

Jamova cesta 2 1000 Ljubljana,Slovenija telefon (01) 47 68 500 faks (01) 42 50 681 fgg@fgg.uni-lj.si

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

**MARTIN KLUN** 

# UTRDITEV UPOGIBNO OBREMENJENEGA ARMIRANOBETONSKEGA NOSILCA S KOMPOZITNIMI CFRP LAMELAMI

# STRENGTHENING OF A REINFORCED CONCRETE GIRDER WITH A CFRP LAMINATE UNDER BENDING LOAD

Mentor/-ica: izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Somentor/-ica: asist. dr. David Antolinc

Član komisije:

Predsednik komisije:

#### STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.45:519.61(043.3)							
Avtor:	Martin Klun dipl. inž. grad. (UN)							
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov							
Somentor:	asist. dr. David Antolinc							
Naslov:	Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s							
	kompozitnimi CFRP lamelami							
Tip dokumenta:	Magistrsko delo							
<b>Obseg in oprema:</b>	83 str., 18 pregl., 54 graf., 46 sl.							
Ključne besede:	nedestruktivne metode, destruktivne metode, numerična analiza, Abaqus,							
	CFRP lamela, upogibna nosilnost, utrjen, armiranobetonski nosilec							

## Izvleček:

Magistrsko delo zajema primerjalne analize in dimenzioniranje upogibno obremenjenega, neutrjenega in utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo.

Za obstoječi armiranobetonski nosilec neznanih karakteristik je najprej z uporabo nedestruktivnih in destruktivnih metod prikazana ocena trenutnega stanja, geometrije, lege armaturnih palic in materialnih karakteristik. Določitev le-teh je pomembna za natančnost in uspešnost vseh nadaljnjih analiz in dimenzioniranja utrditvene CFRP lamele.

V okviru dela je izveden štiri točkovni upogibni preizkus neutrjenega in utrjenega armiranobetonskega nosilca. Po opravljenem eksperimentu se je izvedlo numerično analizo s programom Abaqus in analitični izračun v skladu s standardom Eurocode ter medsebojna primerjava rezultatov obeh analiz. S primerjavo rezultatov analitičnega izračuna in numerične analize z eksperimentalnimi rezultati je bila ugotovljena natančnost določitve dejanskega obnašanja tako neutrjenega kot tudi utrjenega realnega nosilca s pomočjo analitičnih in numeričnih metod.

V zadnjem delu je skladno s standardi in priporočili narejen izračun dimenzioniranja utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo v projektnem stanju. Rezultati dimenzioniranega »računskega« stanja utrjenega nosilca so primerjani z rezultati predhodnih analiz dejanskega stanja s čimer se pokaže potrebna varnost pri dimenzioniranju. Na podlagi izpeljanih izrazov za dimenzioniranje in računskih kontrol iz priporočil je narejen preprost program za optimalno dimenzioniranje upogibne utrditve armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo.

#### **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

UDC:	624.012.45:519.61(043.3)							
Author:	Martin Klun dipl. inž. grad. (UN)							
Supervisor:	Associate Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph. D.							
Co-advisor:	Asist. David Antolinc, Ph. D.							
Title:	Strengthening of a reinforced concrete girder with a CFRP laminate under							
	bending load							
Document type:	Master thesis							
Notes:	83 p., 18 tab., 54 graph., 46 fig.							
Key words:	non-destructive methods, destructive methods, numerical analysis,							
	Abaqus, CFRP laminate, bending moment capacity, strengthened, reinforced concrete girder							

#### Abstract:

The master's thesis deals with strengthening of a girder made of reinforced concrete with a CFRP laminate under bending load. It includes several different analysis and dimensioning of a non-strengthened and strengthened reinforced concrete girder with a CFRP laminate.

The use of non-destructive and destructive methods conveys the dimensions, position of rebars and material characteristics of the existent reinforced concrete girder. The determination of those is crucial for the accuracy and successfulness of all further analysis and dimensioning of the strengthening CFRP laminate.

The thesis includes a four point bending test of both non-strengthened and strengthened reinforced concrete girder. After the experiment several analysis were conducted, a numerical analysis using the Abaqus software, an analytical calculation in accordance to the Eurocode standard and finally a comparison of the two. The comparison of the results of the analytical calculation and the numerical analysis with the results of the experiment yielded the accuracy of the determined behaviour for the non-strengthened and strengthened girder with the help of analytical and numerical methods.

The last part consists of assessment of the load-bearing capacity of the strengthened reinforced concrete girder with a CFRP laminate in accordance to corresponding standards and recommendations. The results of the projects »Design« state for the strengthened girder are compared to the results of the beforehand made analysis of the actual state which shows the necessary safety for dimensioning. A simple software for optimal dimensioning of a bending loaded reinforced concrete girder with a CFRP laminate was developed based on the equations for dimensioning and calculus based safety controls in correspondence with recommendations.

# ZAHVALA

Za vodenje in mentorstvo pri nastajanju magistrskega dela se zahvaljujem izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu, somentorju asist. dr. Davidu Antolincu pa za požrtvovalno vsestransko pomoč, vse sprotne strokovne nasvete in smernice. Še zlasti se jima zahvaljujem za prijaznost, dostopnost in dobronamernost, da sem dobival svež veter v krila.

Zahvaljujem se Franciju Čeponu in Boštjanu Jursinoviču za pripravo in uspešno izvedbo vseh opravljenih laboratorijskih preiskav ter vso strokovno in praktično pomoč.

Ervinu Brulcu iz podjetja Hilti d.o.o. se zahvaljujem za demonstracijo, tehnično predstavitev njihovih izdelkov ter strokovno pomoč.

Za vse strokovne nasvete iz specifičnega področja betonskih konstrukcij se zahvaljujem izr. prof. dr. Sebastjanu Bratini.

Hvala Marku Lavrenčiču za pomoč pri numerični analizi.

Največja zahvala gre staršem, ki so mi omogočili študij, me bodrili, vseskozi podpirali in verjeli vame ter hvala Niki za vso podporo in vzpodbudo.

# KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO GRAFIKONOV	VIII
KAZALO SLIK	X
1 UVOD	
1.1 Nedestruktivne metode in destruktivne metode	
1.2 Utrditev obstoječih armiranobetonskih nosilnih elementov	
2 SPREMLJEVALNE RAZISKAVE NA ARMIRANOBETONSKEM NOSILC	U 3
2.1 Uporabljene nedestruktivne metode	
2.1.1 Sklerometer – Proceq Silver Schmidt Type N	
2.1.1.1 Potek dela in ocena tlačne trdnosti betona	
2.1.2 Pahometer – Ferroscan PS 200 S	5
2.1.2.1 Potek dela in rezultati skenerja Ferroscan PS 200 S	5
2.1.3 Radar – X-Scan PS 1000	7
2.1.3.1 Potek dela in rezultati skenerja X-Scan PS 1000	7
2.2 Uporabljene destruktivne metode	
2.2.1 Izvrtanje valjastih vzorcev iz armiranobetonskega nosilca	
2.2.1.1 Določitev prostorninske mase betona	9
2.2.1.2 Potek tlačnega preizkusa valjastih vzorcev	10
2.2.1.3 Določitev povprečne tlačne trdnosti betona	11
2.2.1.4 Določitev statičnega elastičnega modula betona	11
2.2.2 Odvzem vzorcev armaturnih palic iz armiranobetonskega nosilca	12
2.2.2.1 Potek nateznega preizkusa vzorcev armaturnih palic	14
2.2.2.2 Določitev kvalitete uporabljenega jekla	15
2.2.3 Kontrola dimenzij armaturnih palic in njihove lege v nosilcu	16
<b>3</b> OPIS IN MEHANSKE KARAKTERISTIKE ARMIRANOBETONSKEGA N	OSILCA17
3.1 Geometrija	17
3.1.1 Geometrija obravnavanega neutrjenega nosilca	17
3.1.2 Geometrija obravnavanega utrjenega nosilca s CFRP lamelo	
3.2 Mehanske karakteristike materialov	
3.2.1 Beton	
3.2.1.1 Beton v tlaku	
3.2.1.2 Beton v nategu	
3.2.2 Armatura	
5.2.5 CFKP lamela	
<b>5.5</b> Uporabijene materiaine karakteristike pri analizan in dimenzioniranju	
2.2.1.1 Unočtovonie betone v tlaku	
3.3.1.1 Upostevanje betona v nategu	
3.3.2 Karakteristike armature	23 25
3 3 3 Karakteristike CERP lamele	25 76
5.5.5 Kataktensuke et ki famete	

4	E	KSPEI	RIMENT – UPOGIBNI PREIZKUS NOSILCA	. 27
	4.1	Ekspe	erimentalna analiza neutrjenega armiranobetonskega nosilca	. 27
	4.	1.1	Potek preizkusa neutrjenega armiranobetonskega nosilca	. 27
	4.	.1.2	Rezultati preizkusa neutrjenega armiranobetonskega nosilca	. 28
	4.2	Ekspe	erimentalna analiza utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo	. 29
	4.	.2.1	Utrditev armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo	. 29
	4.	.2.2	Potek preizkusa utrjenega armiranobetonskega nosilca	. 30
	4.	.2.3	Rezultati preizkusa utrjenega armiranobetonskega nosilca	. 31
5	Ν	UMER	IČNA ANALIZA	34
C	5.1	Nume	rični model	
	5.2	Mater	rialni modeli	
	5.	.2.1	Materialni model betona	
	5.	2.2	Materialni model armature	
	5.	.2.3	Materialni model CFRP lamele	
	5.3	Nume	erična analiza neutrienega armiranobetonskega nosilca	. 38
	5.4	Nume	erična analiza utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo	. 40
6	٨	NAT IT		43
U	л 61	Predr	nostavka in noonostavitva analitičnoga izračuna	. 43
	6.2	Anali	tični izračun nautrianaga armiranabatanskaga nasilea	5 44
	0.2 6	2 1	Izpeliava osnovnih enačh za unogihno nosilnost neutrienega prereza	 44
	6	2.1	Izračun upogibne nosilnosti obravnavanega neutrienega nosilca	46
	6.3	Anali <sup>.</sup>	tični izračun utrienega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo	. 10 . <b>49</b>
	6.0	3.1	Izpeliava osnovnih enačh za unogihno nosilnost utrienega prereza	.49
	6	32	Izračun upogibne nosilnosti obravnavanega utrienega nosilca s CFRP lamelo	52
7	D.	DIMEI	DIAVA DEZHI TATOV VSEH ANALIZ	56
/	г. 71		XJAVA REZULTATOV VSEH ANALIZ	. 30
	/.1	nosilo	en java rezultatov eksperimenta z numerično in anantično analizo neutrjenega	56
	7 2	Prime	aariava razultatov aksnarimenta z numerično in analitično analizo utrienega	. 30
	1.4	nosile	a	57
	73	Prime	a priava rezultatov utrienega in neutrienega nosilca v različnih analizah	60
	7.5	3 1	Primeriava eksperimentalnih rezultatov utrienega in neutrienega nosilca	60
	7.	32	Primerjava numeričnih rezultatov utrienega in neutrienega nosilca	. 00
	7.	33	Primerjava analitičnih rezultatov utrienega in neutrienega nosilca	. 62
0	, . D	INTENT	ZIONIDANTE UDOCIDNE UTDDITVE S KOMDOZITNO LAMELO	. 05
0	0 1	IIVIE/IN/ Ianali	ZIONIRANJE UPOGIBNE UTRDITVE S KOMPOZITNO LAMELO	. 05
	0.1 0		ava uporabljenih enaco v programu za umenzioniranje utrjenega nosnca Enačha za dimenzioniranja nautrianaga nasilaa	.05
	0. 0	1.1	Enacte za dimenzioniranje neutrienega nosilca a CEPD lamelo	. 03
	0. 01	Duadd	Enacoe za dimenzionitanje utijenega nositica s CFRP famelo	.0/
	0.2	Preud	ielormacija CFRF lamele zaradi lastne teze in stame obtezbe	. /0
	0.J 0		Kontrolo deformacij na prorazu	. 70
	0. 0	2.1	Kontrola deponitivo konce CEDD lamala	. 70
	0. 0	.3.2	Omajitav deformacij v CEDD lameli za propražitav odluččanja od hatara	. / I 70
	ð. Q 1	.3.3 Dima	Omejnev deformacij v UFKF lamen za preprečnev odluščenja od belona	. 12 77
	0.4 0 <i>5</i>	Dime D.::	nzionn anje utrjenega armiranodetonskega nosnica s UFKF lamelo	. 12
	0.J	r rime	er java uejanskega in projektnega stanja upogione nosilnosti utrjenega nosilca	. /0 70
c	0.0	rrime	erjava projektnega stanja upogione nosimosti neutrjenega in utrjenega nosilca	. /ð
9	Z	AKLJI	UCEK	. 80
V	IRI.			. 82

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Različni kompozitni materiali uporabljeni za utrjevanje armiranobetonskih						
	nosilnih elementov	2					
Preglednica 2:	Rezultati ocene tlačne trdnosti betona s sklerometrom	4					
Preglednica 3:	Določitev prostorninske mase betona	10					
Preglednica 4:	Določitev povprečne tlačne trdnosti betona	11					
Preglednica 5:	Izračun statičnega elastičnega modula betona	12					
Preglednica 6:	Določitev napetosti na meji elastičnosti spodnje armature f <sub>y</sub>	15					
Preglednica 7:	Karakteristike uporabljenega betona	24					
Preglednica 8:	Karakteristike armature S500	26					
Preglednica 9:	Karakteristike CFRP lamele	26					
Preglednica 10:	Podatki uporabljeni v analitičnem izračunu neutrjenega nosilca	46					
Preglednica 11:	Analitični izračun upogibne nosilnosti neutrjenega nosilca	47					
Preglednica 12:	Podatki uporabljeni v analitičnem izračunu utrjenega nosilca	52					
Preglednica 13:	Analitični izračun upogibne nosilnosti utrjenega nosilca	53					
Preglednica 14:	Izračun višine tlačne cone x pri utrjenem nosilcu	53					
Preglednica 15:	Primerjava togosti K iz eksperimenta utrjenega in neutrjenega nosilca	61					
Preglednica 16:	Primerjava togosti K iz numerične analize utrjenega in neutrjenega nosilca	63					
Preglednica 17:	Izračun projektnega stanja obravnavanega utrjenega nosilca pri različnih						
	obremenitvah	76					
Preglednica 18:	Izračun projektnega stanja obravnavanega neutrjenega nosilca pri različnih						
	obremenitvah	78					

## **KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1:	Spodnja krivulja 10 procentne fraktile za določevanje tlačne trdnosti betona na terenu iz FN 13791	4
Grafikon 2 <sup>.</sup>	Diagram odvisnosti napetosti in deformaciji iz tlačnega preizkusa valja 2	11
Grafikon 3 <sup>.</sup>	Diagram napetosti v odvisnosti od deformacij v območiu cikličnega obremenjevanja	12
Grafikon 4 <sup>.</sup>	Diagram odvisnosti sile in raztega vzorca pri nateznem preizkusu	14
Grafikon 5:	Odvisnost napetosti in pomika pri nateznem preizkusu palic 1-3	15
Grafikon 6:	Izračunan diagram betona za analizo konstrukcij	24
Grafikon 7:	Izračunan delovni diagram betona za dimenzioniranie	25
Grafikon 8:	Poenostavlien izračun napetosti v odvisnosti od deformacii betona v nategu	25
Grafikon 9:	Unorablien delovni diagram armature	26
Grafikon 10 <sup>.</sup>	Uporablien delovni diagram za CFRP lamelo	26
Grafikon 11:	Eksperimentalna odvisnost $F = U_{wart}$ neutrienega nosilca	28
Grafikon 12:	Eksperimentalna odvisnost $F = \varepsilon_0$ neutrienega nosilca	29
Grafikon 13:	Eksperimentalna odvisnost $F = \varepsilon_s$ neutrienega nosilca	29
Grafikon 14 <sup>.</sup>	Eksperimentalna odvisnost $F = U_{wet}$ utrienega nosilca	31
Grafikon 15:	Eksperimentalna odvisnost $F = \varepsilon_0$ utrienega nosilca	32
Grafikon 16:	Eksperimentalna odvisnost $F = \varepsilon_c$ utrienega nosilca	32
Grafikon 17:	Eksperimentalna odvisnost $F = \varepsilon_{CFPP}$ utrienega nosilca	33
Grafikon 18:	Numerična odvisnost $F = U_{met}$ neutrienega nosilca	38
Grafikon 19:	Numerična odvisnost $F = \varepsilon_0$ neutrienega nosilca	38
Grafikon 20:	Numerična odvisnost $F = \varepsilon_c$ neutrienega nosilca	39
Grafikon 21:	Numerična odvisnost $F = U_{vort}$ utrienega nosilca	40
Grafikon 22:	Numerična odvisnost $F = \varepsilon_0$ utrienega nosilca	40
Grafikon 23:	Numerična odvisnost $F = \varepsilon_c$ utrjenega nosilca	41
Grafikon 24:	Numerična odvisnost $F = \varepsilon_{c_{TRR}}$ utrienega nosilca	41
Grafikon 25:	Unogibna nosilnost neutrienega nosilca $M_{Pd,A}$ v odvisnosti od $\varepsilon_{a}$	47
Grafikon 26:	Unogibna nosilnost neutrienega nosilca $M_{Rd,A}$ v odvisnosti od e	48
Grafikon 27:	Analitična odvisnost $F = \varepsilon_0$ neutrienega nosilca	48
Grafikon 28:	Analitična odvisnost $F = \varepsilon_c$ neutrienega nosilca	48
Grafikon 29:	Unogibna nosilnost utrienega nosilca $M_{Pd,A}$ v odvisnosti od $\varepsilon_{a}$	54
Grafikon 30:	Unogibna nosilnost utrienega nosilca $M_{Rd,A}$ v odvisnosti od s	54
Grafikon 31.	Unogibna nosilnost utrienega nosilca $M_{Rd,A}$ v odvisnosti od $\varepsilon_{CERP}$	54
Grafikon 32:	Analitična odvisnost F - $\epsilon_c$ utrienega nosilca	55
Grafikon 33:	Analitična odvisnost $F = \varepsilon_{e}$ utrienega nosilca	55
Grafikon 34 <sup>.</sup>	Analitična odvisnost $F = \varepsilon_{CERP}$ utrienega nosilca	55
Grafikon 35:	Primeriava odvisnosti $F - \varepsilon_c$ neutrienega nosilca iz vseh analiz	56
Grafikon 36:	Primerjava odvisnosti F – $\varepsilon_{e}$ neutrienega nosilca iz vseh analiz	
Grafikon 37 <sup>.</sup>	Primeriava odvisnosti $F - U_{vert}$ neutrienega nosilca iz numerične analize in	
01411101101101	eksperimenta	57
Grafikon 38.	Primeriava odvisnosti F – $\varepsilon_c$ utrienega nosilca iz vseh analiz	
Grafikon 39	Primerjava odvisnosti F – $\varepsilon_s$ utrienega nosilca iz vseh analiz	58
Grafikon 40	Primerjava odvisnosti $F - \varepsilon_{CFRP}$ utrienega nosilca iz vseh analiz	. 59
Grafikon 41	Primerjava odvisnosti $F - U_{vert}$ utrienega nosilca iz numerične analize in	
	eksperimenta	59

Grafikon 42:	Primerjava eksperimentalne odvisnosti $F - \epsilon_c$ utrjenega in neutrjenega nosilca	60
Grafikon 43:	Primerjava eksperimentalne odvisnosti $F - \epsilon_s$ utrjenega in neutrjenega nosilca	61
Grafikon 44:	Primerjava eksperimentalne odvisnosti F - Uvert utrjenega in neutrjenega nosilca	61
Grafikon 45:	Primerjava numerične odvisnosti F – $\epsilon_c$ utrjenega in neutrjenega nosilca	62
Grafikon 46:	Primerjava eksperimentalne odvisnosti $F - \varepsilon_s$ utrjenega in neutrjenega nosilca	62
Grafikon 47:	Primerjava eksperimentalne odvisnosti F - Uvert utrjenega in neutrjenega nosilca	63
Grafikon 48:	Primerjava analitične odvisnosti F – $\varepsilon_c$ utrjenega in neutrjenega nosilca	64
Grafikon 49:	Primerjava analitične odvisnosti F – $\varepsilon_s$ utrjenega in neutrjenega nosilca	64
Grafikon 50:	Primerjava dejanskih odvisnosti F – $\varepsilon_c$ s projektnimi	77
Grafikon 51:	Primerjava dejanskih odvisnosti F – $\varepsilon_s$ s projektnimi	77
Grafikon 52:	Primerjava dejanskih odvisnosti F – $\varepsilon_{CFRP}$ s projektnimi	78
Grafikon 53:	Primerjava odvisnosti F – $\varepsilon_c$ neutrjenega in utrjenega projektnega stanja nosilca	79
Grafikon 54:	Primerjava odvisnosti F – $\varepsilon_s$ neutrjenega in utrjenega projektnega stanja nosilca	79

