
**METODE PRORAČUNA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA I UPOREDNA
ANALIZA KRANSKE STAZE PREMA EVROKODU I SRPS-U**

1. UVOD – opšti principi

Metode proračuna pomoću kojih se može dokazati sigurnost i funkcionalnost konstrukcije dele se na determinističke i probabilističke, u zavisnosti od pristupa određivanja sigurnosti i od načina uvođenja koeficijenta sigurnosti. Većina inženjerskih proračuna u prošlosti zasnivala se na determinističkom pristupu. Opterećenja i karakteristike materijala smatrani su za determinisane (određene) vrednosti i obično su bili propisani Pravilnikom. Koeficijent sigurnosti (v), kao treći osnovni element proračuna, takođe je determinisana veličina. Na osnovu koeficijenta sigurnosti propisuju se dopušteni naponi koji ne smeju da budu premašeni u elementima konstrukcije ni u jednoj fazi njenog životnog veka. Imajući u vidu da se ova deterministička metoda proračuna zasniva na dopuštenim naponima, najčešće se u literaturi naziva *metoda ili teorija dopuštenih napona* i na njoj se zasnivaju proračuni čeličnih konstrukcija prema SRPS-U.

Sa razvojem teorije verovatnoće (probabilističke teorije) došlo se do saznanja da parametric koji se koriste pri proračunu imaju stohastički karakter, pa se razvio nov način proračuna koji je u svom pristupu probabilistički. Naime, parametri koji utiču na sigurnost konstrukcije uvode se u proračun kao slučajne promenljive veličine i u obzir se uzima verovatnoća njihovih pojava, a koeficijenti sigurnosti se vezuju i za opterećenje i za osobine materijala. Prema ovom konceptu ne postoji apsolutna sigurnost konstrukcije, već je moguća i takva slučajna kombinacija pri kojoj dolazi do rušenja, ali sa propisanom, dovoljno malom verovatnoćom pojave. Metoda proračuna koja je nastala kao rezultat ovakvog koncepta naziva se *metoda graničnih stanja* i zasniva se na poluprobabilistici, jer sadrži niz pojednostavljenja u odnosu na čistu probabilistiku teoriju, i ona je osnov za proračun čeličnih konstrukcija prema EVROKODU.

2. ANALIZA OPTEREĆENJA – razlike prema SRPS-U i EC3

Kako su promenljiva opterećenja uglavnom nezavisna i promenljiva kroz vreme (sneg, vetar, seizmika, temperaturni uticaji...), moguće je njihovo istovremeno dejstvo. **Metoda dopuštenih napona** ne dopušta nikakvu redukciju ovih opterećenja pri istovremenom delovanju, kojom bi se na izvestan način uzela u obzir smanjena verovatnoća istovremenog delovanja više različitih promenljivih opterećenja. Dakle, pri kombinovanju različitih opterećenja sva opterećenja se uzimaju sa punim iznosom, ali se za različite kombinacije propisuje različit koeficijent

sigurnosti. Zakonska tehnička regulativa definiše tri slučaja opterećenja i njima odgovarajuće koeficijente sigurnosti.

Prema **Metodi graničnih stanja**, za određivanje uticaja promenljivih dejstava na konstrukciju, s obzirom na njihovu stohastičku prirodu i promenljivost u prostoru i vremenu, nije dovoljna samo jedna karakteristična vrednost, već se, da bi se preciznije obuhvatila verovatnoća njihove pojave, trajanja i istovremenog delovanja, uvode i takozvane *reprezentativne vrednosti promenljivih dejstava*.

Pored karakteristične vrednosti (Q_k), koja je glavna reprezentativna vrednost, reprezentativne Ψ vrednosti promenljivih dejstava su i:

- vrednost za kombinacije $\Psi_0 * Q_k$
- česta (učestala) vrednost $\Psi_1 * Q_k$
- kvazistalna vrednost $\Psi_2 * Q_k$

Koeficijenti Ψ_0 , Ψ_1 i Ψ_2 su definisani u Evrokodu 1, na osnovu teorije verovatnoće, a u skladu sa značenjem odgovarajuće reprezentativne vrednosti. Njihove vrednosti su uvek manje ili jednake od jedinice.

