

УТИЦАЈ ПОЈЕДИНАЧНИХ ОТВОРА
У РЕБРИМА СПРЕГНУТИХ НОСАЧА НА ДЕФОРМАЦИЈУ

THE IMPACT OF SINGLE WEB OPENINGS
ON DEFLECTIONS OF COMPOSITE BEAMS

Никола Вукић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – У раду је анализиран утицај појединачних правоугаоних отвора у ребру челичног профила на угибе спрегнутих носача од челика и бетона. Параметрска анализа обухвата носаче распона 10 m и 15 m са различитим величинама и положајима укрупњених и неукрупњених отвора.

Кључне речи: Спрегнуте конструкције, отвори, угиби

Abstract – This paper analyzes the impact of single rectangular web openings on deflections of steel concrete composite beams. In the analysis size and position of unstiffened and stiffened openings are varied for 10 m and 15 m span.

Keywords: Composite structures, openings, deflections

1. УВОД

У фази пројектовања објекта често је неопходно предвидети простор за вођење различитих врста инсталација (водовод, канализација, вентилација климатизација, грејање и др.). Овај простор могуће је обезбедити повећањем спратне висине, али овакво решење повећава трошкове изградње.

Код конструкција са челичним и спрегнутим носачима рационалније решење јесте смештање инсталација у висини пресека пројектовањем гредних носача са отворима у ребрима, што се све чешће користи у пракси.

С обзиром да слабљење пресека доводи и до смањења крутости, а последично и до повећања деформација, неопходно је размотрити величину и положај отвора у ребру како би критеријуми носивости, стабилности и употребљивости били задовољени.

Узимајући у обзир начин израде и прорачун постоје појединачни отвори и више отвора на једнаком растојању. Код појединачних отвора постоји један отвор или неколико (изолованих) отвора код којих не постоји међусобни утицај и могу се прорачунавати појединачно. Друга група су отвори који се постављају на једнаком растојању од почетка до краја носача, осим у зонама максималних вредности трансверзалних сила, где отвори изостају.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био доц. др Милан Спремић.

2. ДЕФОРМАЦИЈЕ НОСАЧА СА ОТВОРОМ У РЕБРИМА

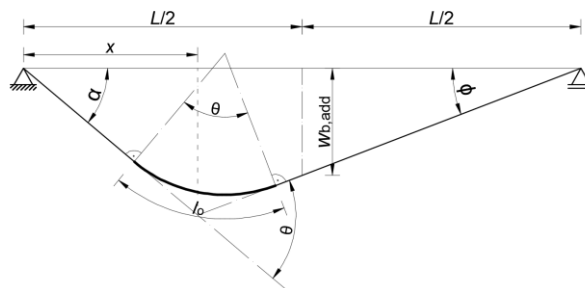
Увођењем отвора у ребро спрегнутог носача смањује се површина попречног пресека ребра која доприноси савојној и смичућој крутости носача, што доводи до појаве додатног угиба услед увођења отвора (w_{add}).

У овом поглављу ће према [1] и [2] бити изведени изрази за додатни угиб носача статичког система просте греде распона L са правоугаоним отворима дужине l_o и висине h_o на растојању x од ослоња. Висина челичног профила је h , а висина АБ плоче која је спрегнута са челичним носачем h_c . Разматрани отвори се налазе на средини висине челичног профила и нису укрупњени хоризонталним или вертикалним укрупњењима.

Добијени додатни угиби биће поређени са угибом носача без отвора услед савијања (w_b).

2.1. Додатни угиби услед савијања

На слици 1 је приказана додатна деформација носача услед савијања на месту отвора.



Слика 1. Додатна деформација услед савијања [1]

На основу геометрије на слици 1 следи да је:

$$\theta = \alpha + \phi, \quad (1)$$

$$x \cdot \operatorname{tg} \alpha = (L - x) \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (2)$$

$$w_{b,add} = \phi \cdot \frac{L}{2}. \quad (3)$$

Из израза (1) и (2) се добија угао ротације ϕ :

$$\phi = \frac{x}{L} \cdot \theta. \quad (4)$$

Додатни угиб у функцији угла ротације и положаја отвора добија се уврштавањем израза (4) у (3):

$$w_{b,add} = \theta \cdot \frac{x}{2}. \quad (5)$$

Угао ротације услед додатне закривљености еластичне линије носача са отвором износи:

$$\theta = \left[\frac{M}{EI} - \frac{M}{EI_{eff,o}} \right] \cdot l_o. \quad (6)$$