# KAZALO SLIK

Slika 1:	Sklerometer Proceq SilverSchmidt Type N	
Slika 2:	Monitor PSA 100 in Ferroscan PS 200 S	5
Slika 3:	Prikaz rezultatov skeniranja zgornje ploskve nosilca s Ferroscanom PS 200 S	6
Slika 4:	Prikaz rezultatov skeniranja spodnje ploskve nosilca s Ferroscanom PS 200 S	6
Slika 5:	Monitor PSA 100 in X-Scan PS 1000	7
Slika 6:	Prikaz rezultatov skeniranja spodnje ploskve nosilca z X-Scanom PS 1000	
Slika 7:	Izvrtanje valjastega vzorca nad podporo	9
Slika 8:	Porušitev valjastih vzorcev (Valj 1 - levo in Valj 2 - desno)	10
Slika 9:	Odvzem vzorcev armaturnih palic s pnevmatskim kladivom	13
Slika 10:	Vsi trije vzorci palic natezne (spodnje) armature	13
Slika 11:	Vpet vzorec v trgalni stroj (levo), pretrg vzorca (desno)	14
Slika 12:	Odstranjen beton na sredini razpona nosilca	16
Slika 13:	Vzdolžni prerez obravnavanega neutrjenega nosilca	17
Slika 14:	Prečni prerez obravnavanega neutrjenega nosilca	17
Slika 15:	Vzdolžni prerez obravnavanega nosilca utrjenega s CFRP lamelo	18
Slika 16:	Prečni prerez obravnavanega nosilca s CFRP lamelo	18
Slika 17:	Shematski diagram odvisnosti med napetostjo in deformacijo betona za analizo	
	konstrukcij	20
Slika 18:	Shematski delovni diagram parabola-premica tlačenega betona	20
Slika 19:	Shematski prikaz odvisnosti napetosti in deformacij za beton v nategu	21
Slika 20:	Shematski prikaz konstitutivnega diagrama za armaturo	22
Slika 21:	Shematski prikaz konstitutivnega zakona za CFRP lamelo iz TR55	23
Slika 22:	Prikaz pozicij obremenjevanja in merilnih mest pri štiri točkovnem upogibnem	
	preizkusu	27
Slika 23:	Preizkus neutrjenega armiranobetonskega nosilca	
Slika 24:	Potek namestitve CFRP lamele	30
Slika 25:	Preizkus utrjenega armiranobetonskega nosilca	31
Slika 26:	Porušitev utrjenega nosilca s CFRP lamelo	33
Slika 27:	Numerični model neutrjenega nosilca	34
Slika 28:	Prikaz povezav elementov numeričnega modela	35
Slika 29:	Numerični model utrjenega nosilca s CFRP lamelo	36
Slika 30:	Mreža končnih elementov betonskega dela nosilca	36
Slika 31:	Mreža končnih elementov zgornje in spodnje armature	36
Slika 32:	Mreža končnih elementov CFRP lamele	37
Slika 33:	Vertikalni pomiki neutrjenega nosilca pri sili F = 60 kN	39
Slika 34:	Vzdolžne deformacije v betonu pri sili F = 60 kN	39
Slika 35:	Vzdolžne deformacije v armaturi pri sili F = 60 kN	39
Slika 36:	Vertikalni pomiki utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN	41
Slika 37:	Vzdolžne deformacije v betonu utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN	42
Slika 38:	Vzdolžne deformacije v armaturi utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN	42
Slika 39:	Vzdolžne deformacije utrjenega nosilca v CFRP lameli pri sili F = 80 kN	42
Slika 40:	Ravnotežje v prečnem prerezu neutrjenega nosilca pri analitičnem izračunu	44
Slika 41:	Ravnotežje v prečnem prerezu utrjenega nosilca za analitični izračun	49
Slika 42:	Ravnotežje v prečnem prerezu neutrjenega nosilca za dimenzioniranje	66

Slika 43:	Ravnotežje v prečnem prerezu utrjenega nosilca za dimenzioniranje	.68
Slika 44:	Vhodni podatki in izračun geometrijskih in materialnih karakteristik	.73
Slika 45:	Izračun stanja pred utrditvijo in upogibna nosilnost utrjenega nosilca	.74
Slika 46:	Kontrole za mejno stanje nosilnosti in izkoriščenost kapacitet	.75

# 1 UVOD

Tema magistrskega dela so upogibno obremenjeni obstoječi nosilni elementi armiranobetonskih konstrukcij, ki so bodisi zaradi spremembe namembnosti, dotrajanosti ali preobremenjenosti potrebni dodatne utrditve.

V okviru naloge je obravnavan obstoječ armiranobetonski nosilec, ki je bil izdelan pred 20 leti, zato podatki o kvaliteti betona ter vrsti in količini armature niso bili znani. Z nedestruktivnimi metodami se je ocenilo karakteristike sestavnih delov nosilca in njegovo geometrijo.

Po opravljenih nedestruktivnih preiskavah se je izvedlo štiri točkovni upogibni preizkus armiranobetonskega nosilca, katerega se je na ta način najprej obremenilo v območju elastičnega obnašanja tako, da je le-ta razpokal in se ga nato razbremenjenega utrdilo s kompozitno CFRP lamelo. Po opravljeni utrditvi se je nosilec ponovno obremenilo vse do porušitve. Po končanem eksperimentu so bile na nosilcu izvedene še destruktivne raziskave, s katerimi se je natančneje določilo karakteristike nosilca in s tem preverilo učinkovitost nedestruktivnih metod.

Za namen opisa dejanskega obnašanja upogibno obremenjenega nosilca tekom eksperimenta je bila vzporedno narejena numerična analiza v programu Abaqus ter analitični izračun.

Cilj magistrske naloge je izdelati preprosto in zanesljivo programsko orodje za dimenzioniranje upogibne nosilnosti armiranobetonskega nosilca utrjenega s kompozitno lamelo v vsesplošno dostopnem programu Microsoft Excel na podlagi Eurocode standardov in uveljavljenih priporočil za dimenzioniranje utrditev armiranobetonskih konstrukcij.

## 1.1 Nedestruktivne metode in destruktivne metode

Nedestruktivne metode (NDT) so neporušne metode, katere se uporablja za preiskave in ocenjevanje materialnih karakteristik, sestavnih delov konstrukcijskih elementov in poškodovanosti elementa, ne da bi se ob tem preiskovani element poškodovalo oziroma se s tem poslabšalo njegov funkcionalni namen. Destruktivne metode (DT) so porušne metode pri katerih se običajno preiskovanemu elementu odvzame vzorec in se le-tega preizkusi tako, da se ga poruši in ob tem spremlja njegovo obnašanje. [1]

Zgoraj opisane metode so ključne v procesu priprave in zbiranja podatkov pri vseh vrstah analiz že obstoječih nosilnih konstrukcij ter pri dimenzioniranju utrditev, ojačitev ali spreminjanju že obstoječega stanja. V praksi so pogoste omejitve pri izvajanju destruktivnih metod (na primer pri utrjevanju objektov kulturne dediščine, kjer so destruktivne metode strogo omejene), zato imajo pomembnejšo vlogo nedestruktivne metode, saj se z njimi ne spreminja izgleda ali poslabša obstoječega stanja.

Pri pregledu oziroma odkrivanju lastnosti obravnavanega armiranobetonskega nosilca so uporabljene tako nedestruktivne kot tudi destruktivne metode. Od neporušnih metod sta uporabljeni metoda sklerometriranja za določitev tlačne trdnosti betona ter detektor kovin za ugotovitev razporeda in lokacije armature v armiranobetonskem nosilcu. Z namenom večje zanesljivosti določitve pravilnih geometrijskih in materialnih parametrov sta po opravljenem štiri točkovnem upogibnem preizkusu izvedeni še naslednji destruktivni metodi in sicer izvrtanje valjev za določitev tlačne trdnosti in

elastičnega modula betona v laboratorijski preši ter odvzem armaturnih vzorcev za določitev kvalitete armaturnega jekla s trgalnim strojem. Za kontrolo določene geometrije prereza armiranobetonskega nosilca in razporeda armature na podlagi nedestruktivnih metod je bil obravnavan nosilec razrezan na dva dela.

# 1.2 Utrditev obstoječih armiranobetonskih nosilnih elementov

V zadnjih desetletjih se vedno bolj pogosto pojavlja potreba po utrjevanju obstoječih armiranobetonskih nosilnih konstrukcijskih elementov. Pogosti razlogi za to so slaba izvedba, korozija vgrajene armature, napačno projektirana armatura, spremembe namembnosti obstoječe konstrukcije ali njena dotrajanost. V inženirski praksi se poslužuje številnih metod utrjevanja nosilnih elementov kot na primer utrjevanje elementov s prednapenjanjem zunanjih kablov, varjenjem dodatne jeklene armature, vbetoniranjem dodatne armature ipd. Vse te metode utrditev so za izvedbo tehnično zahtevne in zamudne, poleg tega pa lahko zavzamejo tudi del uporabnega prostora. [2]

Z razvojem različnih vrst kvalitetnih kompozitnih materialov (Preglednica 1) in epoksidnih lepil se je pojavil učinkovitejši, enostavnejši in tehnično manj zahteven način utrditve obstoječih armiranobetonskih elementov. Lamelo izdelano iz kompozitnih materialov se enostavno s pomočjo dvokomponentnega epoksidnega lepila prilepi na površino elementa, ki je potreben utrditve.

Vrste kompozitnih materialov					
CFRP	S karbonskimi vlakni ojačani polimeri.				
GFRP	S steklenimi vlakni ojačani polimeri.				
AFRP	Z aramidnimi vlakni ojačani polimeri.				

Preglednica 1: Različni kompozitni materiali uporabljeni za utrjevanje armiranobetonskih nosilnih elementov

Takšni kompozitni materiali imajo lahko celo boljše mehanske karakteristike v primerjavi z jeklom za armiranje. Pomembnejše je dejstvo, da so ti materiali bolj odporni na zunanje vplive kakor jeklo, ki je izpostavljeno koroziji.

V primeru upogibno obremenjenih armiranobetonskih nosilcev se kompozitno lamelo s pomočjo dvokomponentnega epoksidnega lepila nalepi na natezno stran. Lamela ima tako vlogo dodatne zunanje natezne armature.

## 2 SPREMLJEVALNE RAZISKAVE NA ARMIRANOBETONSKEM NOSILCU

Nedestruktivne spremljevalne raziskave na armiranobetonskem nosilcu so bile opravljene pred izvedbo štiri točkovnega upogibnega eksperimenta. Z destruktivnimi metodami se je po opravljenem upogibnem preizkusu tako utrjenega kot tudi neutrjenega nosilca preverilo dejansko stanje in naredilo kontrolo točnosti rezultatov nedestruktivnih raziskav.

## 2.1 Uporabljene nedestruktivne metode

Pred izvedbo eksperimenta upogibnega preizkusa so bile opravljene tri nedestruktivne metode ocene karakteristik obstoječega armiranobetonskega nosilca. S sklerometrom je bila ocenjena tlačna trdnost betona, s pahometrom (detektorjem kovine) pa geometrija in lokacija armature v notranjosti nosilca. Lokacija armaturnih palic in njihovo število v armiranobetonskem nosilcu se je poskušalo ugotoviti tudi z radarjem za odkrivanje anomalij v betonu.

## 2.1.1 Sklerometer – Proceq Silver Schmidt Type N

Proceqov Silver Schmidt Type N je digitalni sklerometer, ki se uporablja za in-situ ocenjevanje tlačne trdnosti betona na osnovi elastičnega odboja togega telesa od površine betona. Pripomoček kot tak ima možnost avtomatskega ocenjevanja tlačne trdnosti betona na podlagi zadostnega števila udarcev (minimalno število udarcev je 9), saj ima vgrajeno kompletno statistično obdelovanje rezultatov. Na podlagi statistično obdelanih podatkov pa pripomoček preko standardne krivulje, ki je predpisana v EN 13791 [3], določi povprečno tlačno trdnost betona na območju testiranja vzorca. [4]



Slika 1: Sklerometer Proceq SilverSchmidt Type N

Na podlagi statistične obdelave rezultatov, digitalni pripomoček iz krivulje prikazane na grafikonu 1 določi oceno tlačne trdnosti betona. Ta metoda se uporablja za ocenjevanje tlačne trdnosti betona, če ne poznamo njegove točne sestave in za ocenjevanje tlačne trdnosti obstoječih betonskih elementov, katerih starost mora biti vsaj 28 dni.



Grafikon 1: Spodnja krivulja 10 procentne fraktile za določevanje tlačne trdnosti betona na terenu iz EN 13791 [3]

#### 2.1.1.1 Potek dela in ocena tlačne trdnosti betona

Površina betonskega nosilca je bila na desetih različnih mestih, kjer je bilo opravljeno sklerometriranje, predhodno zglajena. Na vsakem mestu sklerometriranja je bilo opravljenih 10 meritev vrednosti Q, lete pa so bile avtomatsko statistično obdelane s programsko opremo, ki temelji na krivulji iz grafikona 1, v digitalnem sklerometru. Obdelane rezultate se izvozi na računalnik, dodatno uredi in pretvori v spodnjo preglednico (Preglednica 2).

i-to mesto	Vrednosti Q								Število udarcev	Povprečna vrednost f <sub>cc,i</sub> [MPa]	Standardni odklon s <sub>i</sub> [MPa]		
1	61.5	62.5	64.5	60.5	62	60.5	64.5	62	60	66	10	55.5	5.3
2	65	64	66.5	65.5	68	64	63	61.5	66.5	64	10	62	5.8
3	68.5	68	68.5	56	69	64.5	68.5	62.5	67.5	72.5	10	67.5	14.8
4	63	60.5	65.5	65	67	60.5	52	63	58	66.5	10	54.5	12
5	66	62.5	64	63.5	64.5	60.5	60	64.5	63.5	64.5	10	58	5.3
6	62.5	64	64.5	60	63	62.5	62	65.5	63.5	65.5	10	58	4.5
7	67.5	62	64.5	67	64.5	63.5	63	59	64	62.5	10	59	7
8	56.5	61	63	65	65	63	60	66.5	61.5	62.5	10	56	7.5
9	63.5	65.5	66.5	64	66	65.5	66.5	68	64	65	10	64.5	4.3
10	61	63	63.5	62	63.5	63.5	66	65	64.5	62	10	58.0	4.3
Skupaj povpreč								prečno:	59.3	7.1			

Preglednica 2: Rezultati ocene tlačne trdnosti betona s sklerometrom

Po rezultatih sklerometriranja na desetih mestih smo izračunali še skupno povprečno vrednost tlačne trdnosti in povprečni skupni standardni odklon.

Ocenjena tlačna trdnost s sklerometrom:

$$f_{cc} = f_{cc} \pm s = 59,3 MPa \pm 7,1 MPa$$

## 2.1.2 Pahometer – Ferroscan PS 200 S

Pri ugotavljanju armature je bil uporabljen Hiltijev pahometer (detektor kovin) – Ferroscan PS 200 S. Podjetje Hilti je razvilo učinkovit in uporabniku preprost pripomoček za odkrivanje armaturnih palic v betonu na podlagi magnetne indukcije. Skener generira elektromagnetno polje in sproti interpretira motnje magnetnega valovanja, ki ga povzročajo armaturne palice. Z njim se enostavno določi lego in premer palice v betonu in posledično tudi krovni sloj betona.

Natančnost skenerja [5]:

-	Natančnost meritve globine armaturne palice:	$\pm 1$	mm
-	Natančnost določanja položaja:	$\pm 3$	mm
-	Območje premera armaturne palice:	6-36	mm

Hiltijev skener PS 200 S je preprost za uporabo in je kompatibilen z monitorjem PSA 100, ki omogoča takojšno interpretacijo rezultatov že na terenu (Slika 2).



Slika 2: Monitor PSA 100 in Ferroscan PS 200 S

## 2.1.2.1 Potek dela in rezultati skenerja Ferroscan PS 200 S

Na območje preiskovanja geometrije armiranobetonskega nosilca se namesti kartonsko ploščo in na njo prilepi mrežo za potek meritev. Skener se pomika v prečni in vzdolžni smeri po ravnini mreže. Na ta način se posname nosilec po zgornji in spodnji ploskvi, s čimer se pridobi podatke o poziciji vzdolžne in prečne armature ter premer vseh palic. Na sliki 3 so prikazani 3D rezultati skeniranja zgornje ploskve obravnavanega nosilca, na sliki 4 pa rezultati skeniranja spodnje ploskve.



Slika 3: Prikaz rezultatov skeniranja zgornje ploskve nosilca s Ferroscanom PS 200 S



Slika 4: Prikaz rezultatov skeniranja spodnje ploskve nosilca s Ferroscanom PS 200 S

Kakor je razvidno iz 3D prikaza rezultatov skenirane zgornje in spodnje ploskve nosilca (Slika 3 in Slika 4), so bile za spodnjo natezno armaturo uporabljene 3 palice in za zgornjo konstrukcijsko armaturo 2 palici. Iz analize skeniranih podatkov se razbere, da je premer spodnje natezne armature 16 mm. Ker je bil sprejet sklep, da je armatura rebrasta in lahko rebra vplivajo na rezultate skeniranja, je bil izbran za eno stopnjo manjši premer armaturnih palic in sicer 14 mm, kar se je kasneje izkazalo za pravilno. Ravno tako je bil pri zgornji konstrukcijski armaturi izbran premer 12 mm in ne 14 mm ter za stremensko armaturo 8 mm namesto 10 mm, kot je razvidno iz obdelave rezultatov.

S skeniranjem je bila ugotovljena tudi debelina krovnega sloja spodnje armature betona približno 2 cm (c  $\approx$  2 cm), pri zgornji konstrukcijski armaturi pa 3 cm (c'  $\approx$  3 cm). Razmik med palicami natezne armature je približno 4,5 cm, med stremeni pa 15 cm.

## 2.1.3 Radar – X-Scan PS 1000

V sklopu nedestruktivnih preiskav geometrije nosilca je bila narejena še preiskava s Hiltijevim skenerjem X-Scan PS 1000, ki deluje po principu radarja.

Antene skenerja oddajajo elektromagnetne valove, kateri potujejo skozi preiskovani medij, v konkretnem primeru beton, in hkrati tudi sprejemajo odbite elektromagnetne valove od anomalij v mediju z drugačnimi karakteristikami. Preko hitrosti elektromagnetnega valovanja kot tudi časa potovanja valov skozi medij in odboja le-teh od anomalij, skener določi pozicijo in velikost anomalij v preiskovanem mediju. [6]

Natančnost in omejitve skenerja [7]:

-	Natančnost prikaza globine:	< 100 mm	$\pm 10$	mm
		>100 mm	±15	mm
-	Natančnost določanja položaja:		$\pm 10$	mm
-	Največja globina zaznavanja za določanje anomal	ij:	400	mm
-	Najmanjša razdalja med anomalijama:		40	mm

Hiltijev skener X-Scan PS 1000 je preprost za uporabo in ravno tako kompatibilen z monitorjem PSA 100, ki omogoča takojšno interpretacijo rezultatov že na terenu (Slika 5).



Slika 5: Monitor PSA 100 in X-Scan PS 1000

# 2.1.3.1 Potek dela in rezultati skenerja X-Scan PS 1000

Način skeniranja armiranobetonskega nosilca s skenerjem X-Scan PS1000 je v principu enako kot skeniranje s Ferroscanom PS 200 S, ki je opisano v poglavju 2.1.2. Na območje preiskovanja geometrije armiranobetonskega nosilca se namesti tršo podlogo (na primer tanko kompaktno pleksi steklo) in se na nanj prilepi mrežo za potek meritev. Skener se pomika v prečni in vzdolžni smeri po ravnini mreže ter se tako posname nosilec po zgornji in spodnji ploskvi.

Zaradi premajhne medsebojne razdalje vzdolžne armature, tako spodnje kot tudi zgornje, ter motenj zaradi stikovanj strižne in vzdolžne armature, rezultati skenerja niso uporabni, saj pogoj najmanjše razdalje med anomalijami ni izpolnjen. S pomočjo računalniške programske opreme za obdelavo rezultatov se je te poskušalo prečistiti in oceniti vsaj število palic vzdolžne armature. Na sliki 6 so prikazani 3D rezultati skeniranja spodnje ploskve obravnavanega nosilca, iz katere je možno z mero inženirskega občutka razbrati število armaturnih palic in sicer so tri. Ostalih geometrijskih karakteristik armiranobetonskega nosilca na podlagi takšnih rezultatov ni mogoče pridobiti, zato ta metoda za pridobivanje podatkov o količini armature in njeni lokaciji v nosilcih ni učinkovita.



Slika 6: Prikaz rezultatov skeniranja spodnje ploskve nosilca z X-Scanom PS 1000

## 2.2 Uporabljene destruktivne metode

Po končanem štiri točkovnem upogibnem preizkusu obravnavanega nosilca so bile opravljene še destruktivne raziskave, s katerimi se na podlagi porušitve vzorcev pridobi zanesljivejše podatke o materialnih karakteristikah sestavnih elementov nosilca. Izvrtana sta bila dva valja nad podporama za določitev tlačne trdnosti in elastičnega modula nosilca ter odvzeti vzorci vseh treh palic natezne armature ob podpori, na podlagi katerih se z nateznim preizkusom določi kvaliteto uporabljenega jekla za armiranje. Na koncu je bil nosilec s pomočjo pnevmatskega kladiva in rezalnika kovine razpolovljen na sredini razpona, s čimer je bila preverjena dejanska razporeditev osnovnega prečnega prereza nosilca.