a. Stalno opterećenje

Ovo opterećenje obuhvata sopstvene težine konstruktiv- nih i nekonstruktivnih elemenata. U nekonstruktivne elemente se ubrajaju obloge, zatim elektro i mašinske instalacije kao i sva druga oprema koja se koristi u procesu proizvodnje a stalnog je karaktera.

b. Povremeno opterećenje

Opterećenje od snega definisano je Evrokodom EN 1991-1-3. Osnovni parametar za definisanje intenziteta ovog dejstva je opterećenje od snega na tlo. Ovaj intenzitet se očitava sa karti u zavisnosti od lokacije objekta. Pored ove vrednosti na intenzitet opterećenja od snega utiču još i koeficijent oblika μ_i koji je funkcija oblika krova, koeficijent izloženosti C_e i toplotni koeficijent C_t . Konačno intenzitet opterećenja od snega dobija se prema izrazu (1):

$$s = \mu_i * C_e * C_t * S_k \quad (1)$$

Opterećenje od vetra definisano je Evrokodom EN 1991-1-4. Deluje pritiskujuće ili sišuće na zidne i krovne površine. Osnovni parametar za definisanje dejstva vetra je osnovna fundamentalna brzina vetra koja se takođe u zavisnosti od lokacije objekta očitava sa karti, $V_{b,0} = 21m$. Na osnovu ove brzine računa se udarni pritisak vetra koji se množi sa koeficijentima pritiska na spoljašnje ili unutrašnje površine i na taj način dobija konačno opterećenje koje se nanosi na objekat. Korigovanjem ove brzine sa direkcionim C_{dir} i sezonskim koeficijentom C_{season} dobija se osnovna brzina vetra, a korigovanjem osnovne brzine vetra koeficijentom hrapavosti $C_{r(z)}$ i koeficijentom topografije $C_{o(z)}$ dobija se srednja brzina vetra :

$$V_b = V_{b,0} * C_{dir} * C_{season} \quad (2)$$

$$V_{m(z)} = V_b * C_{r(z)} * C_{o(z)} \quad (3)$$

U formuli za računanje udarnog pritiska vetra prema izrazu (4) figurišu koeficijent turbulencije $I_{v(z)}$, gustina vazduha ρ i srednja brzina vetra $V_{m(z)}$. –

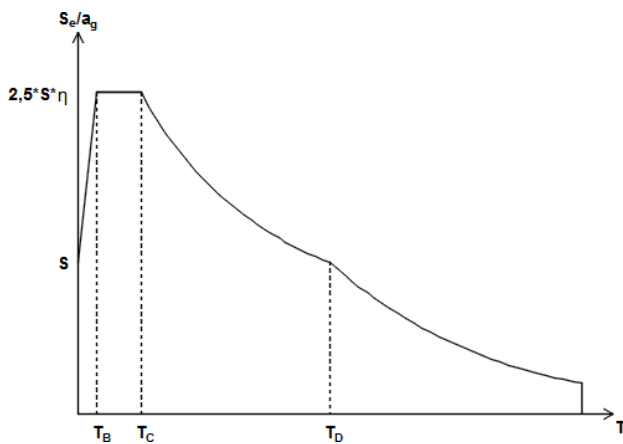
Na kraju, intenzitet pritiska vetra na spoljašnje površine dobija se prema izrazu (5) na osnovu koeficijenta pritiska koji zavisi od karakteristika površine na koju vetar deluje.

$$w_e = q_{p(z)} * C_{pe} \quad (5)$$

c. Seizmičko opterećenje

Seizmičko opterećenje definisano je Evrokodom EN 1998 i podrazumeva najpre proračun modalne analize konstrukcije koja nam daje uvid u dinamičke karakteristike same konstrukcije. Ti podaci, tačnije periodi oscilovanja, osnova su za dalji proračun seizmičkog opterećenja. Lokacija objekta definiše maksimalno referentno ubrzanje tla a_{gR} , koje je još jedan od osnovnih parametara za dalji proračun. Bitni parametri su još karakteristike tla, za ovaj

objekat izabrano tlo kategorije B, klasa duktilnosti DCM i klasa značaja objekta, ovde izabrana II. Izabrana je multimodalna spektralna analiza za proračun seizmičkih sila. Zemljotresno kretanje neke tačke na površini tla opisuje se elastičnim spektrom odgovora prikazanim na slici 1.