У изразу (6) EI је савојна крутост носача без отвора, а $EI_{eff,o}$ савојна крутост на месту отвора. Њихов однос има следећу вредност [1]:

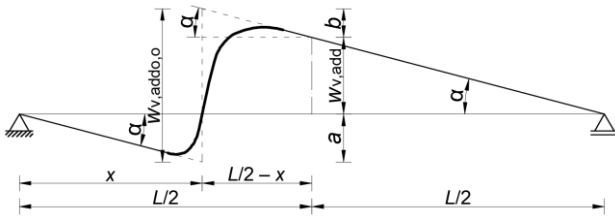
$$\frac{EI}{EI_{eff,o}} = 0,35 \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^{1,5} + 1. \quad (7)$$

Додатни угиб услед савијања је:

$$\frac{w_{b,add}}{w_b} = 6,72 \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right) \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^2 \cdot \left(\frac{l_o}{h} \right) \cdot \left(\frac{h_o}{h} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{h}{L} \right). \quad (8)$$

2.2. Додатни угиби услед чистог смицања

С обзиром да највећи део вертикалног смицања прима ребро челичног профила, његово слабљење доводи до појаве додатног угиба услед смицања ($w_{v,add}$). Смичућа деформација приказана је на слици 2.



Слика 2. Додатна деформација услед смицања [1]

Применом принципа виртуелних сила може се одредити угиб услед смицања по дужини правоугаоног отвора l_o , чији је почетак на растојању x_1 , а крај на растојању x_2 од ослонца:

$$w_v = \int_{x_2}^{x_1} k \frac{T\bar{T}}{GA} ds = k \cdot \frac{ql_o}{GA} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right). \quad (9)$$

Додатни угиб услед чистог смицања по дужини отвора l_o дат је изразом:

$$w_{v,add,o} = \frac{ql_o}{Ght_w} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \cdot \left(\frac{h_o}{h - h_o} \right). \quad (10)$$

Како је смичући угиб на средини носача ($w_{v,add}$) једнак половини угиба дуж отвора ($w_{v,add,o}$, слика 2) и како угиб спрегнутог носача приближно износи 70% угиба несспрегнутог носача [1], додатни смичући угиб на средини носача је:

$$w_{v,add} = 0,35 \cdot \frac{ql_o}{Ght_w} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) \cdot \left(\frac{h_o}{h - h_o} \right). \quad (11)$$

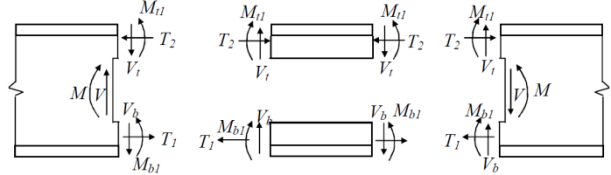
Коначан израз за угиб на средини носача услед чистог смицања има следећи облик:

$$\frac{w_{v,pure,add}}{w_b} = 28 \cdot \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \cdot \left(\frac{l_o}{h} \right) \cdot \left(\frac{h_o}{h - h_o} \right) \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^3. \quad (12)$$

2.3. Додатни угиб услед савијања као Вирендел носач

Око отвора у ребру челичног профила се јављају нормалне силе T_1 и T_2 , трансверзалне силе V_1 и V_b и momenti савијања M_{t1} и M_{b1} , који се називају и Вирендел momenti.

У горњем Т-пресеку се јавља сила притиска T_2 , трансверзална сила V_1 и момент савијања M_{t1} , а у доњем сила затезања T_1 , трансверзална сила V_b и момент савијања M_{b1} (слика 3).



Слика 3. Силе које делују око отвора [2]

Смичући угиб средине носача услед савијања као Вирендел носача износи:

$$w_{vier} = 0,35 \cdot \frac{V \cdot l_{eff}^3}{24EI_{Tee}}. \quad (13)$$

Момент инерције Т-пресека се приближно може одредити као:

$$I_{Tee} \approx \left(\frac{h - h_o}{2} \right)^3 \cdot \frac{t_w}{4}. \quad (14)$$

Уврштавањем израза (14) у (13) добија се израз за угиб по дужини отвора:

$$w_{vier} = 0,23 \cdot \frac{q \cdot l_{eff}^3 \cdot (L - 2x)}{E \cdot (h - h_o)^3 \cdot t_w}. \quad (15)$$