## 2.2.1 Izvrtanje valjastih vzorcev iz armiranobetonskega nosilca

Po opravljenem štiri točkovnem upogibnem preizkusu sta bila nad obema podporama, kjer beton praktično ni bil poškodovan, izvrtana dva valja za namen natančnejše določitve tlačne trdnosti betona, elastičnega modula in prostorninske teže. Konkretni primer izvrtanja valjastega vzorca nad eno izmed podpor je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Izvrtanje valjastega vzorca nad podporo

Dimenzije in masa izvrtanih valjev:

Valj 1:

-	Premer:	$d_{valj 1} = 94,3 \text{ mm}$
-	Višina:	$h_{valj 1} = 160 \text{ mm}$
-	Masa:	$m_{valj 1} = 2472 g$

Valj 2:

-	Premer:	$d_{valj 2} = 94,3 \text{ mm}$
-	Višina:	$h_{valj 2} = 160 \text{ mm}$
-	Masa:	$m_{valj 1} = 2470 \text{ g}$

#### 2.2.1.1 Določitev prostorninske mase betona

Na podlagi izmer valjev in njune mase je določena prostorninska masa betona po spodnjih enačbah (1), (2) in (3).

$$A_{valj} = \frac{\pi \cdot d_{valj}^2}{4} \tag{1}$$

$$V_{valj} = A_{valj} \cdot h_{valj} \tag{2}$$

$$\rho = \frac{m_{valj}}{V_{vali}} \tag{3}$$

Wali	$d_{valj}$	$\mathbf{h}_{valj}$	$A_{valj}$	$V_{valj}$	m <sub>valj</sub>	ρ	ρ
valj	[mm]	[mm]	$[mm^2]$	[cm <sup>3</sup> ]	[g]	$[g/cm^3]$	$[kg/m^3]$
1	94.3	160	6984.1	1117.5	2472	2.212	2212
2	94.3	160	6984.1	1117.5	2470	2.210	2210
						ρ <sub>povprečno</sub> =	2211

Preglednica 3: Določitev prostorninske mase betona

Povprečna prostorninska masa betona v nosilcu znaša 2211 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.2.1.2 Potek tlačnega preizkusa valjastih vzorcev

Tlačni preizkus obeh valjastih vzorcev v preši je bil opravljen skladno s standardom EN 12390-3 [8]. Na valj 2 sta bila nameščena tudi merilna lističa za merjenje deformacij vzdolž daljše osi valja za potrebe določitve elastičnega modula betona.

Prvi valj se je postopoma obremenjeval vse do porušne tlačne sile  $F_{valj1}$ , ki znaša 307,1 kN. Na podlagi porušitve prvega valjčka se omeji vrednosti sile za ciklično obremenjevanje drugega vzorca, ki je nujno za določitev elastičnega modula betona. Pri preizkusu valja 2 se je tega najprej tlačno obremenjevalo približno do 1/3 sile  $F_{valj1}$  (102 kN) in nato razbremenjevalo do 15 % sile  $F_{valj1}$  (46 kN) dvakrat zaporedoma, tretjič pa se je valj obremenjevalo vse do porušitve vzorca. Porušna tlačna sila pri valju 2 znaša 340,4 kN.

Na podlagi rezultatov obeh preizkušancev sta določena povprečna tlačna trdnost in povprečni elastični modul betona. Porušitev obeh valjastih vzorcev vidimo na sliki 8.



Slika 8: Porušitev valjastih vzorcev (Valj 1 - levo in Valj 2 - desno)

#### 2.2.1.3 Določitev povprečne tlačne trdnosti betona

Povprečno tlačno trdnost  $f_c$  se določi skladno s standardom SIST EN 12390-3 [8]. S prešo se je določilo porušno silo  $F_{valj,i}$  vsakega izmed obeh valjev in preko spodnje enačbe (4) izvrednotilo povprečno tlačno trdnost betona.

$$f_{c,i} = \frac{F_{valj,i}}{A_{valj,i}} \tag{4}$$

Preglednica 4: Določitev povprečne tlačne trdnosti betona

Wali	$F_{valj,i}$	$d_{valj}$	$\mathbf{h}_{\mathrm{valj}}$	A <sub>valj</sub>	$\mathbf{f}_{c,i}$
vaij	[kN]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
1	307.1	94.3	160	6984.1	43.97
2	340.4	94.3	160	6984.1	48.74
				f <sub>c,povprečno</sub> =	46.35

Na podlagi tlačnega preizkusa znaša povprečna tlačna trdnost betona iz katerega je zgrajen nosilec 46,35 MPa. V primerjavi z rezultatom površinske tlačne trdnosti betona pridobljene s sklerometrom je razvidno, da je potrebno rezultat sklerometriranja vzeti nekoliko z rezervo, saj nam le-ta poda višji rezultat tlačne trdnosti. Posledično je iz standarda izbran beton C40/50.

#### 2.2.1.4 Določitev statičnega elastičnega modula betona

Elastični modul  $E_c$  se na podlagi tlačnega preizkusa določi skladno s standardom ISO 6784-1982 [9] preko merjenja deformacij vzdolž daljše osi izvrtanega valja. Na grafikonu 2 je prikazana odvisnost napetosti in deformacij pri obremenjevanju valja 2.



Grafikon 2: Diagram odvisnosti napetosti in deformacij iz tlačnega preizkusa valja 2

V spodnjem delu krivulje odvisnosti napetosti in deformacij na grafikonu 2, kjer se beton obnaša še linearno elastično, se vidi ciklično obremenjevanje betona. Natančnejši prikaz cikličnega obremenjevanja je na grafikonu 3.



Grafikon 3: Diagram napetosti v odvisnosti od deformacij v območju cikličnega obremenjevanja

Iz zgornjega diagrama cikličnega obremenjevanja nosilca (Grafikon 3) je razvidno, da se beton v tem delu obnaša izrazito elastično. Iz teh podatkov trojnega cikličnega obremenjevanja se iz spremembe napetosti in spremembe deformacij določi elastični modul po enačbi (5).

$$E_{c} = \frac{\Delta \sigma_{c}}{\Delta \varepsilon_{c}} = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{c1}}$$
(5)

Preglednica 5: Izračun statičnega elastičnega modula betona

Olympic in the	$\sigma_1$	ε1	$\sigma_2$	<b>E</b> <sub>2</sub>	Δσ	Δε	E <sub>c,i</sub>	Ec,i
Obremenjevanje	[MPa]	[‰]	[MPa]	[‰]	[MPa]	[‰]	[MPa]	[GPa]
1	8.20	0.229	12.82	0.381	4.63	0.152	30467	30.47
2	9.64	0.280	12.63	0.378	2.99	0.099	30253	30.25
3	9.55	0.280	12.58	0.381	3.04	0.101	30101	30.10
					E	ovprečno =	30274	30.27

#### 2.2.2 Odvzem vzorcev armaturnih palic iz armiranobetonskega nosilca

Ko je bil štiri točkovni upogibni preizkus armiranobetonskega nosilca opravljen, se je poleg izvrtanih valjev s pnevmatskim kladivom in rezalnikom kovine na mestu podpore odvzelo vzorce vseh treh nateznih armaturnih palic za namen laboratorijskega nateznega preizkusa v trgalnem stroju (Slika 9).



Slika 9: Odvzem vzorcev armaturnih palic s pnevmatskim kladivom

Potrjen je bil sklep, da je bila v nosilcu uporabljena rebrasta armatura. Za organiziranost nadaljevanja nateznega preizkusa so bile palice oštevilčene s števili 1-3 (Slika 10).

Izmerjen premer palic 1-3:

 $d_{\text{palica},1} = d_{\text{palica},2} = d_{\text{palica},3} = 13,9 \text{ mm}$ 

Izračunan prerez palic 1-3:

$$A_{\text{palica},1} = A_{\text{palica},2} = A_{\text{palica},3} = \frac{\pi \cdot d_{\text{palica},i}^2}{4} = 151,8 \text{ mm}^2$$



Slika 10: Vsi trije vzorci palic natezne (spodnje) armature

## 2.2.2.1 Potek nateznega preizkusa vzorcev armaturnih palic

Natezni preizkus vseh treh palic natezne armature je bil opravljen po standardu EN 10002-1 [10] v trgalnem stroju, katerega pogoj je, da mora biti vzorec palice tako dolg, da se ga lahko vpne v čeljusti. Dolžina vsakega izmed vzorcev armaturne palice (1-3) je znašala 60 cm, s čimer je bil pogoj dolžine vsakega vzorca za vpenjanje v trgalni stroj zadosten.



Slika 11: Vpet vzorec v trgalni stroj (levo), pretrg vzorca (desno)

Vsak vzorec se je statično postopno natezno obremenjeval vse do pretrga, ob tem sta bila merjeni sila in razteg vzorca ob vsaki stopnji obremenitve. Tako je bil pridobljen značilen diagram odvisnosti natezne sile in raztega posameznega vzorca, kar prikazuje grafikon 4.



Grafikon 4: Diagram odvisnosti sile in raztega vzorca pri nateznem preizkusu

#### 2.2.2.2 Določitev kvalitete uporabljenega jekla

Po opravljenih nateznih preizkusih vseh treh vzorcev se za vsak korak obremenjevanja iz sile in prečnega prereza vzorca izračuna napetost na meji elastičnosti z izrazom (6).

$$\sigma_{y,i} = \frac{F_{y,i}}{A_{palica,i}} \tag{6}$$

Na podlagi izračunanih napetosti za vsak korak obremenjevanja je spodaj prikazan diagram odvisnosti napetosti in raztezka vseh treh vzorcev (Grafikon 5).



Grafikon 5: Odvisnost napetosti in pomika pri nateznem preizkusu palic 1-3

Iz diagrama odvisnosti med napetostjo in raztezkom vsakega izmed vzorcev se odčita napetost na meji elastičnosti  $f_y$  in izračuna povprečno vrednost napetosti  $f_y$  vseh treh vzorcev, ki je rezultat nateznega preizkusa.

Dalian	$F_y$	$\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$	$\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$	
Palica	[kN]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[MPa]	
1	81.96	54.01	540.1	
2	80.24	52.88	528.8	
3	76.16	50.19	501.9	
		$f_{y,povprečno} =$	523.6	

Preglednica 6: Določitev napetosti na meji elastičnosti spodnje armature fy

Iz nateznega preizkusa v trgalnem stroju je določena napetost na meji elastičnosti  $f_y = 523,6$  MPa, iz česar se sklepa, da je vgrajena armatura kvalitete jekla S500.

## 2.2.3 Kontrola dimenzij armaturnih palic in njihove lege v nosilcu

Za ugotovitev natančnosti nedestruktivne metode s skenerjem Hilti – Ferroscan PS 200 S se je nosilec po opravljenem eksperimentu s pnevmatskim kladivom in rezalnikom armature razpolovilo na dva dela na polovici razpona. S tem je bil ugotovljen popolnoma točen položaj vseh armaturnih palic v prečnem prerezu, kar prikazuje slika 12. Dejanski razpored palic v nosilcu potrjuje zanesljivost podatkov pridobljenih s Hiltijevim detektorjem kovin Ferroscan PS 200 S.



Slika 12: Odstranjen beton na sredini razpona nosilca

Iz slike 12 se opazi, da se je armaturni koš v času betoniranja nekoliko posedel in pomaknil nekoliko proti enemu robu nosilca.

#### **3** OPIS IN MEHANSKE KARAKTERISTIKE ARMIRANOBETONSKEGA NOSILCA

V sklopu tega poglavja so zbrani podatki o obravnavanem armiranobetonskem nosilcu, tako neutrjenem kot tudi utrjenem s kompozitno CFRP lamelo, ki so pridobljeni na podlagi spremljevalnih nedestruktivnih in destruktivnih raziskav opisanih v poglavju 2.

#### 3.1 Geometrija

V tem poglavju je prikazana geometrija neutrjenega in utrjenega nosilca s CFRP lamelo. Takšno geometrijo se upošteva tekom vseh analiz.

#### 3.1.1 Geometrija obravnavanega neutrjenega nosilca

Obravnavani armiranobetonski nosilec je dolg 4,2 m, katerega prerez je dimenzij 24 x 16 cm. V njem so tri palice natezne armature premera 14 mm in dve palici konstrukcijske zgornje armature premera 12 mm. Stremena imajo premer 8 mm in so razporejena enakomerno vzdolž celega nosilca na medsebojni razdalji 15 cm. Na sliki 13 je prikazan vzdolžni prerez, na sliki 14 pa prečni prerez na polovici razpona obravnavanega neutrjenega nosilca pri štiri točkovnem upogibnem preizkusu. Te geometrijske karakteristike neutrjenega nosilca so enotne tekom vseh analiz in izračunov opravljenih v okviru naloge.



Slika 13: Vzdolžni prerez obravnavanega neutrjenega nosilca



Slika 14: Prečni prerez obravnavanega neutrjenega nosilca

## 3.1.2 Geometrija obravnavanega utrjenega nosilca s CFRP lamelo

Dolžina in osnovni prečni prerez obravnavanega armiranobetonskega nosilca je enak kot pri neutrjenem nosilcu, dodana je le utrditvena CFRP lamela prečnega prereza 10 x 1,4 mm in dolžine 3,55 m. Slika 15 prikazuje vzdolžni prerez, slika 16 pa prečni prerez na polovici razpona obravnavanega neutrjenega nosilca pri štiri točkovnem upogibnem preizkusu. Te geometrijske karakteristike so enotne tekom vseh analiz in izračunov utrjenega nosilca opravljenih v okviru naloge.



Slika 15: Vzdolžni prerez obravnavanega nosilca utrjenega s CFRP lamelo



Slika 16: Prečni prerez obravnavanega nosilca s CFRP lamelo

#### 3.2 Mehanske karakteristike materialov

Poglavje zajema določitev in princip upoštevanja materialnih modelov glede na standarde in priporočila pri analizi in dimenzioniranju konstrukcij.

#### 3.2.1 Beton

Beton spada med najpogosteje uporabljene materiale v gradbeni industriji. Opis njegovega realnega obnašanja je zelo kompleksen, na kar kažejo številne raziskave in mnogi različni načini interpretiranja njegovega obnašanja. Na podlagi spremljevalnih raziskav, prikazanih v poglavju 2, je bil izbran primerljiv beton iz standarda Eurocode 1992-1-1 [11] in sicer je to C40/50, katerega obnašanje v tlaku je s tem standardom tudi predpisano. Ker obnašanje betona v nategu v sklopu standarda ni obravnavano, je v ta namen uporabljen preprost model nateznega delovanja betona, ki sta ga definirala Kulicki in Kostem [12].

#### 3.2.1.1 Beton v tlaku

Eurocode 1992-1-1 [11] za analizo betonskih konstrukcij predpisuje odvisnost med napetostmi in deformacijami z izrazom (7).

$$\frac{\sigma_{c,A}}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$
(7)

$$k = 1, 1 E_{cm} \cdot \left| \mathcal{E}_{c1} \right| / f_{cm}$$

 $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ 

 $\mathcal{E}_c$  ... deformacija v betonu

- $\sigma_{c.A}$  ... napetost v betonu pri analizi konstrukcij
- $\mathcal{E}_{c1}$  ... deformacija pri največji tlačni trdnosti betona
- $f_{cm}$  ... srednja tlačna trdnost betona



Slika 17: Shematski diagram odvisnosti med napetostjo in deformacijo betona za analizo konstrukcij [11]

Za dimenzioniranje konstrukcij je predpisana odvisnost med napetostjo in deformacijo z delovnim diagramom parabola-premica z izrazoma (8) in (9).

$$\sigma_{c} = f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{c2}} \right)^{n} \right] \quad \text{za} \quad 0 \le \varepsilon_{c} \le \varepsilon_{c2}$$
(8)

$$\sigma_c = f_{cd} \qquad \qquad za \qquad \mathcal{E}_{c2} \le \mathcal{E}_c \le \mathcal{E}_{cu} \tag{9}$$

 $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \dots$  projektna tlačna trdnost betona  $n \dots$  eksponent odvisen od trdnostnega razreda betona  $\varepsilon_{c2} \dots$  deformacija pri doseženi največji tlačni napetosti  $\varepsilon_{cu2} \dots$  mejna tlačna deformacija betona  $\gamma_c \dots$  materialni varnostni faktor za beton (1,5)



Slika 18: Shematski delovni diagram parabola-premica tlačenega betona [11]

Pri analitičnem izračunu in numerični analizi upogibnega obnašanja obravnavanega nosilca je bil uporabljen diagram tlačnega obnašanja betona za analizo konstrukcij pri izračunu nosilnosti in dimenzioniranju pa delovni diagram parabola-premica.

#### 3.2.1.2 Beton v nategu

Eurocode standardi delovanja betona v nategu ne obravnavajo, vendar je bilo na to temo narejenih že veliko raziskav in modelov. Osnoven princip delovanja natezne nosilnosti betona je opisan v viru [13]. Pri numerični in analitični analizi konstrukcije obravnavanega armiranobetonskega nosilca je uporabljen preprost model upoštevanja delovanja betona v nategu, ki sta ga razvila Kulicki in Kostem (Slika 19) [12] za betone normalne trdnosti. Pri tem modelu je upoštevano, da se prva razpoka pojavi že pred doseženo natezno trdnostjo in sicer pri vrednosti definirani z izrazom (11).

$$\mathcal{E}_{ct} = \frac{f_{ct}}{E_c} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{ct} = 0,55\varepsilon_{ct} \tag{11}$$

 $\varepsilon_{max} = 0,7 \%$  ... mejna natezna deformacija pri kateri je vpliv natezne trdnosti zanemarljiv  $\varepsilon_{ct}$  ... deformacija pri natezni trdnosti betona

V kolikor je natezna trdnost betona nepoznana je predlagan izračun po izrazu (12).

$$f_{ct} = 0,26\sqrt{f_{ck}} \tag{12}$$

Beton ima kljub nastanku površinskih razpok še vedno določeno natezno trdnost, ki se postopoma z vedno večjo obremenitvijo zmanjšuje in glede na vir [12] postane zanemarljiva pri doseženi natezni deformaciji velikosti 0,7 ‰.



Slika 19: Shematski prikaz odvisnosti napetosti in deformacij za beton v nategu [12]

#### 3.2.2 Armatura

Armatura je obravnavana kot idealno elastoplastičen material in sicer brez utrjevanja skladno z Eurocode 1992-1-1, kot je predstavljeno na sliki 20. [11]



Slika 20: Shematski prikaz konstitutivnega diagrama za armaturo [11]

 $f_{yk}$  ... karakteristična meja elastičnosti jekla

 $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s \quad \dots \;$ računska meja elastičnosti jekla

- $\gamma_s$  ... materialni varnostni faktor za jeklo (1,15)
- $E_s$  ... elastični modul jekla

#### 3.2.3 CFRP lamela

CFRP lamelo se upošteva kot idealno elastičen material, pri dimenzioniranju pa se uporabi računsko vrednost elastičnega modula skladno z navodili iz tehničnega priporočila TR55 (Slika 21) [14]. V tehničnem priporočilu je obravnavano utrjevanje betonskih konstrukcij z uporabo kompozitnih materialov v skladu z Eurocode standardi.



Slika 21: Shematski prikaz konstitutivnega zakona za CFRP lamelo iz TR55 [14]

$$E_{CFRP,d} = \frac{E_{CFRP,k}}{\gamma_{CFRP,E} \cdot \gamma_{CFRP,m}}$$
(13)

$$\varepsilon_{CFRP,d} = \frac{\varepsilon_{CFRP,k}}{\gamma_{CFRP,\varepsilon} \cdot \gamma_{CFRP,m}}$$
(14)

$$f_{CFRP,d} = E_{CFRP,d} \cdot \varepsilon_{CFRP,d}$$
(15)

- $f_{CFRP,k}$  ... karakteristična natezna trdnost CFRP lamele
- $f_{CFRP,d}$  ... računska natezna trdnost CFRP lamele  $\mathcal{E}_{CFRP,k}$  ... karakteristična deformacija pri doseženi najvišji natezni trdnosti CFRP lamele  $\mathcal{E}_{CFRP,d}$  ... računska deformacija pri doseženi najvišji natezni trdnosti CFRP lamele  $\mathcal{E}_{CFRP,k}$  ... karakteristični elastični modul CFRP lamele  $\mathcal{E}_{CFRP,d}$  ... karakteristični elastični modul CFRP lamele  $\mathcal{P}_{CFRP,d}$  ... karakteristični elastični modul CFRP lamele  $\mathcal{P}_{CFRP,d}$  ... varnostni faktor za elastični modul pri mejnem stanju nosilnosti odvisen od materiala (1,1 za karbonsko lamelo)  $\mathcal{P}_{CFRP,\varepsilon}$  ... varnostni faktor za najvišjo dovoljeno deformacijo lamele pri mejnem stanju nosilnosti odvisen od materiala (1,25 za karbonsko lamelo)  $\mathcal{P}_{CFRP,m}$  ... varnostni faktor odvisen od izvedbe ojačitve (1,2 za ročno pritrjevanje)
# 3.3 Uporabljene materialne karakteristike pri analizah in dimenzioniranju

Iz rezultatov spremljevalnih raziskav opisanih v poglavju 2 je bilo pridobljenih veliko materialnih podatkov, s katerimi se opiše obnašanje obravnavanega armiranobetonskega nosilca. V tem poglavju so zbrani vsi vhodni podatki o materialih, ki so uporabljeni v nadaljnjih analizah in izračunih.

