

ПРОРАЧУН И ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ СТАТИЧКИ НЕОДРЕЂЕНЕ ПРЕТХОДНО НАПРЕГНУТЕ КОНСТРУКЦИЈЕ МОСТА**STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN OF AN UNDETERMINED PRE-STRESSED STATIC BRIDGE STRUCTURE**

Предраг Деспотовић, Драго Жарковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област: – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – У оквиру овог рада приказан је статички и динамички прорачун моста новопроектоване брзе саобраћајнице I-Б реда на стационажи *km 66+270,5* на деоници Кула. Прорачунски модел моста урађен је у софтверском пакету *CSiBridge V24* коришћењем просторног модела са површинским коначним елементима као и моделирањем саме распонске конструкције у софтверу *SAP2000 V24* помоћу линијских коначних елемената. Преднапрезањем распонске конструкције моста обрађене су теоретске основе везане за статички неодређене констинуалне носаче, упоређене су вредности напона као и утицаја у распонској греди од трајне силе преднапрезања добијене на основу два различита модела, а све према актуелном стандарду Еврокод део *EN-1992-1-1* док је димензионисање свих елемената мостовске конструкције извршено за статички и за динамички модел према стандарду Еврокод. Овим радом обрађен је прорачун и димензионисање статички неодређене претходно напрегнуте конструкције моста где су испитане могућности моделирања распонске конструкције поједностављеним линијским моделима и сложенијим просторно површинским моделима, базираним на промени напонског стања услед накнадног преднапрезања.

Кључне речи: Статички и динамички прорачун, мост, *CSiBridge*, *SAP2000*, преднапрезање

Abstract – In this work, the static and dynamic structural analysis of the bridge of the new I-B line road at the stop at *km 66+270.5* on the Kula section is presented. The analysis model of the bridge was modelled in the *CSiBridge V24* software package using a spatial model with surface finite elements, as well as modelling the span structure itself in the *SAP2000 V24* software using line finite elements. By prestressing the bridge span structure, the theoretical bases related to statically indeterminate continuous constructions were processed, the stress values as well as the impact in the span beam from the permanent prestress force obtained on the basis of two different models were compared, all according to the current standard Eurocode part *EN-1992-1-1* while the design of all elements of the bridge structure was carried out for the static and for the dynamic model according to the Eurocode standard. This work deals with the design of a statically undetermined prestressed bridge

structure, where the possibilities of modelling the span structure with simplified line models and more complex spatial surface models, based on the change in stress state due to subsequent prestressing, are examined.

Keywords: Static and dynamic calculation, bridge, *CSiBridge*, *SAP2000*, prestressing

1. УВОД

У данашње време доста новчаних средстава се улаже у развој копненог саобраћаја. Развојем саобраћајне инфраструктуре долази се и до потребе за пројектовањем мостова, надвожњака, подвожњака, путних објеката преко пута. Како је трасирање саобраћајнице сложеног типа често се јављају и потребе за мостовима средњих и већих распона, а како на тржишту преовлађује технологија извођења бетонских мостова то обично буду бетонски мостови. Да би се испројектовали бетонски мостови већих распона неопходна је и примена преднапреднутог система са високовредним ужадима.

Применом овог система могуће је адекватно испројектовати конструкцију моста а самим тим и успоставити добру усаглашеност са трасером саобраћајнице.

У овом раду приказан је прорачун и димензионисање претходно напрегнуте статички неодређене конструкције моста, стационаже *km 66+270.5* – део Кула која преводи брзу саобраћајницу I-Б реда преко природне препреке – канал Мали Иђош.

Због сложености извођења распонске конструкције огледане применом фазне градње поље по пољу, извршена је упоредна анализа напонског стања и порарчуна губитака услед силе преднапрезања поређењем два конструкцијска модела који би за крајњи циљ дали могућност примене моделирања поједностављених раванских линијских система поређењем напона у носачу услед система накнадног преднапрезања, утицаја у носачу услед трајне силе преднапрезања као и приказ угиба. У првом просторном моделу (*CsiBridge*) примењени су површински коначни елементи док су у другом раванском моделу (*SAP2000*) примењени линијски коначни елементи. Резултати варијације напонског стања у носачу и силе преднапрезања биће приказани у поглављу 3.

НАПОМЕНА:

Овај рад произтекао је из мастер рада чији ментор је био др Драго Жарковић, доцент.

