

60

Professional paper | Стручни рад
DOI 10.7251/STP2215613V
ISSN 2566-4484



Radovan Vukomanović, University of Banja Luka, radovan.vukomanovic@aggf.unibl.org
Slobodan Popadić, INK Constructor, popadicslobodan1990@gmail.com
Snježana Milovanović, University of Banja Luka, snjezana.milovanovic@aggf.unibl.org

CRANE GIRDER DESIGN ACCORDING TO EUROCODE – NUMERICAL EXAMPLE OF A CRANE GIRDER IN A HYDROPOWER PLANT

Abstract

With the adoption of Eurocodes in the field of civil engineering in Bosnia and Herzegovina, analysis of structures becomes more complex compared to previous regulations. Consequently, the analysis of crane track girders becomes more detailed, with a higher degree of analysis controls during dimensioning. This paper presents the load analysis and design checks of crane girders for ultimate limit state and serviceability limit state, according to Eurocode, with the presentation of the most important parameters and design limitations, such as load classifications, dynamic coefficients, limitations for serviceability states. Furthermore, a numerical example of a crane track support for a bridge crane in the machine building of a 25t hydropower plant is given.

Keywords: crane girder, load analysis, ULS, SLS, Eurocode

ПРОРАЧУН НОСАЧА КРАНСКИХ СТАЗА ПРЕМА ЕВРОКОДУ – ПРИМЈЕР КРАНА У МАШИНСКОЈ ЗГРАДИ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ

Сажетак

Увођењем Еврокодова у области грађевинарства у Босни и Херцеговини, прорачуни конструкција постају сложенији у односу на досадашње прописе. Сходно томе и прорачун носача кранских стаза постаје детаљнији, са већим степеном прорачунских контрола приликом димензионисања. У овом раду приказана је анализа оптерећења и димензионисање кранских носача за гранична стања носивости и употребљивости према Еврокоду, са приказом најважнијих параметара и прорачунских ограничења, као што су класификације оптерећења, динамички коефицијенти, ограничења за стања употребљивости. Дат је нумерички примјер носача кранске стазе за носну дизалицу у машинској згради хидроелектране носивости 25t.

Кључне ријечи: носач кранских стаза, анализа оптерећења, ГСН, ГСУ, Еврокод

1. УВОД

Различити типови кранова имају широку примјену у индустријским објектима за транспорт терета у склопу технологије производње, или за транспорт дијелова механизма и машина приликом сервисирања и ремонта. Обзиром на величину терета као и начина транспорта постоји неколико различитих типова кранова. С аспекта прорачуна кранских носача грађевинским прописима су обухваћени кранови који се крећу по горњој фланши кранских носача, кранови који се крећу по доњој фланши кранских носача, монорејл дизалице, мосни кранови. Увођењем Еврокодова у области грађевинарства, као и за друге типове конструкција, прорачун кранова постаје детаљнији, са већим степеном прорачунских контрола приликом димензионисања у односу на претходно важеће прописе за челичне конструкције. Прорачун кранских носача обухваћен је Еврокодом 3 – Прорачун челичних конструкција – Дио 6: Носачи кранских стаза (ЕН 1993-6). Осим Еврокода 3, оптерећења од кранова дефинисана су у Еврокоду 1 – Дејства на конструкције – Дио 3: Дејства усљед кранова и машина (ЕН 1991-3). У овом раду приказана је анализа оптерећења и димензионисање кранских носача за гранична стања носивости и употребљивости према Еврокоду кроз примјер носача кранске стазе за мосну дизалицу у машинској згради хидроелектране носивости 25t, за потребе монтаже/демонтаже и ремонта турбинско-генераторског постројења.

2. АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА И ПРОРАЧУНСКЕ КОМБИНАЦИЈЕ ПРЕМА ЕВРОКОДУ

2.1. ОПТЕРЕЋЕЊА

Оптерећења крана можемо подијелити на сопствену тежину крана (Q_c) и тежину терета који се диже (Q_n), а према начину дјеловања могу бити статичка и динамичка оптерећења. Еврокод утицај кранова разматра као промјенљива и инцидентна дејства која подразумевају како вертикално оптерећење од сопствене тежине и терета тако и хоризонтална оптерећења усљед покретања крана, кочења и закошења кранског моста при кретању, те удар крана или мачке у одбојнике и удар терета приликом подизања у препреке. Динамички карактер дејства који је посљедица вибрација и дејства инерцијалних сила при кретању крана узима се као квази-статичко оптерећење увећањем силе са динамичким коефицијентом. [4]

$$F_{\phi,k} = \phi_i F_k \quad (1)$$

гдје је:

$F_{\phi,k}$ карактеристична вриједност оптерећења од крана,

F_k карактеристична вриједност статичког оптерећења,

ϕ_i динамички коефицијент.

Табела 1. Динамички коефицијент ϕ_i [1]

Динамички фактор	Утицаји који се разматрају	Примјена
ϕ_1	Побуда конструкције крана усљед подизања терета са тла	Сопствена тежина крана
ϕ_2	Динамички утицаји усљед подизања терета са тла до крана	Терет који се диже
ϕ_3	Динамички утицаји усљед наглог испуштања терета када се користе кљешта или магнет	Терет који се диже
ϕ_4	Динамички утицаји усљед кретања крана по шинама или кранској стази	Сопствена тежина крана и тежина терета који се диже
ϕ_5	Динамички утицаји изазвани погонским силама који се јављају при кретању или кочењу крана по шинама (хоризонталне попречне и подужне силе)	Погонска сила
ϕ_6	Динамички утицаји од пробног оптерећења	Пробно оптерећење
ϕ_7	Динамички утицаји при удару у одбојнике	Сила удара