# 3.3.1 Karakteristike betona

Iz rezultatov raziskav sklerometriranja (Poglavje 2.1.1) in tlačnega preizkusa izvrtanih betonskih valjčkov (Poglavje 2.2.1) je bilo ugotovljeno, da je uporabljen beton, iz katerega je grajen armiranobetonski nosilec, skoraj enakovreden betonu iz trdnostnega razreda C40/50. Elastični modul  $E_{cm}$  ter deformacija pri doseženih maksimalnih napetostih  $\varepsilon_{c1}$  sta določena na podlagi laboratorijskih tlačnih preizkusov izvrtanih valjev. Ker natezna trdnost betona f<sub>ct</sub> ni bila pridobljena eksperimentalno, je ta ocenjena po enačbi (12). V preglednici 7 so zbrane mehanske lastnosti betona s katerimi se operira pri vseh nadaljnjih analizah in izračunih.

$\mathbf{f}_{ck}$	$f_{ck,cube}$	$\mathbf{f}_{cm}$	$\mathbf{f}_{ct}$	E <sub>cm</sub>	$\epsilon_{c1}$	E <sub>cu1</sub>	Ec2	Ecu2	n
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[\]
40	50	48	1.64	30270	2.15	3.5	2.0	3.5	2

Preglednica 7: Karakteristike uporabljenega betona

# 3.3.1.1 Upoštevanje betona v tlaku

Materialni model BP obnašanja betona za analizo konstrukcij v tlaku je za obravnavani primer defirniran z izrazom (7) iz poglavja 3.2.1.1. V tem primeru se beton obnaša kot elastoplastičen material, kateremu po dosegu tlačne trdnosti napetost prične padati. Materialni model BK je do najvišje možne napetosti ravno tako izračunan po izrazu (7) nato pa ima plato s konstantno napetostjo. Slednji je uporabljen pri analizah nosilca v tem delu. Ob materialna modela sta prikazana na grafikonu 6. [15]



Grafikon 6: Izračunan diagram betona za analizo konstrukcij

Pri dimenzioniranju armiranobetonskega elementa in ojačitve je bil uporabljen računski delovni diagram betona (Slika 18), ki je definiran z izrazoma (8) in (9). Za dimenzioniranje CFRP lamele v konkretnem primeru je delovni diagram enakovreden tistemu za beton razreda C40/50 in je prikazan na grafikonu 7.



# **3.3.1.2** Upoštevanje betona v nategu

Pri analizi dejanskega odziva konstrukcij se lahko upošteva vpliv natezne trdnosti betona (Grafikon 8 in Slika 17), kar je bilo uporabljeno tudi v materialnem modelu betona pri numerični analizi. Poenostavljen izračun obnašanja betona v nategu je opisan v poglavju 3.2.1.2.



Grafikon 8: Poenostavljen izračun napetosti v odvisnosti od deformacij betona v nategu

#### 3.3.2 Karakteristike armature

Kot so pokazale spremljevalne raziskave vzorcev natezne armature (Poglavje 2.2.1.4) je uporabljeno jeklo kvalitete S500 (Preglednica 8), katerega natezno obnašanje je opisano z bi-linearnim delovnim diagramom za armaturo (Grafikon 9).





3.3.3 Karakteristike CFRP lamele

Za ojačitev obravnavanega nosilca je bila uporabljena kompozitna karbonska lamela Carboplate E170 širine 10 cm in debeline 1,4 mm, ki jo izdeluje podjetje MAPEI. Tehnični podatki so podani s strani proizvajalca [16]. Za analizo armiranobetonskega nosilca in dimenzioniranje CFRP lamele sta izračunana karakteristični in računski potek napetosti v odvisnosti od deformacij, kot je opisano v poglavju 3.2.3, za konkretni primer pa predstavljena na grafikonu 10.



Preglednica 9: Karakteristike CFRP lamele

f <sub>CFRP,k</sub>	E <sub>CFRP,k</sub>	ECFRP,k	γcfrp,e	γcfrp,m	γcfrp,ε	f <sub>CFRP,d</sub>	E <sub>CFRP,d</sub>	ECFRP,d
[MPa]	[MPa]	[‰]	[\]	[\]	[\]	[MPa]	[MPa]	[‰]
3100	170000	18.24	1.10	1.20	1.25	3100	128788	12.16

# 4 EKSPERIMENT – UPOGIBNI PREIZKUS NOSILCA

V okviru eksperimentalne analize obravnavanega 4,2 m dolgega armiranobetonskega nosilca, neutrjenega in utrjenega s CFRP lamelo, je bil narejen štiri točkovni upogibni preizkus prostoležečega nosilca. Nosilec je bil postavljen na dve členkasti podpori tlorisnih dimenzij 30 x 30 cm, katerih ena je bila pomična in druga nepomična. Osi podpor sta bili odmaknjeni od krajnih robov nosilca za 15 cm, kar definira medosno razdaljo velikosti 3,9 m. Na vrhnji rob sta bila postavljena dva valjčka na medsebojnem razmiku 1 m (vsak valj je 0,5 m odmaknjen od sredine nosilca), preko katerih se je s hidravličnim batom vsiljevalo vertikalno silo (Slika 22).



Slika 22: Prikaz pozicij obremenjevanja in merilnih mest pri štiri točkovnem upogibnem preizkusu

# 4.1 Eksperimentalna analiza neutrjenega armiranobetonskega nosilca

Neutrjen nosilec se je z namenom poslabšanja začetnega stanja postopno obremenilo tako, da je nosilec v nateznem delu razpokal. S tem je bilo pridobljeno stanje nosilca, s kakršnim se je možno srečati v praksi, ko je obstoječ nosilec že dal skozi del svoje življenjske dobe.

# 4.1.1 Potek preizkusa neutrjenega armiranobetonskega nosilca

V namen približanja realnemu stanju nosilcev v obstoječih konstrukcijah, ki so potrebni utrditve se je nosilec postopoma obremenjevalo s silo F v elastičnem območju in sicer do približno 2 ‰ specifične deformacije v armaturi. S tem je bilo doseženo stanje, ko so se na spodnjem nateznem delu nosilca že dodobra ustvarile razpoke v betonu. Po takšnem doseženem stanju se je neutrjeni nosilec popolnoma razbremenilo.

Tekom obremenjevanja se je na sredini razpona nosilca merilo specifične deformacije v prečnem prerezu in sicer na sledečih mestih:

- 2 merilna lističa na vrhu betonskega prereza SG1 in SG2 (tlačne deformacije v betonu  $\varepsilon_c$ )
- 1 merilni listič na sredinski palici spodnje natezne armature SG3 (natezne deformacije v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$ )

Vzporedno sta bila spremljana tudi vertikalni pomik na sredini razpona nosilca  $U_{vert}$  z merilcema pomikov (LVDT1 in LVDT2) ter postopen nanos obremenitvene sile F. Slika 23 prikazuje neutrjen nosilec med potekom štiri točkovnega upogibnega preizkusa v času elastičnega obnašanja le-tega.



Slika 23: Preizkus neutrjenega armiranobetonskega nosilca

# 4.1.2 Rezultati preizkusa neutrjenega armiranobetonskega nosilca

Preko merilnih lističev deformacij in merilcev pomika na sredini razpona so pridobljene naslednje eksperimentalne zveze in sicer med silo obremenjevanja F in vertikalnim pomikom U<sub>vert</sub> (Grafikon 11), tlačno deformacijo v betonu na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  (Grafikon 12) in natezno deformacijo v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$  (Grafikon 13).



Grafikon 11: Eksperimentalna odvisnost F - Uvert neutrjenega nosilca

Iz začetnega naklona krivulj na grafikonih 12 in 13 v nadaljevanju je opazen vpliv natezne trdnosti betona na potek deformacij in sicer je v tem delu naklon strmejši, nato pa pri dosegu vrednosti sile F = 10 kN postane bolj položen. Iz krivulje odvisnosti obremenitvene sile F in vertikalnega pomika U<sub>vert</sub> na grafikonu 11 pa vpliv natezne trdnosti betona ni razviden.



Grafikon 13: Eksperimentalna odvisnost F –  $\varepsilon_s$  neutrjenega nosilca

Eksperimentalni diagrami nakazujejo na to, da se nosilec do obtežbe F = 40 kN obnaša izrazito elastično, saj se vse količine po razbremenjevanju vrnejo skoraj v izhodišče oziroma prvotno ravnotežno stanje.

# 4.2 Eksperimentalna analiza utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo

Za analizo vpliva utrditve armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo se je izvedlo štiri točkovni upogibni preizkus še na utrjenem nosilcu in sicer vse do porušitve.

#### 4.2.1 Utrditev armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo

Po končanem preizkusu neutrjenega nosilca se je tega popolnoma razbremenilo in utrdilo s CFRP lamelo. V času pritrjevanja CFRP lamele je bil nosilec zasukan okoli vzdolžne osi za 180 stopinj tako, da je spodnji del prereza gledal navzgor in se je nanj naneslo dvokomponentno tiksotropno epoksidno lepilo proizvajalca MAPEI [17]. Lepilo se je posebej naneslo tudi na CFRP lamelo in se jo nato postopoma pritiskalo na tisti del nosilca, kjer je bilo predhodno tudi že nanešeno lepilo (Slika 24). Paziti

je bilo potrebno, da se ob pritrjevanju lamele ne pojavijo zračne pore v lepilu, zato je bil uporabljen ročni valjar za močan pritisk lamele in posledično odstranitev zraka.



Slika 24: Potek namestitve CFRP lamele

# 4.2.2 Potek preizkusa utrjenega armiranobetonskega nosilca

Po namestitvi CFRP lamele na armiranobetonski nosilec se je utrjeni nosilec postopoma obremenjevalo vse do porušitve, ki se je zgodila krhko na stiku med betonom in CFRP lamelo.

Tudi pri tem delu eksperimentalne analize se je merilo obnašanje prečnega prereza nosilca na sredini razpona preko merilnih lističev za merjenje specifičnih deformacij na sledečih mestih:

- 2 merilna lističa na vrhu betonskega prereza SG1 in SG2 (tlačne deformacije v betonu  $\varepsilon_c$ )
- 1 merilni listič na sredinski palici spodnje natezne armature SG3 (natezne deformacije v spodnji armaturi  $\epsilon_s$ )
- 2 merilna lističa na vgrajeni CFRP lameli SG4 in SG5 (natezne deformacije v lameli  $\varepsilon_{CFRP}$ )

Vzporedno je bil spremljan tudi vertikalni pomik U<sub>vert</sub> na sredini razpona nosilca z merilcema pomikov (LVDT1 in LVDT2) ter postopen nanos obremenitve s silo F. Slika 25 prikazuje obravnavani utrjeni nosilec med izvajanjem štiri točkovnega upogibnega preizkusa.



Slika 25: Preizkus utrjenega armiranobetonskega nosilca

# 4.2.3 Rezultati preizkusa utrjenega armiranobetonskega nosilca

Iz merilnih lističev in programske opreme za izvedbo štiri točkovnega preizkusa so pridobljene eksperimentalne meritve različnih količin na sredini razpona nosilca (vertikalni pomik U<sub>vert</sub>, tlačna deformacija na vrhu betonskega prereza  $\varepsilon_c$ , natezna deformacija v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$ , natezna deformacija v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$ ) v odvisnosti od sile obremenjevanja F in so prikazane s krivuljami na grafikonih 14, 15, 16 in 17. Iz teh eksperimentalnih diagramov je razvidno sprva izrazito elastično obnašanje utrjenega nosilca, ki se prične obnašati plastično malo pred doseženo obtežno silo 80 kN. Nato se vertikalni pomiki U<sub>vert</sub>, tlačne deformacije v betonu  $\varepsilon_c$ , natezne deformacije v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$  in natezne deformacije v lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  pričnejo povečevati hitreje ob manjši dodani obremenjevalni sili F, kar nakazuje padec upogibne nosilnosti.



Grafikon 14: Eksperimentalna odvisnost F – Uvert utrjenega nosilca



Grafikon 15: Eksperimentalna odvisnost F –  $\varepsilon_c$  utrjenega nosilca

Iz eksperimentalnega diagrama odvisnosti obremenjevalne sile F od natezne deformacije v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$  (Grafikon 16) je razvidno, da se je merilni listič, nateznih deformacij v spodnji natezni armaturi, približno na meji tečenja armature kvalitete S500 pri 2,5 ‰ poškodoval in ni več kazal točnih vrednosti deformacij armature. Plastifikacija armature pogojuje obnašanje celotnega armiranobetonskega utrjenega nosilca. Ko armatura prične teči, se zgodi padec upogibne nosilnost in hkrati se zmanjša upogibna togost nosilca.



Grafikon 16: Eksperimentalna odvisnost F – ɛs utrjenega nosilca



Grafikon 17: Eksperimentalna odvisnost F –  $\varepsilon_{CFRP}$  utrjenega nosilca

Pri velikosti obremenitvene sile F = 98,2 kN se zgodi porušitev utrjenega nosilca in sicer na način krhkega loma betona, kar pomeni, da lepilo na stiku med lamelo in nosilcem odtrga tanko plast betona, kar je prikazano na sliki 26.



Slika 26: Porušitev utrjenega nosilca s CFRP lamelo

# 5 NUMERIČNA ANALIZA

Za modeliranje in analizo neutrjenega in utrjenega upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca je bilo uporabljeno programsko orodje Abaqus [18] [19] [20], ki omogoča reševanje zahtevnih nelinearnih analiz na podlagi metode končnih elementov (MKE). V konkretnem primeru nelinearne analize je bil uporabljen izračun Static/Riks, ki deluje po metodi ločne dolžine. Ta izračun se navadno uporablja za nelinearno analizo stabilnosti, analize z upoštevanjem geometrijskih nelinearnosti, nelinearnega obnašanja materiala ipd. Namen numerične analize se je približati realnemu stanju oziroma v konkretnem primeru z njo čimbolj natančno opisati štiri točkovni upogibni eksperiment armiranobetonskega neutrjenega in utrjenega nosilca s CFRP lamelo.

Najprej je bil modeliran numerični model neutrjenega nosilca, saj je ta pogoj za numerično analizo utrjenega nosilca. Če se z modelom neutrjenega nosilca dovolj dobro opiše obnašanje eksperimentalnega preizkusa, potem se v nadaljevanju procesa izdelave modela utrjenega nosilca le doda numerični model CFRP lamele in pripiše ustrezna povezava med betonom in lamelo.

# 5.1 Numerični model

Numerični model je narejen z uporabo grafičnega vmesnika Abaqus/CAE, v katerem je možna tudi vizualizacija rezultatov pri različnih obtežnih stopnjah.

Vsak posamezni sestavni del armiranobetonskega nosilca se modelira kot samostojen del. Betonski del nosilca je modeliran s 3D deformabilnimi končnimi elementi »Solid« tipa C3D8R, zgornja in spodnja armatura pa z linijskimi končnimi elementi »Truss« tipa T3D2. Vse sestavne dele se združi v modulu grafičnega vmesnika imenovanega »Assembly«, kjer se določi njihova pozicija v prostoru. Podpori nosilca sta definirani linijsko in sicer tako, da so pri členkasti podpori preprečeni pomiki v smereh X, Y in Z globalnega koordinatnega sistema, pri členkasti pomični podpori pa le pomika Y in Z, kot je prikazano na sliki 27.



Slika 27: Numerični model neutrjenega nosilca

Nad sredino razpona nosilca je definirana referenčna točka RP-1, ki ima sproščen le pomik v smeri Y. Referenčna točka je z linijami, na katerih deluje obtežba, spojena s povezavo imenovano »Coupling« in sicer na način, da se linije obnašajo enako kot točka RP-1. Če na točko RP-1 deluje sila, se preko takšne povezave sila prerazporedi na podrejeni liniji, ki sta definirani na nosilcu. Sila F je definirana kot točkovna s prijemališčem v točki RP-1.

Numerična analiza se vrši po obtežnih korakih, zato se lahko prikaže rezultate napetosti, deformacij, sile ipd., za sestavne elemente ali točke nosilca za vsak obtežni korak ločeno.

Povezava med armaturo in betonom je definirana kot »Embedded region«, pri kateri se definira beton kot gostujoče območje in armaturo kot vstavljen element. S takšno povezavo se armaturi omeji prostostne stopnje v vozliščih, da so te enake interpoliranim vozliščnim vrednostim betonskega območja. Definirane povezave med posamezni sestavnimi elementi numeričnega modela so razvidne iz slike 28.



Slika 28: Prikaz povezav elementov numeričnega modela

Pri numeričnem modeliranju utrjenega armiranobetonskega nosilca je vse definirano enako kot pri neutrjenem nosilcu, dodana je le CFRP lamela, za katero so uporabljeni 3D končni elementi »Solid« tipa C3D8R. Lamela je z betonom povezana s povezavo »Tie«, pri kateri se definira glavno in podrejeno ploskev. Glavna ploskev je površina betonskega nosilca, podrejena pa površina lamele, kjer se beton in lamela stikata. Ta povezava omeji prostostne stopnje v vozliščih na stikajoči se površini lamele, da so te enake interpoliranim prostostnim stopnjam vozlišč na spodnji ploskvi betona. Pri definiciji končnih elementov ni bistvenega pomena, da so končni elementi betona in lamele enaki po velikosti ter da se njihova vozlišča stikajo. Slika 29 predstavlja numerični model utrjenega nosilca s CFRP lamelo.



Slika 29: Numerični model utrjenega nosilca s CFRP lamelo

Za doseg zadovoljive natančnosti rezultatov je numerični model potrebno razdeliti na dovolj gosto mrežo končnih elementov. Mreža končnih elementov betonskega dela je razdeljena na končne elemente dimenzij približno 2,67 x 2,5 x 2,5 cm, kot je prikazano na sliki 30.



Slika 30: Mreža končnih elementov betonskega dela nosilca

Palice zgornje in spodnje armature so razdeljene na linijske končne elemente dolžine 2,5 cm. Na sliki 31 je razdelitev armaturnih palic na končne elemente nakazana z označenimi rdečimi točkami.



Slika 31: Mreža končnih elementov zgornje in spodnje armature

Kasneje dodana lamela je modelirana iz končnih elementov dimenzij 2,5 x 2,5 x 0,14 cm. CFRP lamela razdeljena na mrežo končnih elementov se vidi na sliki 32.



Slika 32: Mreža končnih elementov CFRP lamele

# 5.2 Materialni modeli

Modeli materialov opisujejo obnašanje vsakega materiala pri vplivu različnih stopenj obremenitve in so splošno definirani v poglavju 3.2 ter za konkretni obravnavani primer določeni v poglavju 3.3. Materialni modeli služijo kot vhodni podatki za nelinearno numerično analizo v programu Abaqus.

# 5.2.1 Materialni model betona

Abaqus omogoča modeliranje betona z naprednimi materialnimi modeli. Ti modeli omogočajo izračun nelinearnih odzivov, ki upoštevajo plastifikacijo betona v tlaku, plastično obnašanje betona v nategu, nastanek razpok ipd. V našem konkretnem obravnavanem primeru je uporabljen materialni model imenovan »Concrete damage plasticity«, pri katerem je obnašanje betona v tlaku definirano z materialnim modelom BK, iz grafikona 6 določenega v poglavju 3.3.1.1, v nategu pa s poenostavljenim obnašanjem betona v nategu določenim v poglavju 3.3.1.2 in predstavljenim na grafikonu 8.

# 5.2.2 Materialni model armature

Armatura v programu je bila definirana s karakteristikami in delovnim diagramom iz poglavja 3.3.2. Do meje elastičnosti je obnašanje armature definirano z elastičnim modulom, nato pa se deformacije pri konstantni napetosti nadaljujejo do 10 ‰.

# 5.2.3 Materialni model CFRP lamele

CFRP lamela je definirana s karakterističnimi vrednostmi iz poglavja 3.3.3. Obnašanje lamele je obravnavano kot elastično do karakteristične natezne trdnosti.

#### 5.3 Numerična analiza neutrjenega armiranobetonskega nosilca

Numerična analiza neutrjenega nosilca je izračunana do porušitve numeričnega modela in sicer do sile nekoliko manjše od 65 kN, kjer numerični model odpove. Rezultati specifičnih količin (vertikalni pomik  $U_{vert}$ , tlačna deformacija v betonu na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  in natezna deformacija v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$ ) v odvisnosti od sile obremenitve F (Grafikon 18, Grafikon 19 in Grafikon 20) nakazujejo na to, da se neutrjen nosilec obnaša elastično približno do sile 60 kN, nato pa se začne spodnja natezna armatura plastificirati, kar pogojuje nadaljnje obnašanje neutrjenega nosilca. Vertikalni pomik  $U_{vert}$ , tlačna deformacija betona na vrhu prereza nosilca  $\varepsilon_c$  in natezna deformacija v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$  so v odvisnosti od sile F merjene na prečnem prerezu na sredini razpona nosilca. Manjša izboklina na diagramih do vrednosti okoli 5 kN je posledica delovanja betona v nategu, ki pripomore k večji upogibni nosilnosti celotnega nosilca.







Grafikon 20: Numerična odvisnost F –  $\varepsilon_s$  neutrjenega nosilca

V nadaljevanju (Slika 33, Slika 34 in Slika 35) je prikaz deformiranega armiranobetonskega nosilca in sestavnih elementov pri sili F = 60 kN, ko se začne ta obnašati plastično, se pravi po plastifikaciji armature.



Slika 33: Vertikalni pomiki neutrjenega nosilca pri sili F = 60 kN

Iz deformacij v betonu je razvidno, da na mestih obremenjevanja na zgornji ploskvi nosilca lokalno nastopijo izrazito tlačne deformacije, ki se prenašajo v notranjost nosilca.