2. ОПИС И МОДЕЛ КОНСТРУКЦИЈЕ

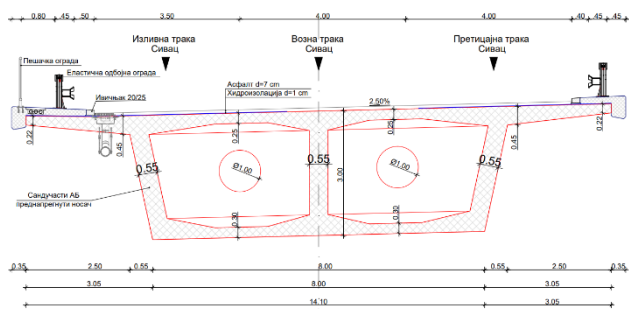
Овај технички извештај описује пројекат моста на стационожи km 66+570,5 разрађеног у нивоу идејног пројекта са локацијом моста у Кули. Статички систем је рамовска континуална конструкција, фазно преднапрегнута са зглобним везама између стубова и распонске конструкције као и између обалних стубова и распонске конструкције. Распони моста су 45m+60m+45m што у збиру даје укупну дужину моста од 150 метара.

Диспозицијом је решено да оса моста заклапа прав угао са низом стубова (3 стуба по ослоначком месту у пољу). Према врсти правца мост је класификован као мост у правцу.

Примењено је накнадно преднапрезање са спојем, од ужади номиналног пречника 15,2 mm система SPB-super.

Свако од три ребра садржи по 8 кабела 19Y1860 S7-B.

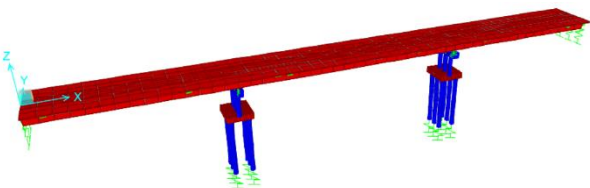
Због примене фазне градње моста у сваком од три ребра каблови су подељени у две групе по 4 кабела за фазно утезање. Траса споменутих каблова има тенденцију да буде конкорданта сопственој тежини моста, стога се усвојила као траса која меандрира око тежишне осе моста. Због превеликих савојних утицаја, у доњој фланши моста на средини распона додато је још 6 кабела 7Y1860 S7-B-15,2.



Слика 1 – попречни пресек моста у пољу

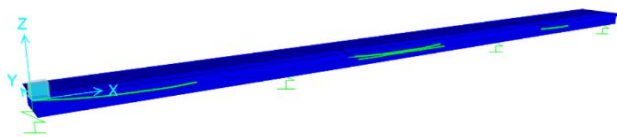
Анализа оптерећења урађена је у складу са стандардом Еврокод део EN-1991

У првом прорачунском моделу примењено је просторно моделирање распонске конструкције моста помоћу површинских коначних елемената. На слици 2 приказан је рендеровани просторни приказ модела у програмском пакету CSiBridge:



Слика 2 – просторни модел моста за структуралну анализу

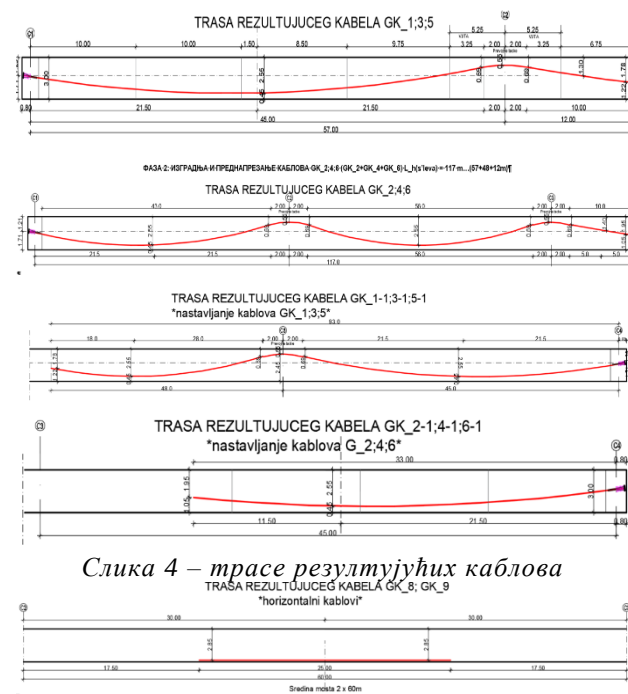
У другом прорачунском моделу распонска конструкција моста моделирана је линијским коначним елементима у програму SAP2000. Попречни пресек греде направљен је помоћу опције "section designer" у складу са сликом 1. Распонска



Слика 3 – линијски модел греде конструкција у овом случају је ослоњена на крајевима покретно у подужном правцу и на крајњем месту торзионо укљештена док је на средњим ослонцима постављено непокретно лежиште.