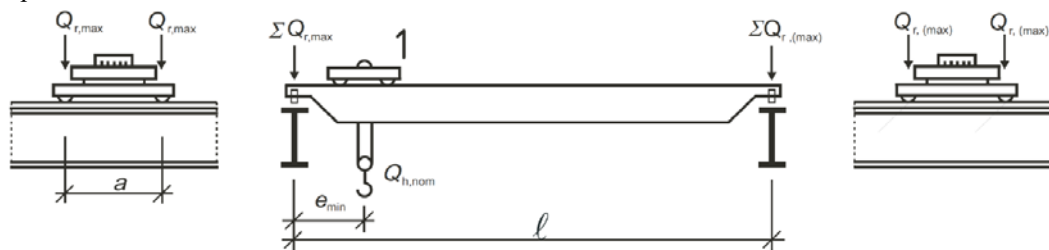
Истовремено дејство више оптерећења од крана узима се у обзир кроз групе оптерећења које су дате у Табели 2. Свака од наведених група сматра се карактеристичним оптерећењем и комбинује се са осталим врстама оптерећења на конструкцију.

Табела 2. Групе оптерећења и динамички коефицијенти [1]

Дејство		Групе оптерећења									
		Гранична стања носивости							Пробно опт.	Инцидентно опт.	
		1	2	3	4	5	6	7			
Сопствена тежина крана	Q_c	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
Тежина терета	Q_h	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	η^*	-	1	1
Убрзање и кочење крана	H_i, H_t	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
Закошење крана	H_s	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Убрзање и кочење „мачке“ или колица	H_{T3}	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Вјетар	F_w	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
Пробно оптерећење	Q_T	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
Сила удара у одбојник	H_B	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
Сила удара склопа за подизање	H_{TA}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

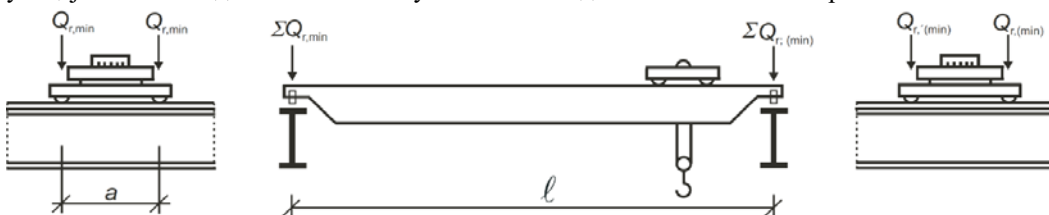
* η – дио терета који се диже и који остаје након уклањања корисног терета, а који није урачунат у сопствену тежину крана.

Приликом анализирања вертикалног оптерећења на кранске носаче, разматрају се различити положаји мачке (колица) на крану, као и различит положај крана на кранском носачу, како би се добили мјеродавни утицаји на носачу. Прорачуни се врше за комбинације са корисним теретом и без терета, узимајући у обзир и могуће ексцентрично дејство вертикалног оптерећења. Препорука је да се ексцентричност узме као 25% од ширине главе шине [1]. Прописима [1] су у поглављу 2.5.2.1. дефинисани мјеродавни положаји оптерећења како је приказано на Сликама 1. и 2.



Слика 1 Приказ положаја оптерећења од крана за одређивање максималног утицаја на носачу [1]

Максимална реакција на носач од вертикалног оптерећења $Q_{r,max}$ одређује се тако што се кран оптерећен максималним теретом $Q_{h,nom}$ постави у најближи могући положај посматраној кранској стази e_{min} . Овако одређен утицај $Q_{r,max}$ потребно је подужно на носачу крана посматрати као покретно оптерећење како би се добила анвелопа мјеродавних максималних утицаја за његово димензионисање у зависности од статичког система кранског носача.



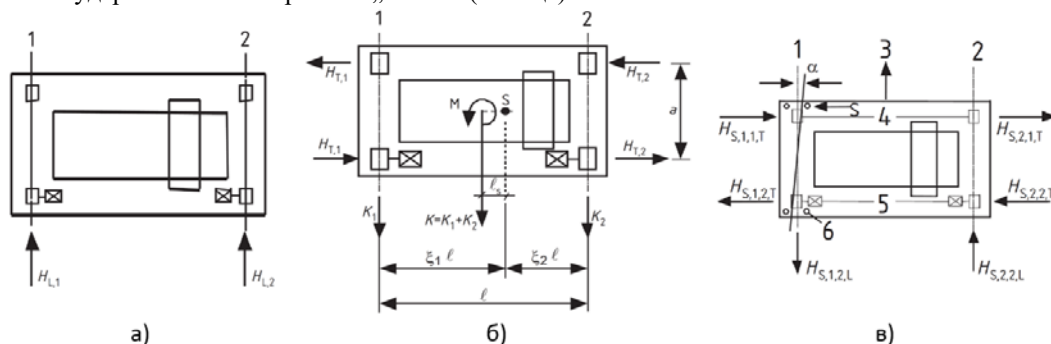
Слика 2. Приказ положаја оптерећења од крана за одређивање минималног утицаја на носачу [1]

Минимална реакција на носач од вертикалног оптерећења $Q_{r,\min}$ одређује се тако што се кран без терета постави у најудаљенији могући положај од посматране кранске стазе. Овако одређен утицај $Q_{r,\min}$ потребно је подужно на носачу крана такође посматрати као покретно оптерећење како би се добила анвелопа мјеродавних минималних утицаја за његово димензионисање.

Вриједности динамичких коефицијената за вертикална оптерећења ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$) дате су у [1] у табели 2.4. у зависности од карактеристика крана и терета, типа и класе уређаја за подизање терета, те толеранције шина по којима се кран креће.