Slika 34: Vzdolžne deformacije v betonu pri sili F = 60 kN

Slika 35 prikazuje vzdolžne deformacije v armaturi. Spodnja natezna armatura doseže mejo elastičnosti pri 2,5 ‰ in pade v območje rdeče barve na legendi vzdolžnih deformacij. Razvidno je značilno delovanje spodnje armature v nategu in zgornje v tlaku pri upogibno obremenjenem armiranobetonskem nosilcu.



Slika 35: Vzdolžne deformacije v armaturi pri sili F = 60 kN

#### 5.4 Numerična analiza utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo

Kakor numerični izračun neutrjenega nosilca je tudi izračun utrjenega nosilca izveden do vrednosti porušitve, kjer numerični model nosilca odpove in sicer pri vrednosti nekoliko manj od obremenjevalne sile F = 100 kN. Količine U<sub>vert</sub> (vertikalni pomik),  $\varepsilon_c$  (tlačne deformacije v betonu na vrhu prereza nosilca),  $\varepsilon_s$  (natezne deformacije v spodnji natezni armaturi),  $\varepsilon_{CFRP}$  (natezne deformacije v lameli) so v odvisnosti od sile obremenjevanja F merjenje na prečnem prerezu na sredini razpona nosilca, kar je prikazano na grafikonih 21, 22, 23 in 24. Iz teh grafikonov je razvidno, da se nosilec obnaša elastično do obremenjevalne sile F = 80 kN, ko deformacije v armaturi dosežejo mejo elastičnost 2,5 ‰ in prične armatura teči. Nadaljnji potek odvisnosti prej omenjenih količin od obremenjevalne sile F je nekoliko bolj strm, kot pri neutrjenem nosilcu, saj se z dodano CFRP lamelo celotna togost nosilca nekoliko poveča. Medtem ko armatura prične plastično teči, se CFRP lamela še vedno obnaša elastično.



Grafikon 22: Numerična odvisnost F – εc utrjenega nosilca



Grafikon 24: Numerična odvisnost F –  $\varepsilon_{CFRP}$  utrjenega nosilca

Spodaj je prikazan potek vertikalnih pomikov celotnega utrjenega nosilca s CFRP lamelo na deformiranem numeričnem modelu pri sili obremenjevanja F = 80 kN, ko pride v armaturi do plastifikacije (Slika 36).



Slika 36: Vertikalni pomiki utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN

V nadaljevanju je po posameznih sestavnih elementih pri obremenjevalni sili F = 80 kN prikazan potek vzdolžnih deformacij (Slika 37, Slika 38 in Slika 39).



Slika 37: Vzdolžne deformacije v betonu utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN



Slika 38: Vzdolžne deformacije v armaturi utrjenega nosilca pri sili F = 80 kN



Slika 39: Vzdolžne deformacije utrjenega nosilca v CFRP lameli pri sili F = 80 kN

Iz primerjave vzdolžnih nateznih deformacij v armaturi (Slika 38) in CFRP lameli (Slika 39) pri obtežni sili F = 80 kN je razvidno, da so deformacije v armaturi nekoliko manjše od tistih v CFRP lameli. Razlog za to je večja razdalja od nevtralne osi pri CFRP lameli kakor pri armaturi.

# 6 ANALITIČNI IZRAČUN

V tem poglavju je predstavljen analitični izračun upogibnega obnašanja neutrjenega in utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo. Celoten analitični račun izhaja iz ravnotežja upogibnega momenta v prečnem prerezu na sredini razpona nosilca. To pomeni, da je upogibna nosilnost nateznih elementov (armatura in CFRP lamela) enaka upogibni nosilnosti betona v tlačeni coni. Enačba (16) velja za neutrjen nosilec, enačba (17) pa za utrjen nosilec.

$$M_{Rd,s,A} = M_{Rd,c,A} = M_{Rd,A} \tag{16}$$

$$M_{Rd,s+CFRP,A} = M_{Rd,c,A} = M_{Rd,A}$$

$$\tag{17}$$

 $M_{Rd,s,A}$  ... analitična upogibna nosilnost prereza, ki jo zagotavlja armatura  $M_{Rd,s+CFRP,A}$  ... analitična upogibna nosilnost prereza, ki jo zagotavljata armatura in lamela skupaj  $M_{Rd,c,A}$  ... analitična upogibna nosilnost prereza, ki jo zagotavlja beton v tlačeni coni  $M_{Rd,A}$  ... analitična upogibna nosilnost prereza

Pri izpeljavah so napetosti ter deformacije v betonu, armaturi in CFRP lameli upoštevane s pozitivnim predznakom, zato so tudi pripadajoče rezultirajoče sile pozitivno predznačene. Na vseh slikah pa je prikazana pravilna smer delovanja.

# 6.1 Predpostavke in poenostavitve analitičnega izračuna

Pri analitičnem izračunu je obravnavan primer čistega upogiba pravokotnega nosilca brez osne sile. Predpostavke in poenostavitve so povzete po standardu SIST EN 1992-1-1 [11] z izjemo razporeditve napetosti v betonu v tlačeni coni prereza.

Predpostavke in poenostavitve:

- Bernoulli-Navier-jeva predpostavka o ravninskih prerezih: Prerez, ki je bil raven pred obremenitvijo, ostane raven tudi po njej.
- Predpostavljena je popolna sprijemnost med armaturo in betonom, ki jo obdaja, kar pomeni, da je deformacija v armaturi enaka deformaciji betona na mestu stika med njima.
- Natezna nosilnost betona se zanemari.

Namesto delovnega diagrama betona za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na osno-upogibno obremenitev se upošteva diagram za analizo konstrukcij opisan v poglavju 3.2.1.1. Za obnašanje jekla se uporabi enostaven diagram jekla brez utrditve, kot je opisan v poglavju 3.2.2. Zaradi želje po opisu dejanskega obnašanja obravnavanega nosilca se v vseh izračunih uporablja karakteristične vrednosti materialnih parametrov brez upoštevanja materialnih varnostnih faktorjev.

# 6.2 Analitični izračun neutrjenega armiranobetonskega nosilca

Z analitičnim izračunom neutrjenega nosilca se poskuša preko fizikalnih enačb čim bolj natančno opisati obnašanje neutrjenega nosilca pred utrditvijo, saj je za določitev naknadne utrditve s CFRP lamelo potrebno poznavanje upogibne nosilnosti le-tega.

# 6.2.1 Izpeljava osnovnih enačb za upogibno nosilnost neutrjenega prereza

Na podlagi literature [21] in prikaza upogibnega ravnotežja po prerezu na sliki 40 sledi izpeljava za izračun upogibne nosilnosti neutrjenega nosilca.



Slika 40: Ravnotežje v prečnem prerezu neutrjenega nosilca pri analitičnem izračunu

Višino tlačne cone x se izrazi iz deformacij zgornjega roba prereza in natezne deformacije armature preko podobnih trikotnikov z izrazom (18):

$$x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s} \cdot d \tag{18}$$

Višino tlačne cone x lahko zapišemo tudi s pomočjo koeficienta višine tlačne cone kx:

 $x = k_x \cdot d \tag{19}$ 

$$k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s} \tag{20}$$

Vpelje se brezdimenzionalna koordinata  $\zeta$ , ki ima izhodišče na mestu nevtralne osi. S pomočjo te se določi deformacijo betona kjerkoli po višini prereza z izrazom (21).

$$\mathcal{E}_{c}\left(\zeta\right) = \frac{\mathcal{E}_{1}\cdot\zeta\cdot d}{x} = \frac{\mathcal{E}_{1}\cdot\zeta}{k_{x}} \qquad 0 \le \zeta \le k_{x} \tag{21}$$

Pri nadaljnjem izpeljevanju upogibne nosilnosti, ki jo zagotavlja betonski del prereza, se upošteva obliko razporeda napetosti po betonu z diagramom za analizo konstrukcij s platojem – materialni model BK iz poglavja 3.3.1.1 in sicer z izrazom (22).

$$0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{c1}: \qquad \frac{\sigma_{c,A}}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

$$\varepsilon_{c1} \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu1}: \qquad \frac{\sigma_{c,A}}{f_{cm}} = 1$$
(22)

$$\eta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{c1}}$$
(23)

Če se v enačbo (23) vstavi izraz (21) in nato še (20) je s tem izpeljana sledeča zveza:

$$\eta = \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{k_x \cdot \varepsilon_{c1}} = \frac{\zeta \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_s)}{\varepsilon_{c1}}$$
(24)

Podobno kot je v literaturi [21] izpeljan brezdimenzionalni koeficient upogibne nosilnosti betonskega dela prereza  $k_d$ , se za analitični izračun izpelje koeficient  $k_{d,A}$ , le da je pri tem uporabljen potek napetosti iz enačbe (22):

$$k_{d,A} = \int_{0}^{\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1}+\varepsilon_{s}}} \frac{\sigma_{c,A}(\zeta)}{f_{cm}} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1}+\varepsilon_{s}} + \zeta\right) d\zeta + \int_{\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1}+\varepsilon_{s}}}^{\frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1}+\varepsilon_{s}}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1}+\varepsilon_{s}} + \zeta\right) d\zeta$$
(25)

Na podlagi izpeljave koeficienta rezultante napetosti betona glede na težišče natezne armature  $k_z$  iz literature [21] se izpelje koeficient  $k_{z,A}$ :

$$k_{z,A} = \frac{k_d}{\int\limits_0^{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl}+\varepsilon_s}} \frac{\sigma_{c,A}(\zeta)}{f_{cm}} d\zeta + \int\limits_{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl}+\varepsilon_s}}^{\frac{\varepsilon_{l}}{\varepsilon_{cl}+\varepsilon_s}} d\zeta}$$
(26)

 $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_c \ \dots \ \mathbf{v}$ nadalj<br/>njih izračunih deformacija v betonu na vrhu prereza

Upogibna nosilnost betonskega dela prereza se sedaj lahko poračuna po enačbi (27).

$$M_{Rd,c,A} = f_{cm} \cdot b \cdot d^2 \cdot k_{d,A}$$
<sup>(27)</sup>

Določitev analitičnega koeficienta armature k<sub>s,A</sub> pri neutrjenem nosilcu sledi po enačbi (28).

$$k_{s,A} = \frac{1}{k_{z,A}} \tag{28}$$

Določitev upogibne nosilnosti armature neutrjenega nosilca se določi z enačbo (29).

$$M_{Rd,s,A} = \begin{cases} \frac{A_s}{k_{s,A}} \cdot d \cdot E_s \cdot \varepsilon_s & ; & 0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{sy} \\ \frac{A_s}{k_{s,A}} \cdot d \cdot f_{yk} & ; & \varepsilon_{sy} \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{su} \end{cases}$$
(29)

#### 6.2.2 Izračun upogibne nosilnosti obravnavanega neutrjenega nosilca

V programu Excel se ob uporabi enačb (25), (26), (27), (28) in (29) ter upoštevanjem ravnotežnega pogoja (16) izračuna upogibno nosilnost prereza preko dodatka »Reševalnik«. Ta Excelov dodatek omogoča reševanje sistema enačb z večjim številom neznank. Glede na izbrano deformacijo v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$ , program določi pripadajočo tlačno deformacijo  $\varepsilon_c$  v betonu tako, da je prerez v ravnotežju, kar pogojuje enačba (16).

Pri vsaki upogibni nosilnosti prereza je preko enačbe (30) analitično določena še sila F, ki jo prenese prostoležeči nosilec obtežen z dvojno točkovno obtežbo.

$$F = \frac{2 \cdot M_{Rd,s,A}}{L_1} = \frac{2 \cdot M_{Rd,c,A}}{L_1}$$
(30)

V preglednici 10 so prikazani geometrijski in materialni podatki obravnavanega neutrjenega armiranobetonskega nosilca za analitični izračun dejanske upogibne nosilnosti.

GEOMETRIJ	BETC	ARMAT	URA S500		
h [mm]	240	f <sub>cm</sub> [MPa]	48	f <sub>yk</sub> [MPa]	500
b [mm]	160	E <sub>c</sub> [MPa]	30270	E <sub>s</sub> [MPa]	200000
d [mm]	213	$\epsilon_{c1}$ [‰]	2.15	ε <sub>sy</sub> [‰]	2.5
a [mm]	27	ε <sub>cu1</sub> [‰]	3.5	ε <sub>su</sub> [‰]	10.0
L <sub>1</sub> [m]	1.45	k	1.42	Φ [mm]	14
				n	3
				$A_{s,i} [mm^2]$	153.9
				$A_s[mm^2]$	461.8

Preglednica 10: Podatki uporabljeni v analitičnem izračunu neutrjenega nosilca

V preglednici 11 je narejen izračun vseh analitičnih koeficientov pri različnih deformacijskih stanjih prečnega prereza nosilca ter upogibna nosilnost betonskega dela prereza, ki mora zaradi ravnotežja biti enaka upogibni nosilnosti armature. Preko enačbe (30) je izračunana tudi sila F, ki jo nosilec prenese pri štiri točkovnem upogibnem preizkusu in bo služila za primerjavo rezultatov analitičnega izračuna z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati.

ε <sub>c</sub>	ε <sub>s</sub>	$k_{d,A}$	k <sub>z,A</sub>	k <sub>s,A</sub>	$M_{Rd,c,A}$	$M_{Rd,s,A}$	F
[‰]	[‰]	[\]	[\]	[\]	[kNm]	[kNm]	[kN]
0.153	0.3	0.015	0.887	1.127	5.24	5.24	7.22
0.204	0.4	0.020	0.887	1.127	6.98	6.98	9.63
0.307	0.6	0.030	0.887	1.128	10.47	10.47	14.44
0.410	0.8	0.040	0.887	1.128	13.95	13.95	19.25
0.462	0.9	0.045	0.886	1.128	15.69	15.69	21.65
0.514	1	0.050	0.886	1.128	17.43	17.43	24.05
0.566	1.1	0.055	0.886	1.129	19.17	19.17	26.44
0.592	1.15	0.058	0.886	1.129	20.04	20.04	27.64
0.619	1.2	0.060	0.886	1.129	20.91	20.91	28.84
0.645	1.25	0.063	0.886	1.129	21.78	21.78	30.04
0.671	1.3	0.065	0.886	1.129	22.65	22.65	31.24
0.724	1.4	0.070	0.885	1.130	24.38	24.38	33.63
1.020	1.95	0.097	0.884	1.131	33.90	33.90	46.77
1.325	2.5	0.124	0.882	1.134	43.37	43.37	59.82
1.433	3	0.126	0.889	1.124	43.74	43.74	60.34
1.534	3.5	0.126	0.895	1.117	44.04	44.04	60.74
1.630	4	0.127	0.900	1.111	44.28	44.28	61.07
1.980	6	0.129	0.913	1.095	44.91	44.91	61.94
2.145	7	0.129	0.917	1.091	45.09	45.09	62.20
2.478	10	0.130	0.924	1.083	45.42	45.42	62.65

Preglednica 11: Analitični izračun upogibne nosilnosti neutrjenega nosilca

V nadaljevanju je prikazana upogibna nosilnost neutrjenega nosilca v odvisnosti od tlačnih deformacij v betonu  $\epsilon_c$  na grafikonu 25 in nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\epsilon_s$  na grafikonu 26.



Grafikon 25: Upogibna nosilnost neutrjenega nosilca MRd,A v odvisnosti od Ec



Grafikon 26: Upogibna nosilnost neutrjenega nosilca  $M_{Rd,A}$  v odvisnosti od  $\epsilon_s$ 

Za primerjavo rezultatov z eksperimentom in numerično analizo so natezne deformacije v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$  in tlačne deformacije v betonu na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  prikazane še v odvisnosti od pripadajoče sile F, ki jo obravnavan neutrjen nosilec pri štiri točkovnem upogibnem testu lahko prenese.



Grafikon 28: Analitična odvisnost F – ɛs neutrjenega nosilca

#### 6.3 Analitični izračun utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo

Z analitičnim izračunom utrjenega nosilca s CFRP lamelo se poskuša čimbolj približati dejanskemu obnašanju obravnavanega utrjenega nosilca preko splošnih izpeljanih enačb iz literature.

# 6.3.1 Izpeljava osnovnih enačb za upogibno nosilnost utrjenega prereza

Izpeljava analitične upogibne nosilnosti utrjenega nosilca s CFRP lamelo temelji na momentnem ravnotežju v prerezu, ki ga prikazuje slika 41.



Slika 41: Ravnotežje v prečnem prerezu utrjenega nosilca za analitični izračun

Pri izpeljavi upogibne nosilnosti utrjenega nosilca se upošteva vzajemno delovanje natezne armature in CFRP lamele s tem, da se povpreči in izračuna nadomestne lastnosti skupnega delovanja, kot je prikazano z izrazi (31), (32) in (33).

Skupna površina armature in CFRP lamele:

$$A_{s+CFRP} = A_s + A_{CFRP} \tag{31}$$

Razdalja od skupnega težišča natezne armature in CFRP lamele do vrha prečnega prereza:

$$d_{s+CFRP} = \frac{d \cdot A_s + d_{CFRP} \cdot A_{CFRP}}{A_{s+CFRP}}$$
(32)

Povprečni elastični modul natezne armature in CFRP lamele:

$$E_{s+CFRP} = \frac{E_s \cdot A_s + E_{CFRP} \cdot A_{CFRP}}{A_{s+CFRP}}$$
(33)

Izpeljava osnovnih enačb za upogibno odpornost pravokotnega prečnega prereza utrjenega nosilca s CFRP lamelo je enaka tisti iz poglavja 6.2.1 z izjemo, da se tokrat v izpeljavo uvede še doprinos CFRP lamele na upogibno odpornost. V vse izraze se vpelje skupno natezno deformacijo  $\varepsilon_{s+CFRP}$ , ki naj bi nastala v skupnem težišču natezne armature in CFRP lamele. Končna izraza brezdimenzionalnih koeficientov  $k_{d,A^*}$  in  $k_{z,A^*}$  za izračun upogibne nosilnosti utrjenega nosilca sta (34) in (35).

$$k_{d,A^*} = \int_{0}^{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl} + \varepsilon_{s+CFRP}}} \frac{\sigma_{c,A}(\zeta)}{f_{cm}} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1} + (\varepsilon_{s+CFRP})} + \zeta\right) d\zeta + \int_{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl} + \varepsilon_{s+CFRP}}}^{\frac{\varepsilon_{l}}{\varepsilon_{l} + \varepsilon_{s+CFRP}}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1} + \varepsilon_{s+CFRP}} + \zeta\right) d\zeta \quad (34)$$

$$k_{z,A^*} = \frac{k_{d}}{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl} + \varepsilon_{cl}}} \frac{\sigma_{c,A}(\zeta)}{f_{cm}} d\zeta + \int_{\frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cl} + \varepsilon_{s+CFRP}}}^{\frac{\varepsilon_{l}}{\varepsilon_{s+CFRP}}} d\zeta \quad (35)$$

Analitična upogibna nosilnost utrjenega betonskega dela prereza se lahko zdaj poračuna po enačbi(36).

$$M_{Rd,c} = f_{cm} \cdot b \cdot d^2 \cdot k_{d,A^*}$$
(36)

Določitev analitičnega koeficienta armature k<sub>s,A\*</sub> pri utrjenem nosilcu:

$$k_{s,A^*} = \frac{1}{k_{z,A^*}}$$
(37)

Za potrebe izračuna deformacij v CFRP lameli in armaturi preko podobnih trikotnikov se vpelje še koeficient višine tlačne cone  $k_x$  in s tem izračuna višino tlačne cone x:

$$k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_{s+CFRP}} \tag{38}$$

$$x = k_x \cdot d_{s+CFRP} \tag{39}$$

 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_c \dots$  v nadaljnjih izračunih deformacija v betonu na vrhu prereza

Na podlagi shematskega prikaza ravnotežja prečnega prereza utrjenega nosilca iz slike 41 in s pomočjo razmerij iz podobnih trikotnikov se izračuna vrednosti nateznih deformacij  $\varepsilon_s$  v armaturi in vrednosti nateznih deformacij v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  z enačbama (40) in (41).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \frac{(d-x)}{x} \tag{40}$$

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_c \, \frac{\left(d_{CFRP} - x\right)}{x} \tag{41}$$

Ročica sile skupne natezne armature in CFRP lamele na težišče tlačene cone:

$$z_{s+CFRP} = k_{z,A^*} \cdot d_{s+CFRP} \tag{42}$$

Oddaljenost težišča CFRP lamele do težišča tlačne cone z<sub>CFRP</sub>:

$$z_{CFRP} = d_{CFRP} - y = d_{CFRP} - d_{s+CFRP} + z_{s+CFRP}$$

$$\tag{43}$$

$$y = d_{s+CFRP} - z_{s+CFRP} \tag{44}$$

Izračun upogibne nosilnosti nateznih elementov M<sub>Rd,CFRP</sub> in M<sub>Rd,s</sub>:

$$M_{Rd,CFRP} = z_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP} \cdot E_{CFRP,k}$$
(45)

$$M_{Rd,s} = \begin{cases} \frac{A_s}{k_{s,A}} \cdot d \cdot E_s \cdot \varepsilon_s & ; & 0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{sy} \\ \frac{A_s}{k_{s,A}} \cdot d \cdot f_{yk} & ; & \varepsilon_{sy} \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{su} \end{cases}$$
(46)

Izračun skupne analitične upogibne nosilnosti nateznih elementov  $M_{Rd,s+CFRP}$  utrjenega nosilca se določi z enačbo (47).

$$M_{Rd,s+CFRP,A} = M_{Rd,s} + M_{Rd,CFRP}$$

$$\tag{47}$$

Izračun analitične upogibne nosilnosti tlačenega dela betona  $M_{Rd,c}$  pri utrjenem nosilcu sledi s spodnjo enačbo (48).

$$M_{Rd,c,A} = f_{cm} \cdot b \cdot d_{s+CFRP}^2 \cdot k_{d,A^*}$$
(48)

# 6.3.2 Izračun upogibne nosilnosti obravnavanega utrjenega nosilca s CFRP lamelo

V programu Excel se preko enačb na podlagi izpeljanih izrazov v poglavju 6.3.1 ter z upoštevanjem ravnotežnega pogoja (17) določi upogibno nosilnost prereza preko dodatka »Reševalnik«. Pri vsaki željeni momentni obtežbi, ki ji mora biti prerez s svojo upogibno nosilnostjo enak, dodatek »Reševalnik« izvrednoti sistem enačb, tako da vsakemu ravnotežnemu stanju poišče pripadajoče tlačne deformacije v betonu na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  in natezne deformacije skupne armature  $\varepsilon_{s+CFRP}$ .

