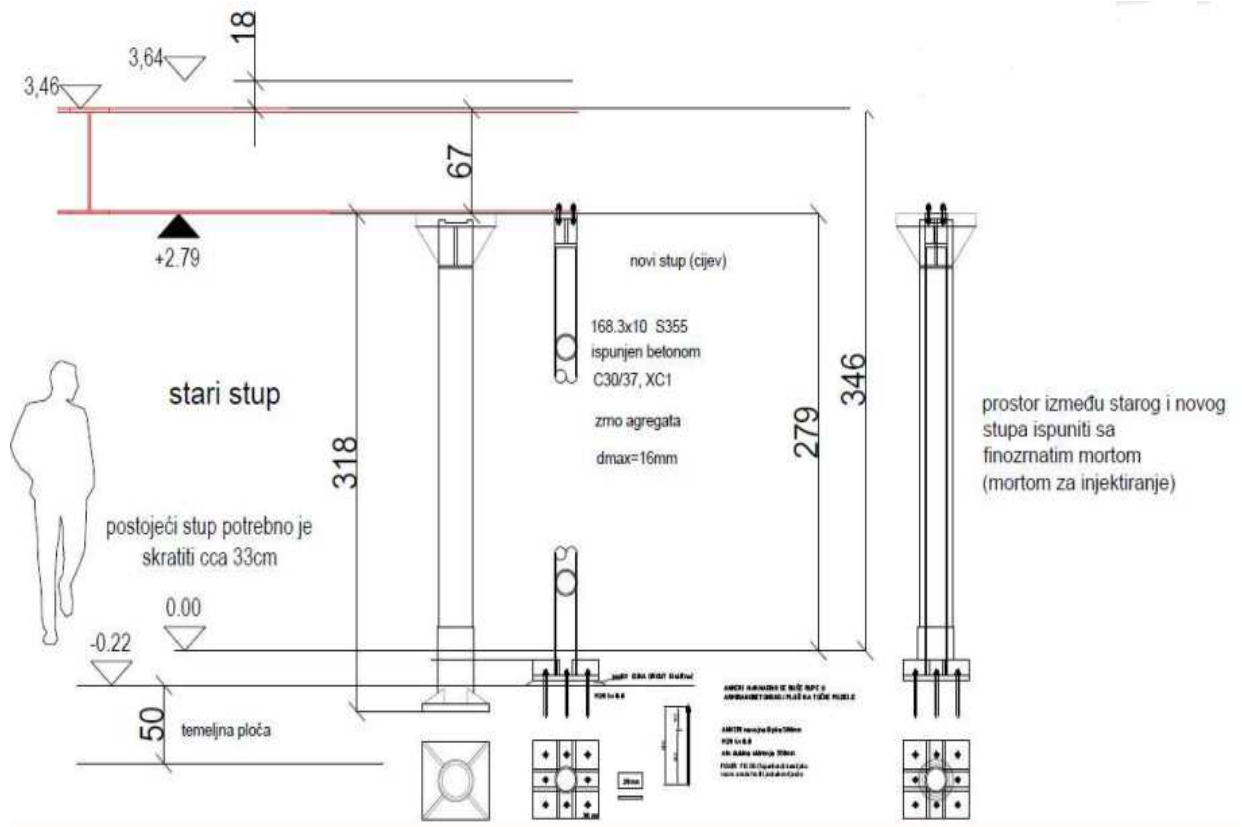
Pri izračunu otpornosti poprečnoga presjeka na tlak za stup od lijevanoga željeza dobivena je vrijednost $N_{c,Rd} = 4147,44 \text{ kN}$, dok za stup od čelika klase S275 izračunata vrijednost iznosi $N_{c,Rd} = 3974,03 \text{ kN}$, što čini razliku od 4,2%.

Pri izračunu otpornosti tlačnoga elementa na izvijanje za stup od lijevanoga željeza izračunata je vrijednost $N_{b,Rd} = 3770,40 \text{ kN}$, dok za stup od čelika klase S275 ta vrijednost iznosi $N_{b,Rd} = 3612,75 \text{ kN}$, što čini razliku od 4,2%.

Na temelju prethodno provedenih proračuna zaključuje se da uvjete nosivosti zadovoljavaju stupovi od lijevanoga željeza i čelika klase S275. No, valja biti na oprezu te provesti dodatna istraživanja i proračune vezane uz stupove od lijevanoga željeza zbog duktilnosti. Naime, lijevano – željezni stupovi su krti što može nepovoljno utjecati na ponašanje istih pri potresnome opterećenju gdje se očekuje duktilno ponašanje koje posjeduju čelični stupovi.