Додатни смичући угиб на средини носача услед савијања као Вирендел носач једнак је:

$$\frac{w_{vier,add}}{w_b} = 14 \cdot \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \cdot \left(\frac{l_{eff}}{h - h_o} \right)^3 \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^3. \quad (16)$$

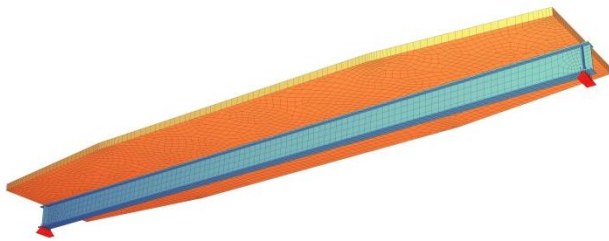
3. УТИЦАЈ СЛАБЉЕЊА РЕБРА НА УГИБЕ СПРЕГНУТОГ НОСАЧА

Теоријски добијени изрази проверени су кроз параметарску анализу спрегнутог носача система просте греде. Варирани су распон носача (L), величина отвора (дужина l_o и висина h_o), растојање отвора од ослонца (x) и укрућење (без и са хоризонталним укрућењем).

Резултати параметарске анализе добијени су коришћењем програмског пакета *Софистик* (SOFiSTiK), према упутству произвођача софтвера [3]. Коришћена је линеарна анализа, носач је моделиран површинским четвороугаоним коначним елементима величине 0,1 m. Усвојен је бетон класе чврстоће C25/30 и челик S355.

3.1. Носач са неукрућеним отвором ($L=10$ m)

Усвојен је челични носач IPE 400 и пуна армирано-бетонска плоча дебљине 120 mm (слика 4).



Слика 4. Модел носача распона $L=10\text{ m}$

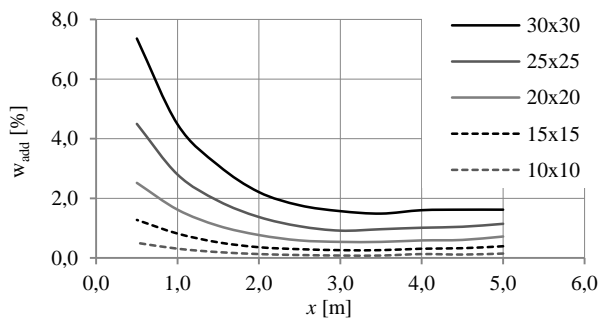
Анализирано је стално и променљиво оптерећење у тренутку оптерећивања конструкције ($t=t_o$) и добијене су следеће вредности:

- стално оптерећење (тежина челичног носача, АБ плоче и додатног сталног опт.) $g=13,49\text{ kN/m}$
- променљиво оптерећење (категирија Б – канцеларијске просторије) $q=9,00\text{ kN/m}$

За носач без отвора добијен је угиб $w=6,115\text{ mm}$.

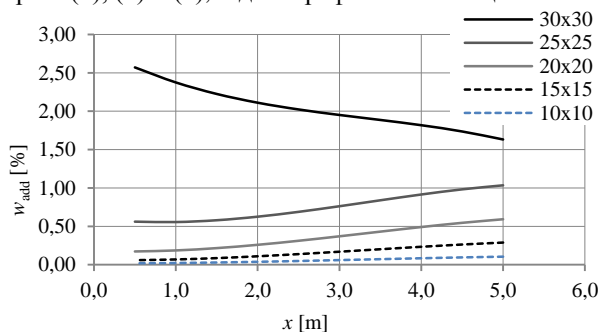
У ребру челичног профила моделирани су отвори димензија од $l_o/h_o=10/10\text{ cm}$ до $l_o/h_o=30/30\text{ cm}$ на десет положаја са кораком $0,5\text{ m}$ (од $x=0,5\text{ m}$ до $x=5,0\text{ m}$ од ослонца).

Вредности додатног угиба на средини носача у функцији положаја отвора приказане су на слици 5 за различите величине отвора.



Слика 5. График зависности додатног угиба од положаја неукрућеног отвора ($L=10\text{ m}$) – SOFiSTiK

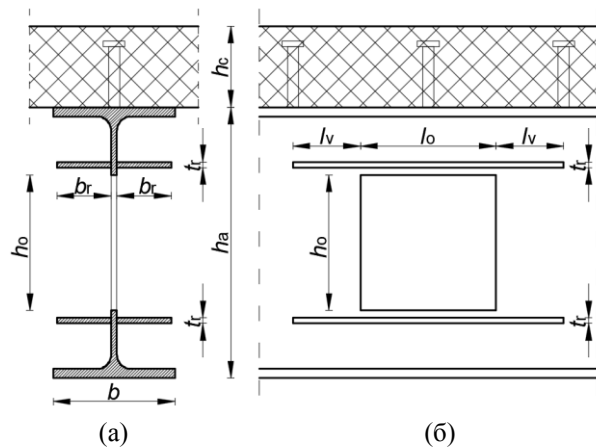
Повећања угиба одређена су и аналитички, сабирањем израза (1), (2) и (3), и дата графички на слици 6.