Slika 1. Elastični spektar odgovora

Redukovanjem elastičnog spektra odgovora faktorom ponašanja dobija se projektni spektar odgovora $S_d(T_k)$. Ukupna horizontalna seizmička sila za k-ti ton dobija se prema izrazu (6) gde je m_k efektivna modalna masa za k-ti ton oscilovanja.

$$F_{bk} = S_d(T_k) * m_k \quad (6)$$

Svatom tonu oscilovanja odgovara određena bazna sila a samim tim i uticaji od seizmičkog dejstva za taj ton. Maksimalna vrednost nekog uticaja od seizmičkog dejstva određena je primenom CQC metode (kompletna kvadratna kombinacija) prema izrazu (7).

$$E_E = \sqrt{\sum_n \sum_m E_{E,n} * \rho_{nm} * E_{E,m}} \quad (7)$$

Za objekte mogu se računati seizmičke sile za globalni x i y pravac. Ove dve komponente seizmičkog dejstva smatra se da deluju istovremeno. Maksimalna vrednost nekoguticaja u konstrukciji može se konzervativno uzeti kao srednja kvadratna vrednost (SRSS) prema izrazu (8).

$$E_E = \sqrt{E_{Ex}^2 + E_{Ey}^2} \quad (8)$$

d. Opterećenje od kranske staze

Mosna dizalica je raspona 25,5 m sistema proste grede oslonjena na kranske staze koje se protežu celom dužinom hale. Nosivost kрана je 20 t. Tabelom 2 date su karakteristike kрана koji opslužuje halu.

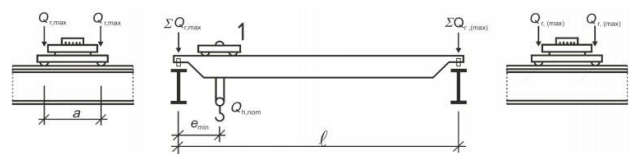
Tabela 2. Karakteristike kрана

Dvogredna mosna dizalica sa jednom kukom	
Nosivost	20 t = 200 kN
Raspon	25,5 m
Sopstvena težina kрана	20 t = 200 kN
Težina mačke	10 kN
Brzina dizanja tereta	4 m/min
Razmak točkova	4,0 m
Klasa dizanja	HC4
Klasa zamora	S6

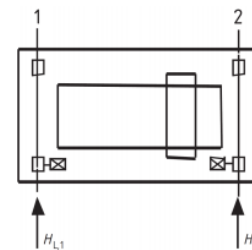
Opterećenje od kрана definisano je Evrokodom 1991-3.

Podrazumeva analizu opterećenja koja deluju u vertikalnom, podužnom i poprečnom pravcu. Klasifikuju se kao promenljiva i incidentna dejstva. Na slici 2 prikazan je raspored vertikalnog opterećenja od kрана za dobijanje maksimalnih uticaja na kranskoj stazi. Na slici 3 prikazane su podužne horizontalne sile usled ubrzanja i kočenja kрана a na slici 4 poprečne horizontalne sile usled istog dejstva.

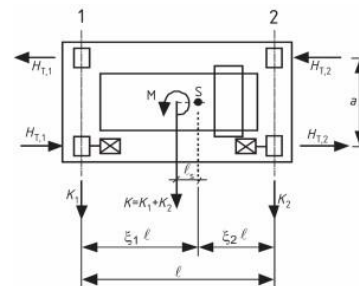
Kako je opterećenje od kрана izrazito dinamičkog karaktera u proračun se uvode dinamički koeficijenti kojima se uvećavaju dejstva u zavisnosti od vrste samog opterećenja. Ukupno ima sedam različitih dinamičkih koeficijenata koji se koriste pri proračunu. Evrokod propisuje sedam grupa opterećenja od kojih se sve moraju proveriti a one merodave koristiti za proračun.