И у једном и у другом моделу коришћен је модул нелинеарне фазне градње за контролу напона.

Приказ усвојене трасе каблова (слика 4)



Слика 4 – трасе резултујућих каблова
TRASA REZULTUJUĆEG KABELA GK_8; GK_9
"horizontalni kablovi"

3. РЕЗУЛТАТИ АНАЛИЗЕ

Код статички одређених носача сила притиска настала затезањем кабела P_m на неком ексцентрицитету e од тежишне осе ствара моменте савијања у носачу једнак $M_{pm} = P_m \cdot e$ (1)

Међутим код статички неодређених носача, било спољашње неодређених или унутрашње неодређених носача, момент савијања настао од силе преднапрезања на некој удаљености e од тежишне осе неће бити једнак горе споменутој једначини (1) већ ће се та вредност разликовати за износ секундарних утицаја ΔM_{ks} и може се срачунати према изразу (2).

$$\Delta M_{ks} = M_k - P_m \cdot e \quad (2),$$

где је M_k вредност момента од силе преднапрезања срачунате преко еквивалентног оптерећења а ΔM_{ks} вредност секундарног момента. Тако добијена

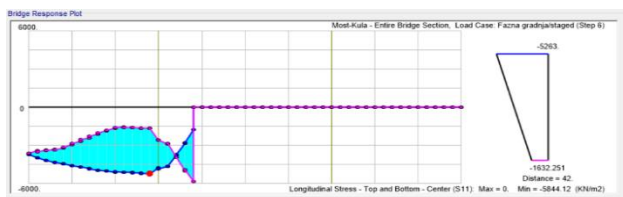
вредност секундарног момента се сабира са вредношћу прорачунског момента и користи се искључиво за димензионисање пресека.

$$M_{Ed,s} = M_{Ed} + \Delta M_{ks} \dots\dots\dots(3)$$

Где је $M_{Ed,s}$ прорачунска вредност момента за димензионисање пресека.

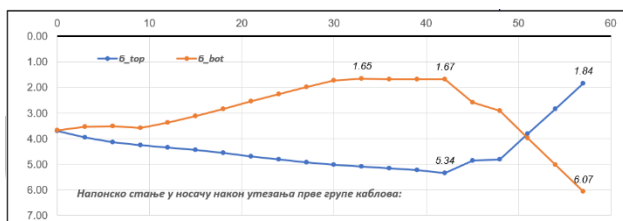
Код напонских контрола у попречном пресеку као и код прорачуна угиба користи се вредност силе преднапрезања срачунате преко еквивалентног оптерећења.

У првој фази утезања каблова и један и други модел дали су приближно исту слику напонског стања. У првој фази носач је статички одређена греда са препустом стога није дошло до прерасподеле оптерећења и утицаји су приближни.



Слика 5-напон по дужини носача добијен софтвером CSiBridge за фазу 1

На слици 5 приказан је управни напон по дужини носача. За тачку на удаљености $x=42m$ вредност напона износи $\sigma_{top} = -5,26 MPa$, $\sigma_{bot} = -1,6 MPa$.



Слика 6- напон по дужини носача добијен софтвером SAP2000 за фазу 1

На слици 6 приказан је управни напон по дужини носача. За тачку на удаљености $x=42m$ вредност напона износи $\sigma_{top} = -5,34 MPa$, $\sigma_{bot} = -1,67 MPa$.

У наредном кораку приказаће се упоредне вредности напона срачунате на оба модела за све фазе извођења.