Слика 6. График зависности додатног угиба од положаја неукрућеног отвора ($L=10\text{ m}$) – аналитички

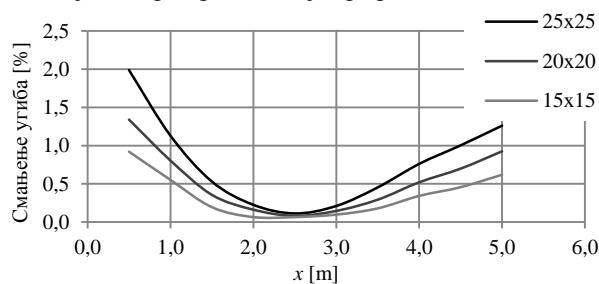
3.2. Носач са укрућеним отвором ($L=10\text{ m}$)

На модел носача из поглавља 3.1. додата су обострана хоризонтална укрућења изнад и испод отвора. Према препорукама из [4] усвојена је ширина укрућења $b_r=80\text{ mm}$, дебљина $t_r=8\text{ mm}$ и дужина једнака дужини отвора l_o увећаној за дужину $l_v=150\text{ mm}$ са обе стране отвора (слика 7).



Слика 7. Попречни пресек (а) и изглед (б) хоризонталног укрућења

Смањење угиба носача са укрућеним отвором у односу на носач са неукрућеним отвором у функцији положаја отвора приказано је графички на слици 8.



Слика 8. График зависности смањења угиба од положаја укрућеног отвора ($L=10\text{ m}$) – SOFiSTiK

3.3. Носач са неукрућеним отвором ($L=15\text{ m}$)

Усвојен је челични носач IPE 600 и пуна армирано-бетонска плоча дебљине 120 mm .

Анализом оптерећења добијене су вредности:

- стално ($g=18,32\text{ kN/m}$) и
- променљиво оптерећење ($q=12,00\text{ kN/m}$).

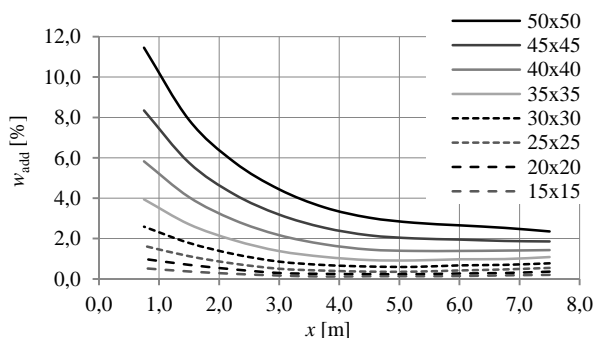
За носач без отвора линеарном анализом у софтверу добијен је угиб на средини носач $w=11,899\text{ mm}$.

У ребру челичног профила моделирани су отвори димензија од $l_o/h_o=15/15\text{ cm}$ до $l_o/h_o=50/50\text{ cm}$ на десет положаја са кораком $0,75\text{ m}$ (од $x=0,75\text{ m}$ до $x=7,5\text{ m}$ од ослонца). Модел носача са отвором је приказан на слици 9.

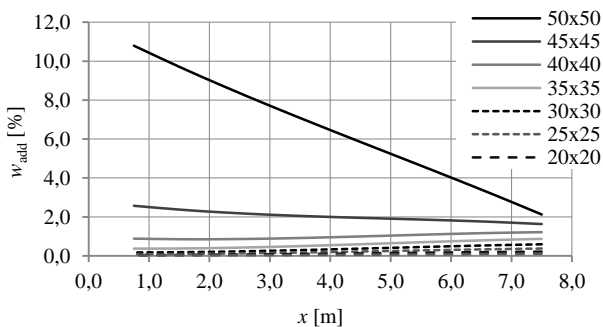


Слика 9. Модел носача са отвором ($L=15\text{ m}$)

Повећања угиба на средини носача у односу на носач без отвора приказана су на графицима 9 и 10.