Primjena lijevano – željenih stupova moguća je uz korištenje metoda sanacije stupova kako bi se osigurala adekvatna nosivost.

Iako postoji više mogućnosti, tijekom rekonstrukcije Ciglene zgrade u Dječju kuću provedena je metoda sanacije stupova ugradnjom čelične cijevi manjeg promjera i ispune betonom C30/37 kako je prikazano na Slici 19 [4]. Prostor između starog i novog stupa ispunjen je mortom za injektiranje.



Slika 19: Ugradnja nove unutarnje ispunje u postojeće stupove [4]

6. ZAKLJUČAK

Stupovi od lijevanoga željeza tijekom 19. stoljeća dobivaju svoje mjesto u konstrukcijama tvornica i skladišta. No, u kasnijim stoljećima otkrićem čelika i drugih materijala koji su iskazivali bolja svojstva, lijevano željezo gubi svoju važnost.

U današnje se vrijeme ipak javlja potreba za novim saznanjima vezanim uz spomenuti materijal, pogotovo pri provedbi rekonstrukcija i revitalizacija nekadašnjih industrijskih kompleksa i tvornica. 2019. godine nailazi se na lijevano – željezne stupove unutar Ciglene zgrade nekadašnjega kompleksa Rikard Benčić, koji potječu iz 1899. godine. Iz konzervatorskih razloga ovi stupovi ne odlaze u zaborav, već postaju vrijedni eksperimentalni uzorci.

Na Građevinskome fakultetu u Rijeci ovim je stupovima ispitana tvrdoća materijala pomoću prijenosnoga uređaja za određivanje tvrdoće materijala Krautkramer MIC 20 te su vrijednosti dobivenih rezultata uvrštene između dopustivih granica tvrdoće prema DIN EN 1561.

Primjenom dodatne literature proveden je izračun čvrstoće lijevanog željeza te je na temelju dobivenih vrijednosti proveden izračun nosivosti stupova na tlak te je uspoređena s nosivošću stupova od čelika klase S275. Pri izračunu otpornosti poprečnoga presjeka na tlak i otpornosti tlačnoga elementa na izvijanje oba materijala iskazuju dobra svojstva te se rezultati izračuna uvelike ne razlikuju.

Na temelju provedenih mjerenja i proračuna, ovim se radom zaključuje da lijevano željezo iskazuje dobra svojstva što, dakako, upućuje na mogućnost daljnje primjene ovoga materijala. Ipak, treba uzeti u obzir činjenicu da lijevano željezo spada u skupinu krutih materijala te se pri mogućem potresnom opterećenju stupovi od lijevanog željeza ponašaju nepovoljno, dok stupovi od čelika pri potresnome opterećenju posjeduju očekivano duktilno ponašanje.

7. LITERATURA

- [1] Bussel M., Appraisal of Existing Iron and Steel Structures, The Steel Construction Institute, 1997.
- [2] d'Alpoim Guedes P.P., Iron in Building, 1750 – 1855: Innovation and cultural resistance, The University of Queensland, 2010.
- [3] Rondal J., Rasmussen K., On the Strength of Cast Iron Columns, Research Report No R829, 2003.
- [4] Mrak P. i sur.: Čelik u rekonstrukciji povijesne građevine, <https://www.hkig.hr/Dani-HKIG/Arhiva-prethodnih-Dana-HKIG/Dani-HKIG-2020/>, pristup 02.09.2022.
- [5] Majcen Z., Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2020.
- [6] Dr. Frank S., Mobilno ispitivanje tvrdoće: Vodič za primjenu instrumenata Krautkramer, GE Inspection Technologies, 2005.
- [7] Vitez I., Oruč M., Sunulahpašić, R., Ispitivanje metalnih materijala – mehanička i tehnološka ispitivanja, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2006.
- [8] DIN EN 1561:2012-01, Founding – Grey cast irons, Bruxelles: European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [9] Krolo P., Nastavni materijali, Osnove čeličnih konstrukcija, Građevinski fakultet u Rijeci, 2021.
- [10] Katalog laboratorijske i terenske opreme Građevinskog fakulteta u Rijeci, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2017., https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog_laboratorijske_i_terenske_opreme_GF_Rijeka.pdf, pristup 12.07.2022.
- [11] Čvrstoća, <https://www.wikiwand.com/hr/Čvrstoća>, pristup 02.09.2022.