Iz vsake upogibne momentne nosilnosti utrjenega prereza je preko enačbe (49) analitično določena še sila F, ki jo prostoležeči nosilec z dvojno točkovno obtežbo prenese. Tako je mogoče rezultate analitičnega računa primerjati z rezultati štiri točkovnega upogibnega eksperimenta in numerične analize.

$$F = \frac{2 \cdot M_{Rd,s+CFRP,A}}{L_1} = \frac{2 \cdot M_{Rd,c,A}}{L_1}$$
(49)

V preglednici 12 so prikazani geometrijski in materialni podatki obravnavanega utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo za analitični izračun njegove dejanske upogibne nosilnosti.

GEOMETRIJA NOSILCA			BETON			ARMATURA S500			CFRP lamela		
h [mm]	240		f <sub>cm</sub> [MPa]	48		f <sub>yk</sub> [MPa]	500		f <sub>CFRP,k</sub> [MPa]	3100	
b [mm]	160		E <sub>c</sub> [MPa]	30270		E <sub>s</sub> [MPa]	200000		E <sub>CFRP,k</sub> [MPa]	170000	
d [mm]	213		$\epsilon_{c1}$ [‰]	2.15		ε <sub>sy</sub> [‰]	2.50		ε <sub>CFRP,k</sub> [‰]	18.24	
d <sub>CFRP</sub> [mm]	240.7		ε <sub>cu1</sub> [‰]	3.50		ε <sub>su</sub> [‰]	10.00		b <sub>CFRP</sub> [mm]	100	
a [mm]	27		k	1.42		Φ [mm]	14		h <sub>CFRP</sub> [mm]	1.4	
L <sub>1</sub> [m]	1.45					n	3		n <sub>CFRP</sub>	1	
						$A_{s,i} \left[mm^2\right]$	153.9		A <sub>CFRP</sub> [mm <sup>2</sup> ]	140	
						$A_s[mm^2]$	461.8				
						SKUPNE KARAKTERISTIKE s + CFRP					
						A <sub>s+CFRP</sub>	[mm <sup>2</sup> ]		601.81		
						d <sub>s+CFRP</sub>	[mm]		219.44	ļ	
						E <sub>s+CFRP</sub>	[MPa]		19302	1	

Preglednica 12: Podatki uporabljeni v analitičnem izračunu utrjenega nosilca

V preglednici 13 je prikazan rešen sistem enačb pri različnih deformacijskih ravnotežnih stanjih s pripadajočimi upogibnimi nosilnostmi utrjenega prereza. Preko enačbe (49) je izračunana tudi sila F, ki jo utrjen nosilec prenese pri štiri točkovnem upogibnem preizkusu in bo služila za primerjavo analitičnega izračuna z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati.

εc	€s+CFRP	$k_{d,A^{\ast}}$	$k_{z,A}\ast$	k <sub>s,A*</sub>	Z <sub>S+CFRP</sub>	εs	ECFRP	у	ZCFRP	M <sub>Rd,s</sub>	$M_{Rd,CFRP}$	M <sub>Rd,s+CFRP,A</sub>	$M_{Rd,c,A} \\$	F
[‰]	[‰]	[\]	[\]	[\]	[mm]	[‰]	[‰]	[mm]	[mm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]
0.13	0.22	0.014	0.878	1.138	192.8	0.21	0.26	26.7	214.0	3.69	1.31	5	5	6.9
0.26	0.45	0.027	0.878	1.139	192.7	0.43	0.51	26.8	213.9	7.38	2.62	10	10	13.8
0.39	0.67	0.041	0.878	1.140	192.6	0.64	0.77	26.9	213.8	11.07	3.93	15	15	20.7
0.52	0.90	0.054	0.877	1.140	192.4	0.86	1.03	27.0	213.7	14.76	5.24	20	20	27.6
0.79	1.35	0.081	0.876	1.142	192.2	1.28	1.55	27.3	213.4	22.14	7.86	30	30	41.4
0.92	1.57	0.095	0.875	1.143	192.0	1.50	1.81	27.4	213.3	25.83	9.17	35	35	48.3
1.06	1.80	0.108	0.874	1.144	191.8	1.72	2.07	27.6	213.1	29.51	10.49	40	40	55.2
1.12	1.89	0.114	0.874	1.144	191.8	1.80	2.17	27.7	213.0	30.98	11.02	42	42	57.9
1.18	1.98	0.119	0.874	1.145	191.7	1.89	2.28	27.8	212.9	32.46	11.54	44	44	60.7
1.23	2.07	0.124	0.873	1.145	191.6	1.98	2.38	27.8	212.9	33.93	12.07	46	46	63.4
1.29	2.16	0.130	0.873	1.146	191.5	2.06	2.49	27.9	212.8	35.41	12.59	48	48	66.2
1.35	2.25	0.135	0.872	1.146	191.4	2.15	2.59	28.0	212.7	36.88	13.12	50	50	69.0
1.41	2.35	0.141	0.872	1.147	191.3	2.24	2.70	28.1	212.6	38.35	13.65	52	52	71.7
1.47	2.44	0.146	0.871	1.148	191.2	2.32	2.80	28.2	212.5	39.82	14.18	54	54	74.5
1.53	2.53	0.151	0.871	1.148	191.1	2.41	2.91	28.4	212.3	41.29	14.71	56	56	77.2
1.59	2.62	0.157	0.870	1.149	190.9	2.50	3.02	28.5	212.2	42.77	15.23	58	58	80.0
1.70	2.93	0.162	0.873	1.145	191.6	2.80	3.37	27.9	212.8	42.94	17.06	60	60	82.8
1.88	3.42	0.170	0.876	1.141	192.3	3.26	3.92	27.2	213.5	43.10	19.90	63	63	86.9
2.01	3.75	0.176	0.878	1.139	192.6	3.58	4.29	26.9	213.8	43.16	21.84	65	65	89.7
2.15	4.11	0.181	0.878	1.138	192.8	3.92	4.69	26.7	214.0	43.20	23.90	67	67	92.6

Preglednica 13: Analitični izračun upogibne nosilnosti utrjenega nosilca

Za določitev upogibne nosilnosti utrjenega prereza pri različnih deformacijskih ravnotežnih stanjih je v sistemu enačb zajet tudi izračun višine tlačne cone pri vsaki vrednosti upogibne nosilnosti. Ti rezultati so predstavljeni v preglednici 14.

M <sub>Rd,s+CFRP,A</sub>	M <sub>Rd,c,A</sub>	F	kx	х
[kNm]	[kNm]	[kN]	[\]	[mm]
5	5	6.9	0.364	79.93
10	10	13.8	0.365	80.10
15	15	20.7	0.366	80.28
20	20	27.6	0.367	80.48
30	30	41.4	0.369	80.93
35	35	48.3	0.370	81.19
40	40	55.2	0.371	81.47
42	42	57.9	0.372	81.60
44	44	60.7	0.372	81.72
46	46	63.4	0.373	81.86
48	48	66.2	0.374	82.00
50	50	69.0	0.374	82.15
52	52	71.7	0.375	82.30
54	54	74.5	0.376	82.47
56	56	77.2	0.377	82.64
58	58	80.0	0.377	82.82
60	60	82.8	0.367	80.61
63	63	86.9	0.355	77.90
65	65	89.7	0.349	76.48
67	67	92.6	0.343	75.31

Preglednica 14: Izračun višine tlačne cone x pri utrjenem nosilcu

Spodaj je prikazana upogibna nosilnost utrjenega nosilca s CFRP lamelo na sredini razpona v odvisnosti od tlačnih deformacij v betonu na vrhu prečnega prereza  $\varepsilon_c$  (Grafikon 29), nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$  (Grafikon 30) in nateznih deformacij v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  (Grafikon 31).



Grafikon 29: Upogibna nosilnost utrjenega nosilca  $M_{Rd,A}$  v odvisnosti od  $\epsilon_c$ 



Grafikon 30: Upogibna nosilnost utrjenega nosilca MRd,A v odvisnosti od Es



Grafikon 31: Upogibna nosilnost utrjenega nosilca MRd,A v odvisnosti od ECFRP

Za kasnejšo primerjavo rezultatov z eksperimentom in numerično analizo utrjenega nosilca so tlačne deformacije v betonu  $\varepsilon_c$ , natezne deformacije v armaturi  $\varepsilon_s$  in lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  prikazane še v odvisnosti od pripadajoče sile F, ki jo nosilec lahko prenese.



Grafikon 32: Analitična odvisnost F - ɛc utrjenega nosilca







Grafikon 34: Analitična odvisnost F –  $\varepsilon_{CFRP}$  utrjenega nosilca

#### 7 PRIMERJAVA REZULTATOV VSEH ANALIZ

V tem poglavju je predstavljena izvedena medsebojna primerjava rezultatov štiri točkovnega upogibnega eksperimenta, numerične analize ter analitičnega izračuna tako utrjenega kot tudi neutrjenega armiranobetonskega nosilca, s katero se ugotavlja uspešnost numeričnega in analitičnega obravnavanja obnašanja realnega nosilca pod upogibno obtežbo. Opravljena je tudi medsebojna primerjava stanja, pred in po utrditvi nosilca s CFRP lamelo, iz katere se ugotovi kakšen vpliv ima utrditev na obnašanje armiranobetonskega nosilca in za koliko se povečata njegova upogibna nosilnost ter togost.

#### 7.1 Primerjava rezultatov eksperimenta z numerično in analitično analizo neutrjenega nosilca

Primerjava rezultatov neutrjenega armiranobetonskega nosilca iz eksperimenta, rezultatov izračunanih v programu Abaqus ter rezultatov analitičnega izračuna je predstavljena z diagrami odvisnosti obremenitvene sile F od tlačnih deformacij v betonu na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  in nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$  na sredini razpona (Grafikon 35 in Grafikon 36). Na grafikonu 37 je prikazan še diagram primerjave eksperimentalne in numerične odvisnosti sile F od vertikalnega pomika U<sub>vert</sub> ravno tako na sredini razpona nosilca.

Iz primerjave odvisnosti F –  $\varepsilon_c$  in F –  $\varepsilon_s$  je razvidno, da se v linearno elastičnem območju obnašanja nosilca diagrami precej dobro ujamejo. Krivulji numerične analize in eksperimenta sovpadata že od samega začetka, saj je v numeričnem modelu upoštevan tudi vpliv delovanja natezne trdnosti betona na upogibno nosilnost. Pri analitičnem izračunu natezna trdnost betona ni upoštevana, zato diagram poteka že od samega začetka linearno. Do zloma tako analitične kot numerične krivulje pride pri vrednosti obremenilne sile F = 60 kN in sicer pri doseženi natezni deformaciji v armaturi  $\varepsilon_s$  = 2,5 ‰, ko se ta prične plastificirati. Naklon obeh diagramov po plastifikaciji spodnje armature pade, kar je tudi razvidno iz grafikonov 35 in 36.



Grafikon 35: Primerjava odvisnosti F - c neutrjenega nosilca iz vseh analiz



Grafikon 36: Primerjava odvisnosti F – ɛs neutrjenega nosilca iz vseh analiz

Iz rezultatov merjenega vertikalnega pomika  $U_{vert}$  na sredini razpona nosilca pri eksperimentu ni razvidnega vpliva natezne trdnosti betona. Posledično sta krivulji iz numerične analize v Abaqusu in eksperimenta nekoliko razmaknjeni, imata pa v linearnem območju upogibnega obnašanja enak naklon, kar potrjuje pravilno definirane materialne karakteristike betona in armature v numeričnem modelu (Grafikon 37).



Grafikon 37: Primerjava odvisnosti F – Uvert neutrjenega nosilca iz numerične analize in eksperimenta

# 7.2 Primerjava rezultatov eksperimenta z numerično in analitično analizo utrjenega nosilca

Tako kot v poglavju 7.1, je tu prikazana primerjava rezultatov utrjenega nosilca iz eksperimenta, rezultatov izračunanih v programu Abaqus ter rezultatov analitičnega izračuna z diagrami odvisnosti obremenitvene sile F od tlačnih deformacij v betonu  $\varepsilon_c$ , nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$  in nateznih deformacij v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  (Grafikon 38, Grafikon 39 in Grafikon 40). Primerjani sta še krivulji odvisnosti obremenjevalne sile F v odvisnosti od vertikalnega pomika U<sub>vert</sub> iz eksperimenta in numerične analize utrjenega nosilca na grafikonu 41.

Pri krivuljah odvisnosti sile F od tlačnih napetosti v betonu  $\varepsilon_c$  iz različnih analiz, predstavljenih z grafikonom 38, pride do manjšega odstopanja v linearno elastičnem območju obnašanja nosilca. Krivulja iz numerične analize je nekoliko nižja od tistih iz eksperimenta in analitičnega izračuna. Po prelomu krivulj, ko se armatura plastificira in prične teči, se vse tri skoraj popolnoma ujamejo.



Iz primerjanih odvisnosti obremenitvene sile F od nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$ , prikazanih na grafikonu 39, je v linearno elastičnem območju obnašanja nosilca razvidno popolno ujemanje vseh treh krivulj. Pri eksperimentu je prišlo pri dosegu deformacij na meji elastičnosti  $\varepsilon_s = 2,5$  ‰ do pretrga oziroma poškodbe merilnega lističa na armaturi, zato nadaljnjega poteka diagrama iz eksperimenta ni bilo mogoče pridobiti. Na eksperimentalni krivulji se posledično opazijo nepravilnosti po preseženi meji elastičnosti armature. Analitična in numerična krivulja se ujemata tudi po zlomu krivulj, ko upogibna nosilnost pade.



Grafikon 39: Primerjava odvisnosti F –  $\varepsilon_s$  utrjenega nosilca iz vseh analiz

Krivulje odvisnosti sile F od nateznih deformacij v lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  vseh analiz na grafikonu 40 se tako v linearnem območju kot tudi po plastifikaciji armature ujemajo. To nakazuje na pravilno določene geometrijske in materialne parametre CFRP lamele v numeričnem in analitičnem izračunu.



Grafikon 40: Primerjava odvisnosti F –  $\varepsilon_{CFRP}$  utrjenega nosilca iz vseh analiz

Numerična krivulja na grafikonih 38, 39 in 40 ima v začetnem delu do dosežene vrednosti sile F = 5 kN strmejši naklon in sicer zaradi upoštevanja delovanja natezne trdnosti betona. Ko je tekom numeričnega izračuna dosežena vrednost nateznih deformacij v betonu iz enačbe (11) se numerični krivulji naklon zmanjša in se ta popolnoma ujame z rezultati iz eksperimenta in analitičnega izračuna. Pri analitičnem izračunu delovanje natezne trdnosti betona ni upoštevano, pri eksperimentu pa je bila natezna trdnost betona že presežena v preizkusu neutrjenega nosilca, zato praktičnega delovanja le-te po utrditvi s CFRP lamelo ni.

Pri eksperimentu je začeten del krivulje odvisnosti F –  $U_{vert}$  utrjenega nosilca bolj položen, saj delovanje na stiku med CFRP lamelo in betonom ni popolno, kar povzroči manjši zamik oziroma zdrs, preden se aktivira natezno delovanje lamele, medtem ko je pri numerični analizi predpostavljen popoln kontakt in lamela deluje že od samega pričetka obremenjevanja. Ko preide utrjen nosilec v območje plastičnega obnašanja se obe krivulji pokrijeta ena z drugo. Primerjava odvisnosti obremenjevalne sile F v odvisnosti od vertikalnega pomika na sredini razpona utrjenega nosilca U<sub>vert</sub> je predstavljena spodaj na grafikonu 41.



Grafikon 41: Primerjava odvisnosti F – Uvert utrjenega nosilca iz numerične analize in eksperimenta
#### 7.3 Primerjava rezultatov utrjenega in neutrjenega nosilca v različnih analizah

Primerjava rezultatov neutrjenega in utrjenega nosilca s CFRP lamelo je izvedena z namenom ugotovitve, za koliko se izboljša stanje z utrditvijo obravnavanega konkretnega primera. Na podlagi togosti in same upogibne nosilnosti se opazuje razlika med začetnim stanjem in stanjem po utrditvi s CFRP lamelo. Togost je izračunana po enačbi (50).

$$K^{neutrjen/utrjen} = \frac{\Delta F_{vert}^{neutrjen/utrjen}}{\Delta U_{vert}^{neutrjen/utrjen}}$$
(50)

#### 7.3.1 Primerjava eksperimentalnih rezultatov utrjenega in neutrjenega nosilca

V nadaljevanju so na grafikonih 42, 43 in 44 prikazani rezultati značilnih primerljivih odvisnosti neutrjenega in utrjenega nosilca iz eksperimenta.

Na grafikonu 42 se opazi spremenjen naklon v elastičnem območju pri eksperimentalni krivulji odvisnosti obremenitvene sile F od tlačnih deformacij na vrhu prečnega prereza na sredini razpona  $\varepsilon_c$  utrjenega nosilca in sicer je ta bolj strm, kakor pri neutrjenem. To nakazuje na izboljšano upogibno nosilnost in nekoliko večjo togost nosilca po utrditvi.



Grafikon 42: Primerjava eksperimentalne odvisnosti F - ɛc utrjenega in neutrjenega nosilca

V začetnem delu na grafikonu 43 se krivulji utrjenega in neutrjenega nosilca pokrivata, saj je imelo na obnašanje neutrjenega nosilca vpliv delovanje natezne nosilnosti betona, ki ugodno vpliva na upogibno togost. Naklon krivulje neutrjenega nosilca se po izkoriščeni natezni trdnosti betona zmanjša.



Grafikon 43: Primerjava eksperimentalne odvisnosti F – ɛs utrjenega in neutrjenega nosilca

Iz eksperimentalne odvisnosti sile F in vertikalnega pomika na sredini razpona U<sub>vert</sub> na grafikonu 44 je razvidno, da se neutrjen nosilec v začetnem območju obnaša izrazito elastično, medtem ko ima krivulja utrjenega nosilca na začetku položnejši naklon. Naklon se poveča pri vrednosti okoli 10 kN in začne potekati linearno. S tem se pokaže vpliv natezno obremenjene CFRP lamele, ki poveča upogibno togost celotnega nosilca.



Grafikon 44: Primerjava eksperimentalne odvisnosti F - Uvert utrjenega in neutrjenega nosilca

Upogibna togost je izračunana po enačbi (50). Izračuni in primerjava upogibnih togosti pred in po utrditvi so zbrani spodaj v preglednici 15, ki kaže na to, da se togost nosilca s CFRP lamelo poveča za 33 %.

Eksperiment	$F_2$	Uvert,2	$F_1$	Uvert,1	$\Delta F$	$\Delta U_{vert}$	K
	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/m]
Neutrjen	43.0	25	25.0	15	18.0	10	1800
Utrjen	62.0	30	50.0	25	12.0	5	2400
					K <sub>utrien</sub> /	K <sub>neutrien</sub> =	1.33

Preglednica 15: Primerjava togosti K iz eksperimenta utrjenega in neutrjenega nosilca

# 7.3.2 Primerjava numeričnih rezultatov utrjenega in neutrjenega nosilca

Grafikoni 45, 46 in 47 prikazujejo primerjavo rezultatov značilnih primerljivih odvisnosti na sredini razpona (sila F v odvisnosti od vertikalnega pomika  $U_{vert}$ , tlačnih deformacij na vrhu betonskega prereza  $e_c$  in nateznih deformacij v spodnji armaturi  $e_s$ ) neutrjenega in utrjenega nosilca iz numerične analize s programom Abaqus.

Iz vseh primerjav krivulj na grafikonih 45, 46 in 47 je razvidno izboljšano stanje utrjenega nosilca, glede na prvotno, ko ta ni bil utrjen. Sama maksimalna upogibna nosilnost v obravnavanem primeru se je iz približno 63 kN pri neutrjenem nosilcu dvignila na vrednost skoraj 100 kN pri utrjenem nosilcu.

Numerični rezultati primerjave togosti iz preglednice 16 povedo, da je končno stanje z dodano CFRP lamelo za 28 % bolj togo od neutrjenega stanja.