Хоризонтална оптерећења која треба узети у обзир су:

- хоризонталне силе које настају због убрзавања и успоравања кретања кранског моста,
- хоризонталне силе које настају због убрзавања и успоравања кретања „мачке“ (колица) по кранском мосту,
- хоризонталне силе које настају због закошења при кретању кранског моста,
- ударне силе у бранике због кретања крана,
- ударне силе због кретања „мачке“ (колица).



Слика 3. Хоризонтална оптерећења од крана: а) подужне хоризонталне силе; б) попречне хоризонталне силе усљед убрзања и кочења; в) подужне и попречне силе усљед закошења крана [1]

Подужне хоризонталне силе се израчунавају из израза:

$$H_{L,i} = \varphi_5 K \frac{1}{nr} \quad (2)$$

гдје је:

K погонска сила,

φ_5 динамички коефицијент,

nr број носача кранске стазе (број шина).

Попречне силе усљед убрзања и кочења крана приказане на Слици 3.б) рачунају се према изразима (3-9):

$$H_{T,1} = \varphi_5 \xi_2 \frac{M}{a} \quad (3)$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \xi_1 \frac{M}{a} \quad (4)$$

$$\Sigma Q_r = \Sigma Q_{r,\max} + \Sigma Q_{r,(max)} \quad (5)$$

$$\xi_1 = \frac{\Sigma Q_{r,\max}}{\Sigma Q_r} \quad (6)$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 \quad (7)$$

$$M = K l_s \quad (8)$$

$$l_s = (\xi_1 - 0.5) l \quad (9)$$

Уколико погонска сила K није дефинисана од стране произвођача крана потребно је усвојити према [1], члан 2.7.3.

Вриједност динамичког коефицијента φ_5 такође дефинише произвођач крана, у супротном потребно га је усвојити из [1], члан 2.7.2. према табели 2.6.

Попречне и подужне силе које настају као посљедица закошења крана приказане на Слици 3.в) одређују се према изразима (10-13):

$$H_{S,1,j,L} = f \lambda_{S,1,j,L} \Sigma Q_r \quad (10)$$

$$H_{S,2,j,L} = f \lambda_{S,2,j,L} \Sigma Q_r \quad (11)$$

$$H_{S,1,j,T} = f \lambda_{S,1,j,T} \Sigma Q_r \quad (12)$$

$$H_{S,2,j,T} = f \lambda_{S,2,j,T} \Sigma Q_r \quad (13)$$

гдје је:

i редни број шине,

j одговарајући пар точкова,

f фактор који зависи од мјеродавног угла закошења α , $f = 0.3 (1 - \exp(-250 \alpha)) \leq 0.3$, α угао закошења дефинисан у [1], члан 2.7.4. Слика 2.8, $\lambda_{S,i,j,k}$ фактор силе.

Оптерећење које настаје приликом удара крана у одбојник може се одредити према изразу :

$$H_{B,1} = \varphi_7 v_1 \sqrt{m_c S_b} \quad (14)$$

гдје:

v_1 (m/s) представља 70% максималне брзине кретања крана,

m_c (kg) маса крана или терета који се диже,

S_b (N/m) еластична крутост одбојника,

φ_7 динамички коефицијент који је дефинисан у [1], члан 2.11. Табела 2.10.

2.2. ПРОРАЧУНСКЕ КОМБИНАЦИЈЕ

Димензионисање носача према Еврокоду подразумева прорачуне према граничним стањима носивости (ULS) и граничним стањима употребљивости (SLS). Контрола граничних стања носивости подразумева провјеру носивости карактеристичних попречних пресека кранског носача, провјеру локалних напрезања од притиска точка, контролу интеракције локалних и глобалних напрезања носача, провјеру стабилности носача која подразумева носивост носача на бочно торзионо извијање и носивост на избочавање ребра, као и контролу замора материјала. [5]

Приликом прорачуна претходно анализирана оптерећења од крана комбинују се са осталим оптерећењима на кранским стазама као што су температурни утицаји, ревизионе стазе и платформе, изузетна оптерећења, друга корисна и стална оптерећења која дјелују на носач. Ова оптерећења комбинују се према изразу (15) и (16) множењем са одговарајућим парцијалним коефицијентима за оптерећења дефинисаним у [3]. За сталне и пролазне прорачунске ситуације:

$$\Sigma \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (15)$$

За инцидентне прорачунске ситуације:

$$\Sigma G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ или } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (16)$$

Вриједности парцијалних коефицијената дате су у Табели 3.

Табела 3. Парцијални коефицијенти сигурности према Еврокоду [3]

Дејства	Симбол	Прорачунске ситуације	
		Сталне и пролазне	Инцидентне
Стална дејства од крана			
неповољна	$\gamma_{G,sup}$	1.35	1.00
повољна	$\gamma_{G,inf}$	1.00	1.00
Промјенљива дејства од крана			
неповољна	$\gamma_{Q,sup}$	1.35	1.00
повољна	$\gamma_{Q,inf}$	1.00 (0.00)	1.00 (0.00)
Остала корисна оптерећења			
неповољна	γ_Q	1.50	1.00
повољна	γ_Q	0.00	0.00
Инцидентна дејства			
Инцидентна дејства	γ_A		1.00

Вриједност коефицијената ψ_i узима се према [3], и износе $\psi_0=1.0$, $\psi_1=0.9$, док се ψ_2 израчунава као однос сталног и укупног оптерећења од крана.