софтвери	Мра	фаза 1		фаза 2		фаза 3		фаза 4		фаза 5
		X = 18m	X = 42m	X = 18m	X = 75m	X = 75m	X = 102m	X = 102m	X = 135m	X = 102m
CSiBridge (staged construction)	σ_{top}	-4.31	-5.26	-3	2.6	-7.5	-10.25	-11.3	-3.9	-11.55
	σ_{bot}	-2.4	-1.6	-13.11	-7.8	-3.75	-1.87	-0.3	-11.25	0
SAP2000 (staged construction)	σ_{top}	-4.38	-5.34	-2.5	2.01	-7.11	-9.39	-10.79	-2.69	-11.85
	σ_{bot}	-2.44	-1.67	-12.86	-7.26	-4.16	-2.87	-0.96	-13.1	-0.87

Табела 1-приказ напона за све фазе извођења и утезања

У табели 1, приказане су вредности напона за карактеристичне тачке носача за све фазе извођења конструкције и утезања каблова. Након тренутних губитака силе преднапрезања (и делом временских због тока извођења конструкције) разлике које су се добиле између просторно површинског и линијског модела приближно износе 20-25% са карактеристичном разликом напона затезања у другој фази на удаљености $X=75m$ где се са софтвером SAP2000 на линијском моделу добио напон затезања

горње зоне од $\sigma_{top} = 2,01 MPa$ док се простопним моделом CSiBridge добио напон затезања горње зоне од $\sigma_{top} = 2,6 MPa$. Овде се већ може уочити да линијски модел даје ниже вредности напона затезања што овај модел одвлачи на страну неконзервативности.

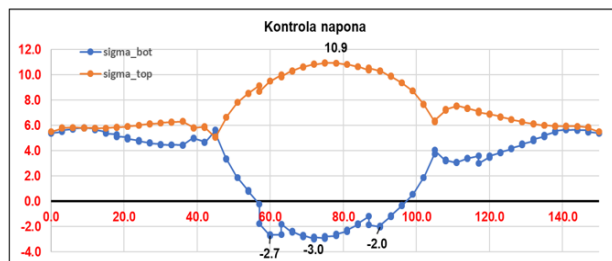
У даљем наставку рада приказаће се напонска стања у носачу за експлоатациони период.

софтвери	Мра	експлоатација		
		X = 18m	X = 75m	X = 135m
CSiBridge (staged construction)	σ_{top}	-5.95	-10.9	-6.05
	σ_{bot}	-5.1	3	-4.2
SAP2000 (staged construction)	σ_{top}	-3.71	-8.88	-3.99
	σ_{bot}	-3.41	1.6	-1.91

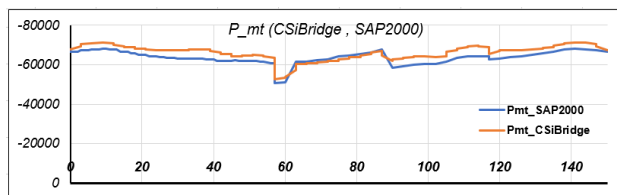
Табела 2- напонско стање у току експлоат.

Са табеле изнад уочавају се сада значајнија одступања напона контролисана просторно површинским и линијским моделом. Линијским моделом добијене су неконзервативније вредности напона чак и до 45% у критичним пресецима. Могло би се закључити да је по напонском стању доста боље и сигурније користити површинске моделе због тачније прерасподеле утицаја у модулима нелинеарне фазне градње као и због контроле напона затезања код претходно напрегнутих система.

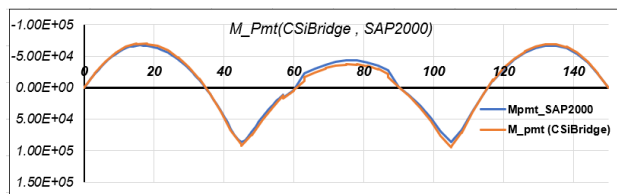
Комб: G(stg:con)+dg+Pn_t+CSi.inf+dTM_heat+0,375dTN.exp+0,75-TS+0,4(UDL+PS)I



Слика 7-CSiBridge напон за меродавну комбинацију оптерећења у току експлоатације.



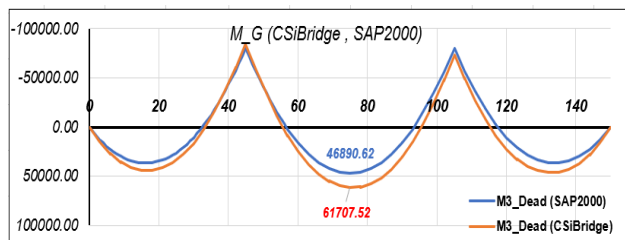
Слика 8 – коначна сила преднапрезања



Слика 9 – моменти савијања од трајне силе преднапрезања

На слици 8 приказан је ток силе преднапрезања у софтверима CSiBridge – просторни модел и SAP2000-линијски модел. Разлика у силама није велика и по овом критеријуму модели су упоредиви.