Grafikon 45: Primerjava numerične odvisnosti F - ɛc utrjenega in neutrjenega nosilca



Grafikon 46: Primerjava eksperimentalne odvisnosti F – ɛs utrjenega in neutrjenega nosilca



Grafikon 47: Primerjava eksperimentalne odvisnosti F - Uvert utrjenega in neutrjenega nosilca

	Abaqus	$F_2$	Uvert,2	$F_1$	Uvert,1	ΔF	$\Delta U_{vert}$	K
		[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/m]
	Neutrjen	55.0	29	40.0	19.8	15.0	9.2	1630
	Utrjen	57.7	25	37.0	15.1	20.7	9.9	2091
						Kutrjen/	Kneutrjen =	1.28

Preglednica 16: Primerjava togosti K iz numerične analize utrjenega in neutrjenega nosilca

# 7.3.3 Primerjava analitičnih rezultatov utrjenega in neutrjenega nosilca

Na grafikonu 48 je prikazana primerjava analitičnih rezultatov, neutrjenega in utrjenega nosilca, odvisnosti obremenitvene sile F od tlačnih deformacij na vrhu betonskega prereza  $\varepsilon_c$ , na grafikonu 49 pa odvisnost sile F od nateznih deformacij v spodnji armaturi  $\varepsilon_s$ .

Pri analitičnem izračunu se ravno tako kot iz rezultatov eksperimenta in numerične analize opazi izboljšano stanje upogibnega obnašanja nosilca po utrditvi s CFRP lamelo. V linearnem območju obnašanja utrjenega nosilca je naklon krivulj očitnejše bolj strm kakor pri neutrjenem nosilcu. Tudi sama meja elastičnega obnašanja se iz vrednosti sile F = 60 kN pri neutrjenem dvigne na vrednost sile F = 80 kN pri utrjenem nosilcu, kar potrjuje zvišanje upogibne nosilnosti.



Grafikon 48: Primerjava analitične odvisnosti F –  $\varepsilon_c$  utrjenega in neutrjenega nosilca



Grafikon 49: Primerjava analitične odvisnosti F –  $\varepsilon_s$  utrjenega in neutrjenega nosilca

#### 8 DIMENZIONIRANJE UPOGIBNE UTRDITVE S KOMPOZITNO LAMELO

Na podlagi primerjav rezultatov izvedenih v poglavju 7 lahko sklenemo, da je z analitičnimi izračuni možno napovedati obnašanje utrjenega armiranobetonskega nosilca utrjenega s CFRP lamelo z zadovoljivo natančnostjo. V ta namen so v tem poglavju izpeljane osnovne enačbe za dimenzioniranje upogibno obremenjenega utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelami v skladu s standardom Eurocode 1992-1-1 [11]. Izpeljane so vse potrebne enačbe in prikazane kontrole porušitev iz priporočil [14], na podlagi katerih deluje izdelan Excelov program za čim bolj optimalno dimenzioniranje CFRP utrditve, ki je predstavljen v zadnji točki tega poglavja na obravnavanem armiranobetonskem nosilcu. Za obravnavani primer je izvedena tudi primerjava dejanskega stanja utrjenega nosilca, določenega analitično s karakterističnimi vrednostmi, s projektnim stanjem, določenim z računskimi vrednostmi po pravilih za dimenzioniranje.

Tako kot pri analitičnem izračunu se tudi pri dimenzioniranju izhaja iz ravnotežja v prerezu in sicer mora biti računska upogibna odpornost betona v tlaku enaka računski upogibni odpornosti nateznih elementov, katerih vsaka posebej pogojuje upogibno nosilnost celotnega prereza nosilca.

$$M_{Rd,s} = M_{Rd,c} = M_{Rd} \tag{51}$$

$$M_{Rd,s+CFRP} = M_{Rd,c} = M_{Rd}$$
<sup>(52)</sup>

#### 8.1 Izpeljava uporabljenih enačb v programu za dimenzioniranje utrjenega nosilca

Za potrebo izdelave enostavnega programa za izračun upogibne nosilnosti armiranobetonskega nosilca in določitve dimenzij in kvalitete potrebne CFRP lamele so v tem poglavju opravljene vse izpeljave končnih izrazov za dimenzioniranje.

#### 8.1.1 Enačbe za dimenzioniranje neutrjenega nosilca

V literaturi [21] so izpeljani izrazi za izračun upogibne nosilnosti neutrjenega armiranobetonskega nosilca v skladu s standardom Eurocode 1992-1-1 [11]. V nadaljevanju so prikazane izpeljane enačbe za dimenzioniranje računske upogibne odpornosti prereza za ravnotežno stanje, ki je prikazano na sliki 42. Te enačbe so potrebne za izračun preddeformacije na spodnjem robu, kjer bo pritrjena CFRP lamela. To je deformacija, ki je prisotna na spodnjem robu neutrjenega armiranobetonskega nosilca in je običajno posledica lastne teže in stalne obtežbe.



Slika 42: Ravnotežje v prečnem prerezu neutrjenega nosilca za dimenzioniranje

Višino tlačne cone x se določi z izrazom (53) preko brezdimenzionalnega koeficienta višine tlačne cone  $k_x$ , določenega z enačbo (54).

$$x = k_x \cdot d \tag{53}$$

$$k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s} \tag{54}$$

Kot pri analitičnem izračunu se vpelje brezdimenzionalna koordinata  $\zeta$ , ki ima izhodišče na mestu nevtralne osi. S pomočjo te se določi deformacijo betona kjerkoli po višini prereza:

$$\mathcal{E}_{c}\left(\zeta\right) = \frac{\mathcal{E}_{1}\cdot\zeta\cdot d}{x} = \frac{\mathcal{E}_{1}\cdot\zeta}{k_{x}} \qquad 0 \le \zeta \le k_{x} \tag{55}$$

Za dimenzioniranje se upošteva obliko razporeda tlačnih napetosti po betonu z delovnim diagramom iz poglavja 3.2.1.1, določenega z izrazoma (8) in (9), katero se normira:

$$\overline{\sigma}_{c}(\zeta) = \frac{\sigma_{c}(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{1} \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_{x}}\right)^{n}\right] \quad \text{za} \quad 0 \le \zeta \le k_{x2}$$
(56)

$$\overline{\sigma}_{c}\left(\zeta\right) = \frac{\sigma_{c}\left(\zeta\right)}{f_{cd}} = 1 \qquad \text{za} \quad k_{x2} \le \zeta \le k_{x} \tag{57}$$

 $k_{x2}$  ... vrednost koeficienta  $k_x$  pri meji tlačnih deformacij  $\varepsilon_{c2}$ 

Z upoštevanjem normiranih napetosti iz izrazov (56) in (57) in integracijskih območij se določi brezdimenzionalni koeficient računske upogibne nosilnosti betonskega dela prereza  $k_d$ :

$$k_{d} = \int_{0}^{k_{x2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_{1} \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_{x}} \right)^{n} \right] \cdot \left( 1 - k_{x} + \zeta \right) d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_{x}} \left( 1 - k_{x} + \zeta \right) \cdot d\zeta$$
(58)

Izpelje se še koeficient ročice rezultante napetosti betona na težišče armature k<sub>z</sub>:

$$k_{z} = \frac{k_{d}}{\int_{0}^{k_{x2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_{1} \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_{x}} \right)^{n} \right] \cdot d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_{x}} d\zeta}$$
(59)

Računska upogibna nosilnost betonskega dela prereza M<sub>Rd,c</sub> se izračuna po spodnji enačbi:

$$M_{Rd,c} = f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \cdot k_d \tag{60}$$

Koeficient armature neutrjenega nosilca ks:

$$k_s = \frac{1}{k_z} \tag{61}$$

Določitev računske upogibne nosilnosti armature neutrjenega nosilca M<sub>Rd,s</sub>:

$$M_{Rd,s} = \begin{cases} \frac{A_s}{k_s} \cdot d \cdot E_s \cdot \varepsilon_s & ; \quad 0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{sy} \\ \frac{A_s}{k_s} \cdot d \cdot f_{yd} & ; \quad \varepsilon_{sy} \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{su} \end{cases}$$
(62)

#### 8.1.2 Enačbe za dimenzioniranje utrjenega nosilca s CFRP lamelo

Za dimenzioniranje upogibne nosilnosti utrjenega prereza armiranobetonskega nosilca je ravno tako, kot pri dimenzioniranju neutrjenega uporabljen normiran delovni diagram betona v tlaku opisan z izrazoma (56) in (57).

Na podlagi slike 43 so izpeljane osnovne enačbe za dimenzioniranje pravokotnega utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo.



Slika 43: Ravnotežje v prečnem prerezu utrjenega nosilca za dimenzioniranje

Postopek izpeljave enačb za dimenzioniranje upogibne nosilnosti utrjenega nosilca temelji na izpeljavi za dimenzioniranje neutrjenega nosilca, le da se v tem primeru tako kot v analitičnem računu opisanem v poglavju 6.3.1 upošteva skupno delovanje natezne armature in lamele z izrazi (31) in (32) in se vpelje skupno namišljeno deformacijo  $\varepsilon_{s+CFRP}$ , ki naj bi nastala na skupnem težišču natezne armature in CFRP lamele.

# $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_c \dots$ v nadaljnjih izrazih deformacija v betonu na vrhu prereza

Koeficient višine tlačne cone pri utrjenem nosilcu  $k_{x,u}$  je določen z izrazom (63).

$$k_{x,u} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_{s+CFRP}}$$
(63)

Višina tlačne cone pri utrjenem nosilcu  $x_u$  se izračuna z enačbo (64).

$$x_u = k_{x,u} \cdot d_{s+CFRP} \tag{64}$$

Brezdimenzionalni koeficient upogibne nosilnost betonskega dela prereza utrjenega nosilca  $k_{d,u}$  določa izraz (65).

$$k_{d,u} = \int_{0}^{k_{x2,u}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_{x,u}} \right)^n \right] \cdot \left( 1 - k_{x,u} + \zeta \right) d\zeta + \int_{k_{x2,u}}^{k_{xu}} \left( 1 - k_{x,u} + \zeta \right) \cdot d\zeta$$
(65)

S spodnjim izrazom (66) je izpeljan Koeficient ročice rezultante napetosti betona na težišče armature  $k_{z,u}$  pri utrjenem nosilcu.

$$k_{z,u} = \frac{k_{d,u}}{\int_{0}^{k_{x2,u}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_{x,u}}\right)^n\right] \cdot d\zeta + \int_{k_{x2,u}}^{k_{xu}} d\zeta}$$
(66)

Upogibna nosilnost betonskega dela prereza utrjenega nosilca M<sub>Rd,c,u</sub> se izračuna po enačbi (67).

$$M_{Rd,c,u} = f_{cd} \cdot b \cdot d_{s+CFRP}^2 \cdot k_{d,u}$$
(67)

Koeficient armature utrjenega nosilca k<sub>s,u</sub> določa izraz (68).

$$k_{s,u} = \frac{1}{k_{z,u}} \tag{68}$$

Na podlagi shematskega prikaza na sliki 43 se s pomočjo razmerij stranic podobnih trikotnikov izračuna vrednosti nateznih deformacij v armaturi  $\varepsilon_s$  in vrednosti deformacij v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$ :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \, \frac{\left(d - x_u\right)}{x_u} \tag{69}$$

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_c \, \frac{\left(d_{CFRP} - x_u\right)}{x_u} \tag{70}$$

Ročica sile skupne armature na težišče tlačene cone pri utrjenem nosilcu je določena po enačbi (71).

$$z_{s+CFRP} = k_{z,u} \cdot d_{s+CFRP} \tag{71}$$

Oddaljenost težišča CFRP lamele od težišča tlačne cone:

$$z_{s+CFRP} = d_{CFRP} - y = d_{CFRP} - d_{s+CFRP} + z_{s+CFRP}$$
(72)

$$y = d_{s+CFRP} - Z_{s+CFRP} \tag{73}$$

Določitev računske upogibne nosilnosti natezne jeklene armature M<sub>Rd,s</sub>:

$$M_{Rd,s} = \begin{cases} \frac{A_s}{k_{s,u}} \cdot d \cdot E_s \cdot \varepsilon_s & ; & 0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{sy} \\ \frac{A_s}{k_{s,u}} \cdot d \cdot f_{yk} & ; & \varepsilon_{sy} \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{su} \end{cases}$$
(74)

Določitev upogibne nosilnosti CFRP lamele M<sub>Rd,CFRP</sub> sledi z izrazom (75).

$$M_{Rd,CFRP} = z_{CFRP} \cdot A_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP} \cdot E_{CFRP,d}$$
(75)

#### 8.2 Preddeformacija CFRP lamele zaradi lastne teže in stalne obtežbe

Preddeformacija je deformacija na spodnjem robu neutrjenega armiranobetonskega nosilca, kamor bo pritrjena lamela. Preddeformacija je prisotna tik pred utrditvijo nosilca s CFRP lamelo in je običajno posledica lastne teže in stalne obtežbe, ki deluje na nosilec. Preddeformacijo se izračuna na podlagi postopka iz poglavja 8.1.1 in sicer na podlagi slike 42 s pomočjo razmerij podobnih trikotnikov tako, da se upošteva stalni moment  $M_{Ed,g} = M_0$ , ki se ga enači z računsko upogibno nosilnostjo neutrjenega prereza  $M_{Rd}$ .

Izračun preddeformacije  $\varepsilon_0$  s pomočjo podobnih trikotnikov podaja enačba (76).

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c,0} \, \frac{h - x_0}{x_0} \tag{76}$$

 $\mathcal{E}_{c,0}$ ... tlačna deformacija v betonu na vrhu prečnega prereza

 $x_0 \dots$  višina tlačne cone pri obtežbi  $M_0$ 

Pri postopku dimenzioniranja utrditve določenega v poglavju 8.1.2 se preddeformacijo  $\varepsilon_0$  upošteva tako, da se deformaciji CFRP lamele v enačbi (70) odšteje deformacijo, ki jo povzročata lastna teža in stalna obtežba, s čimer dobimo sledeči izraz (77).

$$\varepsilon_{CFRP} = \varepsilon_c \frac{\left(d_{CFRP} - x_u\right)}{x_u} - \varepsilon_0 \tag{77}$$

#### 8.3 Računske omejitve in kontrole

Za zagotovitev varnosti konstrukcije v mejnem stanju nosilnosti je potrebno zadostiti tudi omejitvam, ki jih predpisuje Eurocode 1992-1-1 [11] za armiranobetonske konstrukcije in navodilom, ki so podani v tehničnem priporočilu za utrjevanje betonskih konstrukcij s kompozitnimi materiali [14].

#### 8.3.1 Kontrola deformacij po prerezu

Kontrola tlačnih deformacij v betonu  $\varepsilon_c$  na vrhu prereza:

$$\mathcal{E}_c \le \mathcal{E}_{cu2} \tag{78}$$

 $\mathcal{E}_{cu2}$  ... 3,5 ‰ za betone običajne trdnosti

Kontrola nateznih deformacij v natezni armaturi ɛs:

$$\mathcal{E}_s \le \mathcal{E}_{su} \tag{79}$$

 $\mathcal{E}_{su}$  ... 10 ‰ za betone običajne trdnosti

Kontrola nateznih deformacij v CFRP lameli ECFRP:

$$\mathcal{E}_{CFRP} \le \mathcal{E}_{CFRP,d} \tag{80}$$

#### 8.3.2 Kontrola odcepitve konca CFRP lamele

Porušitev po stiku CFRP lamele z betonom pogojuje porušna sila T<sub>K,max</sub> iz literature [14]:

$$T_{K} = \frac{E_{CFRP} \cdot \varepsilon_{CFRP}}{L_{t,\max} \cdot b_{CFRP}} \leq T_{K,\max} = 0, 5 \cdot K_{b} \cdot b_{CFRP} \cdot \sqrt{E_{CFRP,d} \cdot h_{CFRP} \cdot f_{ctm}}$$
(81)

K<sub>b</sub> je geometrijski faktor določen s spodnjo enačbo:

$$K_{b} = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_{CFRP}}{b}}{1 + \frac{b_{CFRP}}{400}}} \ge 1$$
(82)

Maksimalna prenosna sila  $T_{K,max}$  je odvisna od maksimalne dolžine sidranja  $l_{t,max}$ :

$$L_{t,\max} = \max \begin{cases} 0, 7 \cdot \sqrt{\frac{E_{CFRP,d} \cdot h_{CFRP}}{f_{ctm}}} & [mm] \\ 500 \end{cases}$$
(83)

Kjer ni mogoče zagotoviti sidrne dolžine L<sub>t,max</sub>, se porušno silo T<sub>K,max</sub> reducira:

$$T_{k,\max,red} = T_{k,\max} \cdot \frac{L_t}{L_{t,\max}} \cdot \left(2 - \frac{L_t}{L_{t,\max}}\right)$$
(84)

Vzdolžne strižne napetosti med CFRP lamelo in betonom pri mejnem stanju nosilnosti se omeji na vrednost 0,8 MPa:

$$\tau = V_{Ed} \cdot A_{CFRP} \cdot \alpha_f \cdot \frac{h - x}{I_{razpokan} \cdot b_{CFRP}} \le 0,8 MPa$$
(85)

 $\alpha_f = E_{CFRP} / E_C \dots$  razmerje elastičnih modulov CFRP lamele in betona  $V_{Ed} \dots$  maksimalna računska prečna sila na obeh koncih lamele

 $I_{razpokan} \dots$  vztrajnostni moment razpokanega betonskega prereza

# 8.3.3 Omejitev deformacij v CFRP lameli za preprečitev odluščenja od betona

Skladno s priporočili iz literature [14] za preprečitev odluščenja lamele na stiku z betonom morajo deformacije v lameli zadostiti sledečem pogoju:

 $\varepsilon_{CFRP} \leq \begin{cases} 8 \% & \text{za porazdeljeno obtežbo} \\ 6 \% & \text{za kombinacijo velikih strižnih sil in upogibnih momentov} \end{cases}$ (86)

## 8.4 Dimenzioniranje utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo

Na podlagi izrazov opisanih v poglavjih 8.1, 8.2 in 8.3 ter izhodiščnih ravnotežnih enačb (51) in (52) je s pomočjo programa Excel izdelan program za dimenzioniranje utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo. Za delovanje programa mora biti vključen vtičnik »Reševalnik«.

V programu je izveden račun obravnavanega armiranobetonskega nosilca, ki je naknadno utrjen s CFRP lamelo. Polja vhodnih podatkov za izračun dimenzioniranja utrjenega nosilca so obarvana z rumeno. Ko so vsi vhodni podatki v rumenih poljih vneseni se s klikom na gumb »Izračun« požene »Reševalnik«, ki s svojim algoritmom reši nastavljene sisteme enačb. V modrih poljih se izpišejo rezultati deformacijskega stanja prereza. V vseh odebeljenih opozorilnih okvirčkih pod razdelkom »KONTROLE ZA MEJNO STANJE NOSILNOSTI« se mora izpisati »OK«, sicer izbrani parametri CFRP lamele ne ustrezajo pogojem mejnega stanja nosilnosti. Za vsako kontrolo je izračunana izkoriščenost, glede na katero se lahko določi bolj optimalno oziroma primernejšo dimenzijo ali kvaliteto kompozitne lamele. Bližje kot je izkoriščenost vrednosti 100 %, optimalnejše je izbrana utrditvena kompozitna lamela. Izkoriščenost nikoli ne sme presegati 100 %, saj s tem kriteriji po standardih in priporočilih niso zadoščen, kar program tudi javi v opozorilnih kontrolnih okvirčkih, ki se v takšnem primeru obarvajo rdeče in javijo, kaj je potrebno popraviti.

V nadaljevanju je prikazan potek dimenzioniranja utrditvene CFRP lamele z izdelanim programom za obravnavan armiranobetonski nosilec.

Na sliki 44 je prikazan prvi del izdelanega programa, ki zajema vnos vhodnih podatkov in kjer poteka izračun geometrijskih in materialnih karakteristik za dimenzioniranje upogibne nosilnosti utrjenega armiranobetonskega nosilca s CFRP lamelo. V kolikor je želja po oceni karakterističnega stanja nosilca, je možno varnostne faktorje ročno popraviti na njihove karakteristične vrednosti, vendar se je potrebno zavedati, da se na to stanje utrditev ne sme projektirati. Utrditvene kompozitne lamele različnih proizvajalcev imajo vsaka svoje varnostne faktorje, katere je potrebno pred uporabo programa pridobiti s strani proizvajalca. Ker je ta program splošen, je potrebno varnostne faktorje lamele kot vhodni podatek vnesti z razmislekom.