Контрола челичних носача кранских стаза врши се према [2], а поред глобалних провјера подразумијева и претходно наведене локалне контроле напона и стабилности. Контрола локалних напона од притиска точка подразумијева контролу нормалних и смичућих напона, а зависи од ширине шине и фланше, као и начина на који је остварена веза између шине и носача. Приликом контроле избочавања ребра кранског носача потребно је извршити провјеру за дејство нормалних напона притиска код класе пресјека 4, смичућих напона, локалног притиска точка, а за случај дејства трансверзалне силе на притиснутој ножици и провјеру интеракције нормалних напона са смичућим односно са локалним притиском. Контрола замора кранских носача такође је дефинисана у [1], израчунава се према изразу (17) и зависи од динамичког коефицијента $\varphi_{fat} = \frac{1+\varphi_2}{2}$, максималног притиска точка крана $Q_{max,i}$ и фактора динамичког оптерећења λ_i који зависи од класе крана.

$$Q_e = \varphi_{fat} \lambda_i Q_{max,i} \quad (17)$$

Провјере за гранична стања употребљивости прописују:

- контролу вертикалних помјерања - угиба кранских носача,
- контролу хоризонталних помјерања - хоризонтални угиби, размицања шина, помјерања стубова (рамова) у нивоу шине крана,
- контролу напона – повратно еластично понашање носача за комбинације оптерећења за контролу употребљивости,
- „web breathing“ контрола ребра носача,
- контрола вибрација ножице кранског носача.

Према [3] за прорачун граничних стања употребљивости, изостављају се сви парцијални коефицијенти сигурности, и анализа се спроводи за комбинације утицаја дефинисане у Табели 4.

Табела 4. Мјеродавне комбинације утицаја за SLS прорачуне

Комбинација	Стална дејства		Корисна дејства	
	неповољна	повољна	неповољна	повољна
Карактеристична	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$Q_{k,1}$	$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$
Честа	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\Psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$
Квази-стална	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\Psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$

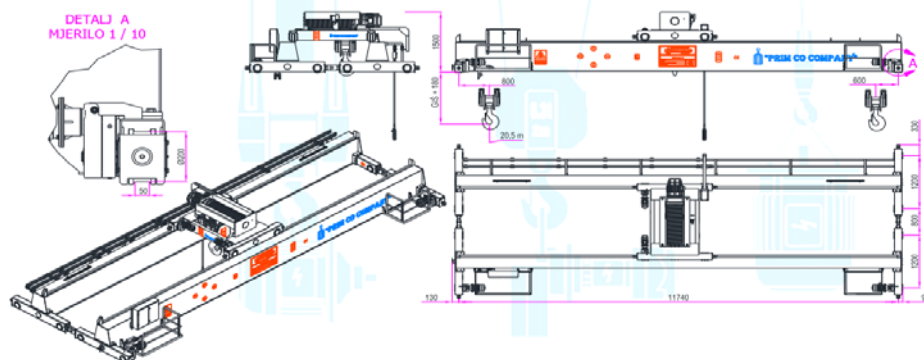
Граничне вриједности угиба дефинисане су у [2], Дио 6 – Табела 7.1, и одређују допуштене вертикалне угибе кранског носача, разлику вертикалних помјерања лијевог и десног кранског носача, хоризонтални угиб кранског носача, размицање носача кранских стаза, хоризонтално помјерање стуба (рама) у висини горње ивице шине крана као и разлику хоризонталних помјерања односно закошење сусједних рамова или стубова у раму у нивоу ГИШ.

Провјера напона подразумијева еластично понашање при употребном оптерећењу кроз контролу нормалних, смичућих и упоредних напона. Контрола вибрација и „web breathing“ обавезно се провјеравају за ребра велике висине и виткости, а прописима се ограничава виткост доње ножице кранског носача на $\lambda \leq 250$ како би се избјегао проблем вибрација.

3. НУМЕРИЧКИ ПРИМЈЕР НОСАЧА КРАНСКЕ СТАЗЕ

3.1. АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА И УСВАЈАЊЕ ДИМЕНЗИЈА КРАНског НОСАЧА

За потребе монтаже/демонтаже и ремонта машинске опреме у машинској згради хидроелектране инсталиран је кран носивости 25t, димензија и карактеристика према спецификацији произвођача на Сликама 4 и 5.

1. PREDMET : Dvogredna električna mosna dizalica DMD 25 t x 11,74 m


Слика 4. Изглед мосног крана носивости 25t (PRIM CO Company)

Opis kрана	DMD 25 t x 11,74 m		
Sopstvena težina kрана	$Q_{c1} =$	62	kN
Sopstvena težina kolica	$Q_{c2} =$	75.6	kN
Opterećenje dizalice	$Q_{h,nom} =$	250	kN
Raspon kрана	$L_c =$	11.74	m
Visina dizanja	$h =$	20.5	m
Brzina kretanja kрана	$v_{cn} =$	0÷25	m/min
Brzina kretanja kolica	$v_{cn} =$	0÷15	m/min
Brzina potizanja	$v_{cn} =$	0.6÷2.5	m/min
Dimenzija šine	$b/h =$	50/50	mm
Broj osa	$n_a =$	4	kom
Razmak osa 1	$a_1 =$	1.2	m
Razmak osa 2	$a_2 =$	0.8	m
Razmak osa 3	$a_3 =$	1.2	m
Dužina odbojnika nosača kрана	$a_L = a_R =$	0.33	m
Dužina odbojnika kрана	$b_L = b_R =$	0	m
Minimalni ekscentricitet kolica	$e_{min} =$	0.8	m
Veza šina - nosač	<i>kruta</i>		
Klasa podizanja	<i>HC1</i>		
S klasa (klasa zamora)	<i>S2</i>		

Слика 5. Основни технички подаци за мосни кран носивости 25t (PRIM CO Company)

Као што се види из проспекта произвођача у питању је двогредна мосна дизалица са колицима, распона 11.74 m, висине дизања 20.50 m. Осим геометријско машинских карактеристика крана, на основу намјене и предвиђене употребе крана одређени су и остали параметри неопходни за прорачун као што су класа дизања, класа замора, те изабран тип везе шине за крански носач. Према датим подацима одређени су динамички коефицијенти приказани у Табели 5.