На слици 9 приказан је дијаграм момената савијања услед трајне силе преданпрезања. Дијаграми су приближног интензитета са разликом око 5 % што је у инжењерској пракси прихватљиво (горња граница прихватљивости).



Слика 10 – дијаграм момената савијања услед сопствене тежине

На слици 10 се уочава значајна разлика момената савијања у поређењу просторног и линијског модела. Са просторним моделом добијен је дијаграм момената савијања у средњем пољу у износу $M = 61\,708\text{ kNm}$ што је за 24% већи утицај савијања од модела са линијским коначним елементима који резултује моментом савијања $M = 46\,890\text{ kNm}$.

Утицај прерасподеле оптерећења има значајну улогу на прорачун напонског стања, овде се може рећи да је разлика напона затезања настала у другој фази извођења конструкције као и током експлоатације у највећој мери проистекла из разлике утицаја од сопствене тежине.

Карактер. пресеци	18 m	75 m	132 m
U_z (mm)			
U_z (staged cons.), 3D model	45	103	36
U_z (linear constr.) 3D model	49	107,8	44
U_z (staged cons.), 2D model	28	80	48
U_z (linear constr.) 2D model	32	71	32

Табела 1-приказ вертикалне деформације од сопствене тежине

У табели 1 приказане су вредности угиба карактеристичних тачака моста у пољу. Као и до сада поређени су равански и просторни модел конструкције. Разматрало се понашање носача применом модула фазне изградње и применом модула линеарне изградње (носач изливен изједно-континуална греда).

И у једном и у другом случају просторни модел конструкције дао је угибе који се од линијских модела разликују за 20%, по овом критеријуму линијски модели имају неконзервативнији приступ а опет се то може објаснити прерасподелом оптерећења услед фаза изградње.

4. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада приказана је упоредна анализа просторног модела конструкције применом софтвера CSiBridge V24 i линијског поједностављеног модела

конструкције моста применом софтвера SAP2000. Након спроведене упоредне анализе ова два модела дошло се до закључка да се трајна сила преднапрезања на линијском моделу не разликује у великој мери од силе преднапрезања добијене просторним моделом. Глобално силе преднапрезања се разликују од 5-7% што би за прелиминарне анализе било сасвим прихватљиво.

Због разлике у прерасподели оптерећења услед сопствене тежине линијски модели би могли потценити прорачунске вредности утицаја.

Као закључак овог рада могло би се констатовати да је линијски модел конструкције употребљив за нека прелиминарна решења где се не тражи велики ниво детаљности, док би се за даљи ниво прорачуна требао користити просторни модел.

5. ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Пржуљ М., 2014, Мостови
- [2] Андорић Б., Чаушевић М., Дујмовић Д., Џеба И., Маркулак Д., Перош Б., 2005, Челочни и спрегнути мостови
- [3] Рашета А., Цолев И., 2018, Предавање из предмета: Мостови и пројектовање бетонских и металних мостова
- [4] Алendar В., 2003, Претходно напрегнути бетон
- [5] SRPS EN 1990, 2012, Основе пројектовања конструкција
- [6] SRPS EN 1990/NA, 2012, Основе пројектовања конструкција – национални анекс
- [7] SRPS EN 1991, 2012, Дејства на конструкције
- [8] Еврокод 1, 2020, Дејства на конструкције- национални прилози
- [9] SRPS EN 1992-1-1, 2015, Пројектовање бетонских конструкција
- [10] Еврокод 2, 2022, Пројектовање бетонских конструкција-национални прилози

Кратка биографија:



Предраг Деспотовић, рођен у Лозници 1998. године. Мастер рад на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Грађевинарство-конструкције одбранио је 2023. године.

Контакт:

predragdespotovic614@gmail.com.



Драго Жарковић рођен 1985. године у Задру. Од 2009.-2015. године радио као стално запослен у пројектним бироима а од 2015. године је запослен на Факултету техничких наука као асистент. Од 2021. године је запослен као

доцент на факултету техничких наука универзитета у Новом саду.