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE							
Beton			Armatura			CFRP lamela	
h [mm]	240		a [mm]	27		L <sub>CFRP</sub> [mm]	3550
b [mm]	160		Φ [mm]	14		b <sub>CFRP</sub> [mm]	100
			n	3		h <sub>CFRP</sub> [mm]	1.4
			d [mm]	213		n	1
L [m]	3.9		$A_{s,1} [mm^2]$	153.9		d <sub>CFRP</sub> [mm]	240.7
I <sub>razpokan</sub> [mm <sup>4</sup> ]	117669231		$A_s [mm^2]$	461.8		$A_{CFRP,1} [mm^2]$	140
$a_{f}[ \setminus ]$	5.62				-	$A_{CFRP} [mm^2]$	140
$A_{s+CFRP} [mm^2] \qquad 601.8$							
d <sub>s+CFRP</sub> [m							219.4
		Μ	ATERIALNE KAI	RAKTERISTI	KE		
Beton			Armatura			CFRP lamela	
γc	1.50		$\gamma_{s}$	1.15		$\gamma_{CFRP,E}$ [ \ ]	1.10
f <sub>ck</sub> [MPa]	40.00		f <sub>yk</sub> [MPa]	500.00		$\gamma_{\text{CFRP},m}[\setminus]$	1.20
f <sub>cd</sub> [MPa]	26.67		f <sub>yd</sub> [MPa]	434.78		$\gamma_{CFRP,\epsilon}[\]$	1.25
$\epsilon_{c2}$ [‰]	2.00		E <sub>s</sub> [MPa]	200000		E <sub>CFRP,k</sub> [MPa]	170000
ε <sub>cu2</sub> [‰]	3.50		ε <sub>sy</sub> [‰]	2.17		E <sub>CFRP,d</sub> [MPa]	128788
E <sub>c</sub> [MPa]	30270		ε <sub>su</sub> [‰]	10.00		ε <sub>CFRP,k</sub> [‰]	18.24
f <sub>ct</sub> [MPa]	1.624					<i></i> <sub>СFRP,d</sub> [‰]	12.16
						f <sub>CFRP,k</sub> [MPa]	3100
						f <sub>CFRP,d</sub> [MPa]	1565.7

Slika 44: Vhodni podatki in izračun geometrijskih in materialnih karakteristik

Na sliki 45 je prikazan drugi del programa za izračun upogibne nosilnosti utrjenega nosilca s CFRP lamelo, ki je analiziran tekom tega magistrskega dela. V tem delu program izračuna računske vrednosti deformacij glede na deformacijsko ravnotežje po prerezu in s tem določi projektno upogibno nosilnost utrjenega prereza nosilca.

V obravnavanem primeru pri eksperimentu utrditve armiranobetonskega nosilca je bil nosilec popolnoma razbremenjen in zasukan okoli svoje vzdolžne osi za 180 stopinj. Spodnja stran nosilca bila v času namestitve CFRP lamele obrnjena navzgor. Na mestu stika med CFRP lamelo in betonom ni bilo praktično nikakršne preddeformacije oziroma je bila ta negativna, zato je polje z momentno obtežbo  $M_0$ izpolnjeno z vrednostjo 0,0 kNm. Momentna obtežba 56 kN je bila določena s poizkušanjem in sicer na način, da se vse kontrole izidejo in je hkrati tudi izkoriščenost kar največja možna, ki ne presega kriterijev iz standardov in priporočil.



Slika 45: Izračun stanja pred utrditvijo in upogibna nosilnost utrjenega nosilca

Slika 46 prikazuje zadnji del izdelanega programa, kjer se izvršijo vse potrebne kontrole za mejno stanje nosilnosti upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca utrjenega s CFRP lamelo.

Glede na izkoriščenost vsake izmed potrebnih kontrol pri obravnavanem nosilcu je razvidno, da je projektna obtežba 56 kNm maksimalna možna računska obtežba glede na uporabljeno CFRP lamelo. Iz izkoriščenosti kontrol na sliki 46 je razvidno, da se deformacije v betonu v tlaku z vrednostjo 3,34 ‰ približajo meji 3,5 ‰, ko nastopi krhka porušitev tlačene cone betona. V kolikor bi bila uporabljena CFRP lamela z večjim elastičnim modulom ali večjo debelino, projektne upogibne nosilnosti celotnega nosilca nebi mogli zvišati, saj je ta omejena z nosilnostjo betona v tlaku. Če pa bi bila uporabljena ožja CFRP lamela takšne upogibne nosilnosti nebi mogli zagotoviti, saj bi že prej dosegla priporočeno računsko omejitev deformacij, ki povzročijo odluščenje lamele na stiku od betona.



Slika 46: Kontrole za mejno stanje nosilnosti in izkoriščenost kapacitet

## 8.5 Primerjava dejanskega in projektnega stanja upogibne nosilnosti utrjenega nosilca

Z izdelanim programom je bilo za obravnavan nosilec narejenih več izračunov pri različnih obremenitvah do največje dovoljene projektne obremenitve  $M_{Ed} = M_{Rd,u} = 56$  kNm. Preko upogibne nosilnosti  $M_{Rd,u}$  je z enačbo (87) določena tudi računska sila F za obravnavani štiri točkovni upogibni preizkus nosilca v namen primerjave dejanskega in dimenzioniranega stanja. Rezultati tlačnih deformacij v betonu  $\varepsilon_c$ , nateznih deformacij v armaturi  $\varepsilon_S$  in nateznih deformacij v CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  v odvisnosti od računske upogibne nosilnosti  $M_{Ed}$  in največje dovoljene računske obtežne sile za obravnavan primer  $F_{Ed}$  so zbrani v preglednici 17.

$$F = \frac{2 \cdot M_{Rd,s+CFRP}}{L_1} = \frac{2 \cdot M_{Rd,c,u}}{L_1} = \frac{2 \cdot M_{Rd,u}}{L_1}$$
(87)

ε <sub>c</sub>	ε <sub>s</sub>	ECFRP	$\mathbf{M}_{\mathrm{Ed}} = \mathbf{M}_{\mathrm{Rd,u}}$	$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\mathbf{Ed}} = \mathbf{F}_{\mathbf{Rd.u}}$
[‰]	[‰]	[‰]	[kNm]	[kN]
0	0	0	0	0
0.059	0.092	0.111	2	2.76
0.119	0.184	0.222	4	5.52
0.242	0.368	0.445	8	11.03
0.305	0.460	0.557	10	13.79
0.401	0.599	0.726	13	17.93
0.534	0.785	0.952	17	23.45
0.637	0.925	1.123	20	27.59
0.743	1.066	1.295	23	31.72
0.853	1.207	1.468	26	35.86
0.967	1.349	1.643	29	40.00
1.086	1.493	1.819	32	44.14
1.211	1.637	1.998	35	48.28
1.298	1.733	2.118	37	51.03
1.435	1.880	2.300	40	55.17
1.581	2.028	2.485	43	59.31
1.743	2.191	2.689	46	63.45
2.110	2.845	3.473	49	67.59
2.568	3.558	4.335	52	71.72
2.743	3.806	4.636	53	73.10
2.930	4.058	4.944	54	74.48
3.129	4.313	5.257	55	75.86
3.341	4.572	5.575	56	77.24

Preglednica 17: Izračun projektnega stanja obravnavanega utrjenega nosilca pri različnih obremenitvah

Primerjava dejanske upogibne nosilnosti dobljene iz eksperimenta, numerične analize in analitičnega izračuna s projektno nosilnostjo je prikazana z odvisnostmi obremenitvene sile F od tlačnih deformacij na vrhu prereza  $\varepsilon_c$  na grafikonu 50, nateznih deformacij v spodnji natezni armaturi  $\varepsilon_s$  na grafikonu 51 in nateznih deformacij v utrditveni CFRP lameli  $\varepsilon_{CFRP}$  na grafikonu 52.

Glede na primerjavo rezultatov obravnavanega realnega stanja z dimenzioniranim projektnim stanjem se pokaže velika mera varnosti v inženirski praksi. Utrjen nosilec je dejansko sposoben prevzeti veliko večjo obtežbo kot je določena z dimenzioniranim stanjem. Pri dimenzioniranju se prične nosilec obnašati plastično pri velikosti sile F = 63 kN medtem, ko ostale analize dejanskega stanja kažejo na plastifikacijo pri vrednosti sile F = 80 kN. Tudi končna nosilnost utrjenega nosilca je v dejanskem stanju precej večja kakor pri dimenzioniranju. Maksimalna sila, ki jo prenese utrjen nosilec pri štiri točkovnem eksperimentu je skoraj 100 kN, iz dimenzioniranja po standardih in priporočilih pa je maksimalna dovoljena obremenitev z upoštevanjem varnostnih faktorjev 77 kN.



Grafikon 50: Primerjava dejanskih odvisnosti F –  $\varepsilon_c$  s projektnimi



Grafikon 51: Primerjava dejanskih odvisnosti F –  $\varepsilon_s$  s projektnimi



# 8.6 Primerjava projektnega stanja upogibne nosilnosti neutrjenega in utrjenega nosilca

Izdelan program lahko služi tudi za dimenzioniranje armiranobetonskih nosilcev brez utrditev. V takšnem primeru se kot vhodni podatek za število lamel n vpiše vrednost 0. S tem program zazna, da utrditvene lamele ni in iz izračunov izvzame vse parametre lamele, ki bi jih sicer upošteval. Na ta način je izvedeno še dimenzioniranje neutrjenega nosilca v namen primerjave z izboljšanim projektnim stanjem utrjenega nosilca. Izračuni dimenzioniranja obravnavanega neutrjenega nosilca so bili izvedeni na enak princip kot v poglavju 8.5 za utrjen nosilec pri različnih velikostih obtežbe in so zbrani v preglednici 18.

ε <sub>c</sub>	ε <sub>s</sub>	$\mathbf{M}_{\mathrm{Ed}} = \mathbf{M}_{\mathrm{Rd}}$	$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{Ed} = \mathbf{F}_{Rd}$
[‰]	[‰]	[kNm]	[kN]
0	0	0.00	0
0.099	0.174	3.00	4.14
0.304	0.522	9.00	12.41
0.411	0.698	12.00	16.55
0.558	0.933	16.00	22.07
0.712	1.169	20.00	27.59
0.874	1.407	24.00	33.10
1.045	1.648	28.00	38.62
1.227	1.891	32.00	44.14
1.324	2.013	34.00	46.90
1.373	2.075	35.00	48.28
1.424	2.137	36.00	49.66
1.594	2.629	36.90	50.90
1.813	3.378	37.25	51.38
2.743	6.656	37.80	52.14
3.500	9.323	37.91	52.29

Preglednica 18: Izračun projektnega stanja obravnavanega neutrjenega nosilca pri različnih obremenitvah

Rezultati tlačnih deformacij v betonu  $\varepsilon_c$  in nateznih deformacij v armaturi  $\varepsilon_S$  v odvisnosti od obremenitvene sile F, ki jo nosilec v projektnem stanju pri štiri točkovnem upogibnem lahko prenese, so prikazani na grafikonih 53 in 54, kjer je narejena tudi primerjava z rezultati projektnega stanja utrjenega nosilca iz poglavja 8.5. Iz primerjave projektnih stanj neutrjenega in utrjenega nosilca je očitno izboljšano stanje po utrditvi s CFRP lamelo. Pri neutrjenem nosilcu iz štiri točkovnega upogibnega preizkusa znaša maksimalna projektna sila F = 52,3 kN, pri utrjenem nosilcu pa F = 78,2 kN, kar pomeni, da se upogibna nosilnost poveča za 33 % glede na projektno stanje pred utrditvijo.



Grafikon 53: Primerjava odvisnosti F - ɛc neutrjenega in utrjenega projektnega stanja nosilca



Grafikon 54: Primerjava odvisnosti F - ɛs neutrjenega in utrjenega projektnega stanja nosilca

# 9 ZAKLJUČEK

Dandanes je utrjevanje obstoječih armiranobetonskih elementov nosilnih konstrukcij vedno bolj pogosta stalnica. Z razvojem različnih kompozitov z vse boljšimi mehanskimi karakteristikami, boljšo odpornostjo proti zunanjim vplivom in preprostejšo izvedbo so le-ti v zadnjih desetletjih zamenjali uporabo jeklenih in ostalih utrditvenih materialov. Kljub njihovim prednostim so kompozitni elementi še vedno razmeroma dragi, zato je potreba po njihovi ekonomični uporabi nujna. Pri utrditvi nosilnih konstrukcij večjih objektov, kjer je potrebno uporabiti večjo količino utrditvenih kompozitnih lamel, je potrebno tehtno premisliti in optimalno določiti količino in kvaliteto le-teh, saj lahko v nasprotnem primeru cena materiala enormno naraste, ne da bi s tem pridobili kakršnokoli izboljšavo mejnega stanja nosilnosti in je s tem poraba finančnih sredstev potratna.

Za optimalno dimenzioniranje utrditvenih elementov obstoječih nosilnih armiranobetonskih konstrukcij je potrebna natančna predhodna ocena geometrijskih in materialnih karakteristik obstoječih armiranobetonskih elementov. To dosežemo s pomočjo nedestruktivnih in destruktivnih metod, pri čemer je pomembno, da se ob tem ne poslabša celovitosti obstoječih elementov oziroma njihova nosilnost.

Pogosta omejitev pri utrditvi upogibno obremenjenih armiranobetonskih elementov je nosilnost betona v tlačni coni prereza. Če je nosilnost betona v tlaku presežena še pred dosegom natezne nosilnosti jeklene armature in dodane CFRP lamele, se z dodajanjem oziroma povečanjem količine ali kvalitete utrditvenih lamel celotna upogibna nosilnost utrjenega elementa ne veča, kar je bilo potrjeno tudi v magistrskem delu pri dimenzioniranju utrditve obravnavanega nosilca v izdelanem primeru. Tako pride do krhke porušitve (drobljenja betona v tlačeni coni) pred dosegom nosilnosti skupne natezne armature, kar pomeni, da je utrditev predimenzionirana. V izogib temu, je na podlagi predhodno izvedenih nedestruktivnih in destruktivnih raziskav pomembna natančna ocena mehanskih karakteristik betona iz katerega je narejen armiranobetonski element, iz katerih se posledično ugotovi zgornja meja upogibne nosilnosti elementa, glede na katero se dimenzionira utrditev.

Poleg nosilnosti betona je pri dimenzioniranju utrjenega nosilca potrebno skladno s priporočili upoštevati tudi ostale porušne mehanizme in sicer odcepitev koncev lamele in odluščenje lamele od betona. Porušni mehanizmi so odvisni od velikosti stične površine med lamelo in betonom ter sidrne dolžine lamele in predstavljajo enega izmed pogojev za izbiro potrebne širine in dolžine utrditvene CFRP lamele.

Pri utrditvi obstoječih nosilnih elementov se teh ne sme poškodovati oziroma je izvedba destruktivnih testov nosilnih elementov v večini primerov nemogoča, zato je ključnega pomena dobro izvedena numerična analiza ali analitični izračun s katerima se opiše in predvidi dejansko obnašanje nosilnih elementov na terenu.

Cilj magistrskega dela je bilo poiskati potrebne nedestruktivne metode, s katerimi se oceni stanje obstoječega armiranobetonskega nosilca potrebnega utrditve, preučiti obnašanje neutrjenega in utrjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitno CFRP lamelo na podlagi eksperimentalne analize štiri točkovnega upogibnega preizkusa ter izdelati preprost program za dimenzioniranje oziroma izbiro optimalne kompozitne CFRP lamele.

Iz spremljevalnih preiskav je bilo ugotovljeno, da se z nedestruktivno metodo in sicer z detektorjem kovin kot je Hilti – Ferroscan PS 200 S dovolj dobro oceni geometrijske karakteristike armiranobetonskega nosilca (položaj in velikost armaturnih palic v betonskem prerezu). V primeru ko kvaliteta armaturnega jekla ni poznana, se lahko mehanske karakteristike oceni glede na uporabo materiala iz časovnega obdobja v katerem je bila konstrukcija grajena ali se v kolikor je mogoče odvzame del armaturne palice na mestu, kjer ta nima pomembne vloge, kot na primer v območju tlačene cone, kjer armatura ne prevzema nateznih sil in je bila vgrajena le zaradi lažje izvedbe med gradnjo.

Iz nedestruktivne metode ocene tlačne trdnosti betona s sklerometrom opravljene tekom magistrskega dela je razvidno, da so pridobljeni rezultati nekoliko na nevarni strani. Te rezultate je potrebno interpretirati previdno, zato je v takšnem primeru za dimenzioniranje priporočljivo vzeti podoben beton iz standarda in sicer tako, da se izbere tistega iz nižjega trdnostnega razreda oziroma je potrebno za potrditev tlačne trdnosti izvesti tlačni preizkus na zadostnem številu valjastih vzorcev.

V kolikor na terenu s pomočjo destruktivnih metod ni mogoče odvzeti vzorcev armaturnih palic in betona za določitev mehanskih materialnih karakteristik, se z nedestruktivnima metodama iz prejšnjih dveh odstavkov in določeno mero inženirskega občutka lahko varno in zanesljivo oceni obstoječe stanje armiranobetonskega upogibno obremenjenega elementa, glede na katero se bo izvedel račun dimenzioniranja utrditve s kompozitnimi lamelami.

V okviru magistrskega dela se je na podlagi pridobljenih rezultatov iz eksperimentalne analize obnašanja obravnavanega nosilca, tako neutrjenega kot tudi utrjenega, pridobilo dejanski upogibni odziv nosilca. Preko analitičnega izračuna in numerične analize obravnavanega nosilca je bilo ugotovljeno, da se lahko s predhodno dobro oceno materialnih in geometrijskih karakteristik na podlagi nedestruktivnih metod skoraj popolnoma približamo dejanskemu odzivu, čeprav beton velja za izrazito nehomogen material.

Prikazan analitični in numerični odziv nosilca na upogibno obremenitev v tem delu služi kot kontrola rezultatov pri dimenzioniranju utrjenega nosilca s CFRP lamelo, saj je s tem ugotovljena zadostna varnost računskega dimenzioniranega stanja v primerjavi z dejanskim stanjem.

Pomembna ugotovitev iz primerjav vseh opravljenih analiz dejanskega stanja obravnavanega nosilca je celotno upogibno obnašanje nosilca. Pri postopnem obremenjevanju se v prvem delu nosilec obnaša skoraj popolnoma elastično in sicer do meje, ki jo določa meja elastičnosti natezne armature in sicer pri 2,5 ‰, ko prične armatura teči. Pri nadaljnjem obremenjevanju se opazi izrazit padec upogibne nosilnosti.

Na podlagi standarda in priporočil je v sklopu magistrskega dela izdelan preprost program za optimalno dimenzioniranje upogibnih utrditev s kompozitnimi lamelami za potrebe naknadnih utrditev obstoječih upogibno obremenjenih armiranobetonskih nosilcev. Program je izdelan s pomočjo programskega okolja Microsoft Excel in je namenjen inženirjem za uporabo pri projektiranju upogibnih utrditev obstoječih nosilnih armiranobetonskih konstrukcij, vendar je potrebno pri tem poznati ozadje delovanja programa opisanega v tem delu in pazljivo pridobiti ter vnesti vhodne parametre obstoječih elementov. Program lahko služi za dimenzioniranje upogibnih utrditev obstoječih nosilcev iz katerekoli vrste kompozitnih lamel v kolikor so poznane njene mehanske lastnosti, ki jih program predvideva za vhodne podatke.

## VIRI

- Halal, J., Sofi, P., Mendis, P. 2015. Non-Destructive Testing Of Concrete: A Review of Methods. Special Issue: Electronic Journal of Structural Engineering. 14(1): 97-105. <u>http://www.ejse.org/Archives/Fulltext/2015-1/2015-1-9.pdf</u> (Pridobljeno 5. 6. 2017.)
- [2] Tomićić, I. 2001. Ojačavanje armiranobetonskih greda nemetalnim lamelama. Građevinar, 53: 641-649.
- [3] EN 13791:2007. Assessment of in-situ compressive strength in structures and pre-cast concrete components.
- [4] Proceq. Silver Schmidt Hammer Guide. <u>http://www.pcte.com.au/images/pdf/Silver%20Schmidt%20Hammer/The-SilverSchmidt-Reference-Curve.pdf</u> (Pridobljeno 5. 5. 2017.)
- [5] HILTI. Ferroscan PS 200 S Tehnični podatki.
   <u>https://www.hilti.si/merilni-sistemi/detektorji/2044434</u> (Pridobljeno 5.5. 2017.)
- [6] Cotič P., 2014. Sinteza večsenzorskih neporušnih preiskav gradbenih konstrukcijskih elementov z uporabo metod gručenja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cotič): 100 str.
- [7] HILTI. X-Scan PS 1000 Tehnični podatki.
   <u>https://www.hilti.si/merilni-sistemi/detektorji/2007503</u> (Pridobljeno 5. 5. 2017.)
- [8] EN 12390-3:2009. Compressive strength of test speciments Part 3: Testing hardened concrete.
- [9] ISO 6784:1982. Concrete Determination of static modulus of elasticity in compression.
- [10] EN 120002-1:2001. Metallic materials Tensile testing Part 1:Method of test at ambient temperature.
- [11] SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [12] Bergan, P.G., Holand, I. 1979. Nonlinear finite element analysis of concrete structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 17-18, 2. del: 443-467
- [13] Kaklauskas, G., Gribniak, V., Salys, D., Sokolov, A., Meskenas, A. 2011. Tension-Stiffening Model Attributed to Tensile Reinforcement for Concrete Flexural Members. Procedia Engineering 14: 1433-1438.

- [14] Darby, A., Ibell, T., Clarke, J. 2012. Design guidance for strengthening concrete structrures using fibre composite materials. Concrete Society. Technical report 55.
- [15] Batistič D., 2006. Obnašanje armiranobetonskih nosilcev ojačanih z ogljikovimi trakovi. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Batistič): 69 str.
- [16] MAPEI Carboplate. Tehnični list. http://www.mapei.com/public/SI/products/1001\_carboplate\_si.pdf (Pridobljeno 15. 5. 2017.)
- [17] MAPEI Adesilex PG1 Adesilex PG2. Tehnični list. <u>http://www.mapei.com/public/SI/products/364-380\_adesilexpg1-pg2\_si.pdf</u> (Pridobljeno 15. 5. 2017.)
- [18] Abaqus Analysis Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [19] Abaqus CAE Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [20] Abaqus Theory Manual. 2011. Providence, Dassault Systemes: loč. pag.
- [21] Lopatič, J. 2012. Betonske konstrukcije II B-UNI. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. str.: 27-39.