 Табела 5. Вриједност динамичких коефицијената φ_i

Дејство	Ознака динамичког коефицијента	Вриједност коефицијента	Референца EN 1991-3; EN 1993-6
Тежина крана	φ_1	1.1	чл. 2.6 Табела 2.4
Терет	φ_2	1.06	чл. 2.6 Табела 2.4 и Табела 2.5
Нагло отпуштање терета	φ_3	1	чл. 2.6 Табела 2.4

Кретање крана	φ_4	1	чл. 2.6 Табела 2.4
Сила покретања	φ_5	1.5	чл. 2.7.2 Табела 2.6
Сила удара у пригушивач	φ_7	1.25	чл. 2.11.1 Табела 2.10

Прорачунске вриједности улазних оптерећења од крана разврстане су према прописима на хоризонталне и вертикалне, како је то претходно описано и износе:

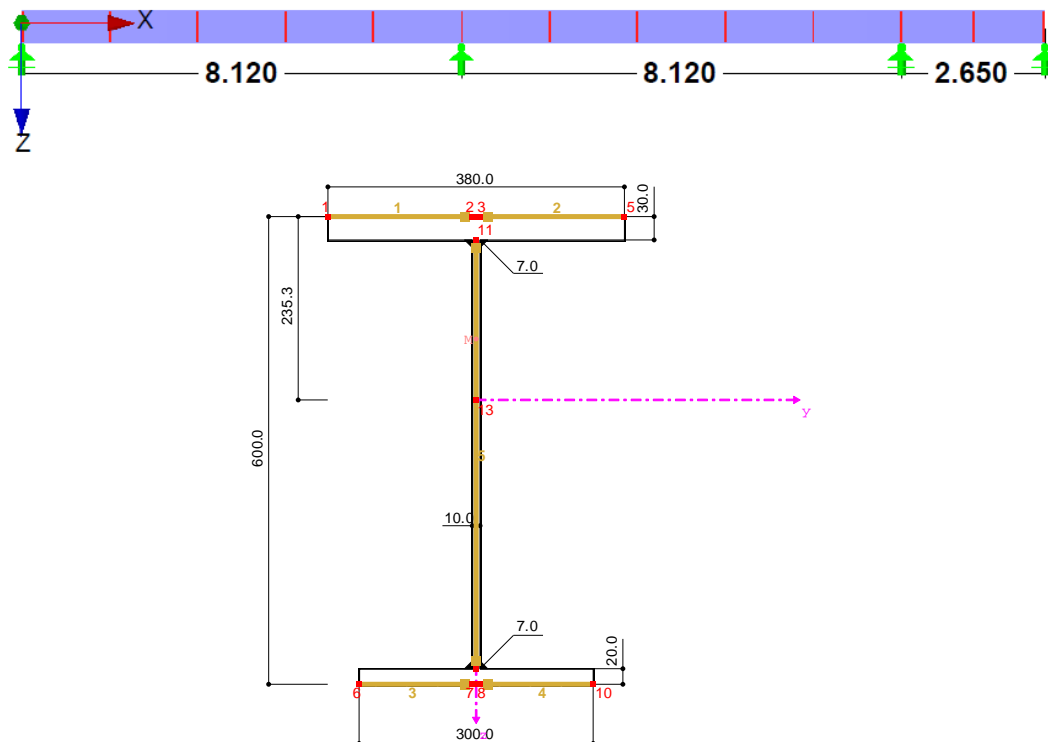
Вертикална оптерећења:

$$\begin{aligned} \sum Q_{c,min} &= \frac{1}{2} Q_{c1} + Q_{c2} \frac{e_{min}}{L_c} = 36.21 \text{ kN} \Rightarrow Q_{c,min} = \frac{\sum Q_{c,min}}{n} = 9.05 \text{ kN} \\ \sum Q_{c,max} &= \frac{1}{2} Q_{c1} + Q_{c2} \left(1 - \frac{e_{min}}{L_c}\right) = 102.29 \text{ kN} \Rightarrow Q_{c,max} = \frac{\sum Q_{c,max}}{n} = 25.57 \text{ kN} \\ \sum Q_{h,min} &= Q_{h,nom} \frac{e_{min}}{L_c} = 17.04 \text{ kN} \Rightarrow Q_{h,min} = \frac{\sum Q_{h,min}}{n} = 4.26 \text{ kN} \\ \sum Q_{h,max} &= Q_{h,nom} \left(1 - \frac{e_{min}}{L_c}\right) = 232.96 \text{ kN} \Rightarrow Q_{h,max} = \frac{\sum Q_{h,max}}{n} = 58.24 \text{ kN} \end{aligned}$$