Слика 9. График зависности додатног угиба од положаја неукрућеног отвора ($L=15\text{ m}$) – SOFiSTiK

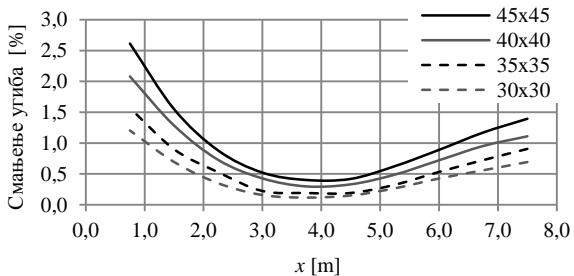


Слика 10. График зависности додатног угиба од положаја неукрућ. отвора ($L=15\text{ m}$) – аналитички

3.4. Носач са укрућеним отвором ($L=15\text{ m}$)

Усвојене су следеће димензије хирозонталних укрућења: ширина укрућења $b_f=80\text{ mm}$, дебљина укрућења $t_f=8\text{ mm}$ и дужина $l_v=150\text{ mm}$ (слика 6).

Смањење угиба у односу на носаче са неукрућеним отвором дато је графички на слици 11.



Слика 11. График зависности смањења угиба од положаја укрућеног отвора ($L=15\text{ m}$)

4. ЗАКЉУЧАК

Израдом отвора у ребру челичног профила спрегнутог носача се ефикасно решава проблем вођења инсталација јер за њихов пролазак није неопходна додатна висина која повећава укупне трошкове конструкције. Параметарском анализом је показано да величина и положај отвора могу знатно да утичу на угиб средине спрегнутог носача. Са повећањем димензија отвора повећава се и угиб спрегнутог носача. Највећа вредност додатног угиба јавља се код носача са отворима у близини ослонца, док се минималне вредности јављају када су отвори постављени у средњој трећини распона. Код мањих распона са отворима свих величина и већих распона са отворима мањим од 70% висине челичног профила додатни угиб има

минималну вредност на трећини распона од ослонца, а нешто већу на средини распона. Код носача већих распона са отворима већим од 70% висине челичног профила минимална вредност угиба јавља се када је отвор на средини распона.

С обзиром да величина отвора не може да се смањује, јер зависи од димензија инсталација које кроз њега пролазе, најпогодније је на смањење угиба утицати постављањем отвора у средњој трећини распона носача.

Угиби спрегнутих носача са отворима могу се смањити хоризонталним и вертикалним укрућењима. Обострана хоризонтална укрућења највише утичу на смањење угиба средине носача ако се отвори налазе у близини ослонца, нешто мање смањују угибе када су отвори на средини распона, док за отворе на четвртини распона од ослонца нису ефикасан начин за смањење угиба. Хоризонтална укрућења процентуално више смањују угиб носача који имају веће отворе у односу на носаче са мањим отворима.

Линеарном анализом у Софистику су у већини случајева добијена конзервативнија решења у односу на аналитичке изразе из поглавља 2. Највећи степен поклапања резултата је добијен за положаје отвора на средини распона носача. Померање отвора ка ослонцу смањује степен преклапања решења.

Највећи утицај на повећање угиба услед постављања отвора на средини носача има савијање, а за отворе у близини ослонца савијање као Вирендел носач. Са смањењем величине отвора испод половине висине челичног носача се утицај смицања и савијања као Вирендел носача изједначавају.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Additional Deflections due to Circular Openings in Composite Cellular Beams" CEN Background Document 2017
- [2] R. Narayanan, V. Kalyanaraman, A. R. Santhakumar, S. Seetharaman, S. R. Satish Kumar, S. Arul Jayachandran, R. Senthil, "Teaching Materials – Chapter 28: Steel Beams with Web Opening", Institute for Steel Development and Growth
- [3] "Tutorial – SSD/SOFiPLUS – A Quick Reference", SOFiSTIK AG, 2010.
- [4] R. M. Lawson, S. J. Hicks, "Design of Composite Beams with Web Openings", Ascot, The Steel Construction Institute, 2011.
- [5] М. Пржуљ, „Спрегнуте конструкције“, Београд, ИРО „Грађевинска књига“, 1989.

Кратка биографија:



Никола Вукић рођен је у Новом Саду 1994. године. Основне студије грађевинарства на Факултету техничких наука уписао је 2013, а дипломски рад одбранио 2017. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области грађевинарства – спрегнуте конструкције одбранио је 2020. године.

Контакт: nikolavukic.ns@gmail.com