Хоризонтална оптерећења:

$$\begin{aligned} H_{L1} = H_{L2} &= \frac{K}{n_r} = 1.81 \text{ kN} \quad H_{T1} = \xi_2 \frac{M}{a} = 0.66 \text{ kN} \quad H_{T2} = \xi_1 \frac{M}{a} = 4.16 \text{ kN} \\ H_{S,1,0,T} &= f \lambda_{S,1,0,T} \sum Q_r = 3.03 \text{ kN} \quad H_{S,2,0,T} = f \lambda_{S,2,0,T} \sum Q_r = 19.08 \text{ kN} \\ H_{S,1,1,T} &= f \lambda_{S,1,1,T} \sum Q_r = 1.55 \text{ kN} \quad H_{S,2,1,T} = f \lambda_{S,2,1,T} \sum Q_r = 9.73 \text{ kN} \\ H_{S,1,2,T} &= f \lambda_{S,1,2,T} \sum Q_r = 0.56 \text{ kN} \quad H_{S,2,2,T} = f \lambda_{S,2,2,T} \sum Q_r = 3.50 \text{ kN} \\ H_{S,1,3,T} &= f \lambda_{S,1,3,T} \sum Q_r = -0.93 \text{ kN} \quad H_{S,2,3,T} = f \lambda_{S,2,3,T} \sum Q_r = -5.84 \text{ kN} \end{aligned}$$

За срачуната оптерећења извршено је димензионасање носача кранске стазе према граничним стањима носивости и употребљивости. Крански носач је статичког система континуалне греде, распона $l_1=l_2=8.12 \text{ m}$ и $l_3=2.65 \text{ m}$. Висина усвојеног кранског носача је 600 mm , дебљина ребра је 10 mm , ширина горње ножице 380 mm , дебљина 30 mm , док је ширина доње ножице 300 mm , а дебљина 20 mm . Вертикална укрућења ребра су предвиђена како би се обезбиједила стабилност на избочавање и бочно торзионо извијање, постављају се приближно на сваких 160 cm .



Слика 6. Геометријске карактеристике носача кранске стазе (приказ из софтвера CRANEWAY за прорачун)

3.2. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ДИМЕНЗИОНИСАЊА

Водећи рачуна о обимности, у овом раду неће бити дат детаљан поступак прорачуна, већ само најзначајнији резултати анализе носивости и употребљивости кранског носача, али је увид у процедуру и детаље димензионисања могуће остварити контактирајући ауторе. Спроведени прорачун носача кранске стазе за гранично стање носивости састоји се од:

- класификације попречног пресека,
- доказа носивости ребра носача на трансверзалне силе,
- доказа носивости горње ножице на смицање,
- доказа носивости на комбиновани утицај смицања и торзије носача,
- доказа носивости на бочно савијање због закошења крана при кретању уз подужну силу,
- доказа носивости на бочно торзионо извијање,
- доказа носивости ребра услед концентрисане силе притиска точка,
- доказа носивости шавова на споју ребра са ножицама носача.

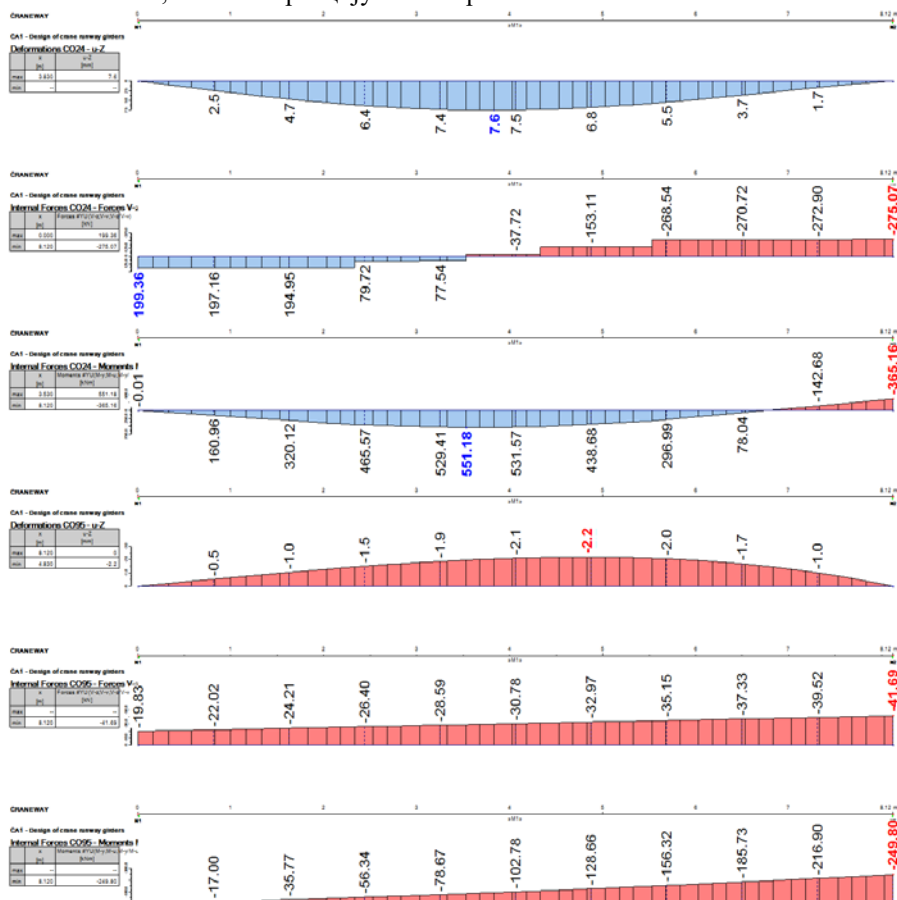
Доказ носивости носача кранске стазе за гранично стање употребљивости састоји се од:

- прорачуна угиба од вертикалног оптерећења,
- прорачуна угиба од хоризонталног оптерећења,

Остале контроле прописане Еврокодом као што су размицање носача кранских стаза и отклони услед помјерања стубова (рамова) у висини шине прорачунате су на другом, просторном моделу машинске зграде.

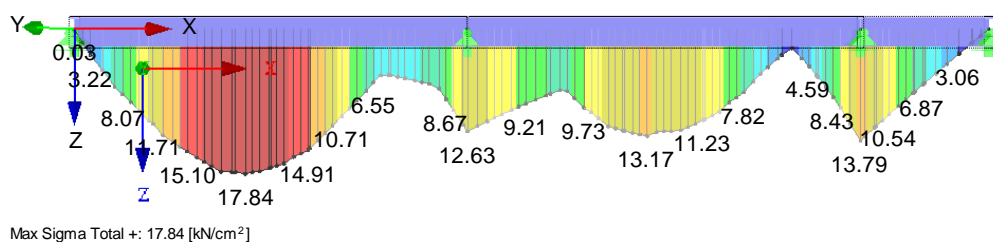
Контрола замора састоји се од:

- прорачуна еквивалентног оптерећења за класу замора C2,
- поступка прорачуна замора између ребра и горње ножице за нормалне и смичуће напоне, те за интеракцију тих напрезања.



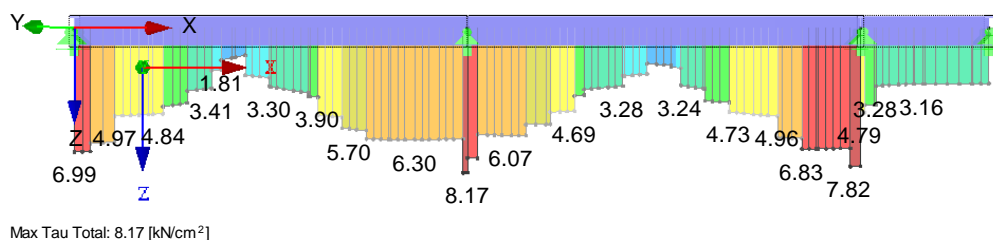
Слика 7. Пресјечне силе и угиби на носачу за мјеродавне комбинације оптерећења у мјеродавном распону носача

Формирањем одговарајућих прорачунских комбинација у складу са прописима, добијени су мјеродавни утицаји за димензионисање носача. На Слици 7. приказане су вриједности угиба, трансверзалних сила и момената, за доњу и горњу зону, респективно. Прорачунски угиби се крећу између вриједности од 7.6 mm и -2.2 mm, зависно од положаја оптерећења дуж континуалног носача крана. Ови угиби су у границама максимално допуштених помјерања према Еврокоду. Максимални моменат у доњој зони носача је 551.18 kNm, док је у горњој зони 365.16 kNm. Трансверзална сила у носачу у правцу Z осе кретала се у интервалу од 200.0 kN до -275.07 kN. Дејства у хоризонталном правцу која су углавном посљедица хоризонталних оптерећења краном су знатно мања, а изазивају хоризонталне угибе до максимално 4.6 mm. Суперпонирањем хоризонталних утицаја од торзије, смичуће силе и савијања добијене су и деформације ротације пресека у износу од 24.1 mrad, док су од вертикалних оптерећења -10.0 mrad. Приказани утицаји на носачу кранске стазе изазивају различита напрезања, која су у границама допуштених за изабрану геометрију носача, а што је приказано на сликама 8, 9 и 10 на подужном приказу носача, односно на слици 11. у приказу мјеродавног попречног пресека за напрезања и деформације.



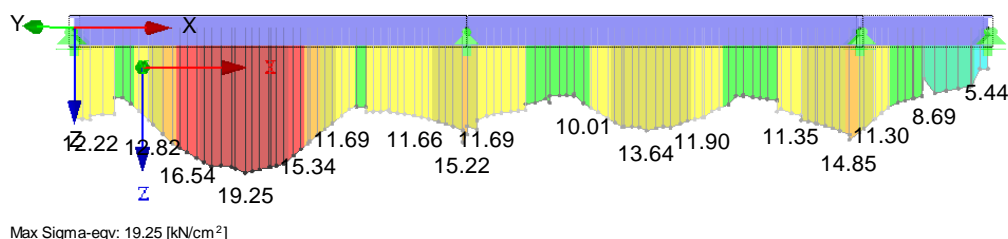
Слика 8. Приказ максималних нормалних напрезања дуж носача

На слици 8. приказани су нормални напони у носачу. Наведени утицаји представљају анвелопу напона за мјеродавне комбинације оптерећења према Еврокоду, статичка и покретна оптерећења, умножена одговарајућим факторима. Максималан нормални напон износи $\sigma_x = 17.84 \text{ kN/cm}^2$.



Слика 9. Приказ максималних смичућих напрезања дуж носача

На слици 9. приказани су максимални смичући напони у носачу за анвелопу утицаја. Максималан смичући напон износи $\tau_t = 8.17 \text{ kN/cm}^2$.



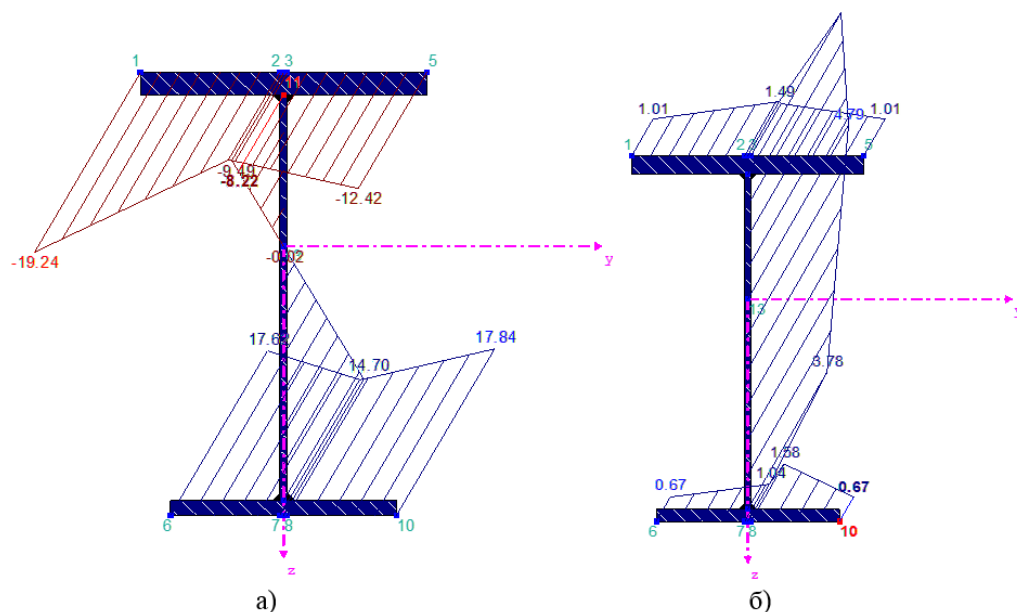
Слика 10. Приказ упоредног напона за носач кранске стазе

На слици 10. дат је упоредни напон са максималном вриједношћу од $\sigma_{eqv} = 19.25 \text{ kN/cm}^2$. Искоришћење носача на мјесту максималног напрезања износи приближно 86% у односу на допуштену носивост за дату класу пресека.

Осим напонских провјера, испоштована је и стабилност носача на локална избочавања, као и бочна торзиона извијања, те су усвојена укрућења ребра кранског носача. Такође извршена је и контрола вибрација у складу са прописима, те контрола замора материјала. Провјером на замор материјала добијени су коефицијенти $\eta_{\Delta\sigma_x} = 0.36 < 1$ и $\eta_{\Delta\sigma_{E2}} = 0.51 < 1$. Контролом стабилности на избочавање и извијање носача добијен је максимални коефицијент $\eta_{init} = 0.52 < 1$ за интеракцију нормалне силе, момената савијања и смичуће силе, што задовољава

прописане захтјеве. Појединачни коефицијенти отпорности пресјека за раздвојена напонска стања, те отпорност ребра и ножица носача су такође задовољавајућа и са мањим степеном искоришћења у односу на приказани коефицијент. Такође, извршена је и провјера носивости и замора шавова с обзиром на то да је носач формиран заваривањем, као и крута веза шине за горњу ножицу носача. Носивост шавова је задовољена за све прорачунске комбинације, са максималним коефицијентом искоришћења шавова од $\eta_{\text{weld}}=0.61 < 1$.

Важно је напоменути да се приликом прорачуна односно моделирања носача правилно усвоји и тип везе кранског носача са остатком конструкције. За конкретан носач усвојене су зглобне везе кранског носача које се формирају вијцима за кратки елемент на армирано бетонским стубовима. Осим тога, у циљу смањења утицаја од температуре и других паразитних дејстава потребно је правилно конструисати ове везе или уобзирити дата оптерећења у складу са прописима.



Слика 11. Приказ а) нормалног и б) смичућег напона у попречном пресеку кранског носача

На слици 11. дата су напрезања за карактеристични пресјек кранског носача, односно расподјела напона у ножицама и ребру попречног пресека. На слици а) приказан је максимални нормални напон који износи $\sigma_{\text{eqv}}= 19.25 \text{ kN/cm}^2$ за пресјек на дужини $x=3.53\text{m}$ од почетка носача и њему одговарајући смичући напони б). Максимални смичући напон је у пресеку на дужини $x=8.12 \text{ m}$ и износи $\tau_t= 8.17 \text{ kN/cm}^2$.

4. ЗАКЉУЧАК

Различити типови кранова имају широку примјену у индустријским објектима за транспорт свих врста терета. Нови европски прописи који су у процесу усвајања и у нашој земљи доносе бројне новине у димензионисању носача кранских стаза. Процедура и примјер предочен у овом раду, скупа са специфичним случајевима који због обимности рада нису обухваћени а прописани су према [1] и [2], показују сложеност и обимност димензионисања носача кранских стаза према Европским нормама у односу на до сада важећи правилник за прорачун ове врсте челичних конструкција. Детаљност овог прорачуна оставља мање простора за грешку и евентуалне пропусте пројектанта, али захтијева већи ниво експертизе и инжењерског знања. Олакшавајућу околност представља чињеница да већина комерцијалних софтвера предвиђена за димензионисање челичних конструкција у себи већ садржи уграђене прописе, са свим потребним коефицијентима и процедуром прорачуна, те се највећи задатак пројектанта своди на правилну израду анализе и задавања оптерећења, те израду модела носача са одговарајућим граничним условима, укрућењима и сл.

Према тренутно важећим прописима за прорачун челичних носача према теорији допуштених напона, поред разлика у прорачунском приступу за гранична стања носивости и употребљивости постоји доста дилема за пројектанте приликом усвајања појединих коефицијената уколико нису дефинисани од стране произвођача опреме, а који се усвајају на

основу искуства и субјектвне процјене, док Еврокод нормe дефинишу препоручене прорачунске вриједности у таквим случајевима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Eurocode 1991 – Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machinery, European committee for standardization-CEN, July 2006
- [2] Eurocode 1993 – Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures, European committee for standardization-CEN, April 2007
- [3] Eurocode 1990 – Basis of structural design, European committee for standardization-CEN, December 2005
- [4] З. Марковић, „Гранична стања челичних конструкција према Еврокоду“, Академска мисао, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2014
- [5] Д. Маркулак, „Прорачун кранских носача према Еурокод нормама“, Електронички часопис Грађевинског факултета Осигек, мај 2011