Slika 2. Raspored opterećenja za maksimalne uticaje



Slika 3. Podužne horizontalne sile



Slika 4. Poprečne horizontalne sile

4.2. Kombinovanje opterećenja

Prilikom projektovanja razmatraju se najnepovoljnije kombinacije opterećenja koje mogu istovremeno opterećivati konstrukciju. U tim kombinacijama razlikovaćemo dejstva koja u posmatranim preseccima imaju povoljan efekat (deluju povoljno), odnosno ne formiraju merodavnu kombinaciju opterećenja (izostaju iz kombinacije) ili se obračunavaju sa svojim minimumom (stalna dejstva). Prilikom kombinovanja, dejstva se, za proračun prema graničnom stanju loma, uvećavaju parcijalnim koeficijentima sigurnosti, što omogućava rezervu nosivosti elemenata i konstrukcije. To znači da su proračunska dejstva veća od stvarnih inteziteta dejstava, što upravo daje pomenutu rezervu nosivosti odnosno stepen sigurnosti. Za svaki kritičan slučaj opterećenja, proračunske vrednosti uticaja od dejstava, moraju da budu

određene kombinovanjem vrednosti dejstava za koja se smatra da mogu da se pojave istovremeno. Pravilo za kombinovanje za stalne i prolazne proračunske situacije prikazano je izrazom (13), a pravilo kombinovanja za seizmičke proračunske situacije izrazom (14).

4.3. Proračun konstruktivnih elemenata

Ovom proračunu prethodi kombinovanje opterećenja. Ove kombinacije su korišćene za proveru graničnog stanja nosivosti. Za granično stanje upotrebljivosti korišćene su karakteristične kombinacije opterećenja.

Pri proračunu elemenata konstrukcije, u zavisnosti od uticaja koji se javljaju na njima, proveravano je sledeće: kontrola napona, računski otpornost na pritisak, računski otpornost na zatezanje, računski otpornost na savijanje, proračunska nosivost na smicanje, proračunska nosivost na savijanje i aksijalnu silu, proračunska nosivost na savijanje i smicanje, proračunska nosivost na savijanje, smicanje i aksijalnu nosivost na fleksiono izvijanje, nosivost na bočno-torzi izvijanje. Proveravani su i vertikalni i horizontalni ugibi u zavisnosti od položaja konstruktivnog elementa u konstrukciji. U okviru proračuna detaljno je obrađena kranska staza prema Evrokodu i prema domaćim SRPS propisima što je istraživački deo rada.

Pored gore pomenutih kontrola za kransku stazu proveravana je i nosivost na dejstvo smicanja i torzije. Torzija na kranskoj stazi nastaje usled slučajnog ekscentriciteta koji pravi točak krana na šini po kojoj se kreće i usled horizontalnih bočnih sila. Proveravano je i ulubljenje (crippling) što predstavlja izbočavanje i plastifikaciju rebra neposredno ispod nožice usled koncentrisane sile.

Analiza opterećenja prema SRPS obuhvatila je vertikalne sile od točkova krana, podužne sile od ubrzanja i kočenja i poprečne sile od bočnih udara. Intenzitet vertikalnih sila izračunat je na osnovu sopstvene težine krana i nosivosti krana za najnepovoljniji položaj opterećenja. Sile kočenja prema SRPS-u iznose 1/7 vertikalnog opterećenja točka. Intenzitet poprečnih sila od bočnih udara uzima se kao 1/10 vertikalnog opterećenja točka.

5. ZAKLJUČAK

U delu zaključka pomenute su osnovne činjenice proistekle iz uporedne analize proračuna kranske staze prema Evrokodu i SRPS standardu, što je i istraživački deo ovog projekta. Uvođenje Evrokod propisa ima za osnovni cilj racionalizaciju poprečnih preseka dostižući granična stanja nosivosti, nasuprot ranijem pristupu koji se temelji na metodi dopuštenih napona gde su elementi korišćeni u linearnom radu dostižući maksimalno granicu razvlačenja. Očekivano bi zbog svega bilo da je za jedan isti poprečni presek veća proračunska iskorišćenost koristeći SRPS standard. Međutim kako se u Evrokodu za opterećenja koriste parcijalni koeficijenti sigurnosti tako su ona znatno veća u odnosu na opterećenja kranske staze prema SRPS-u što uzrokuje veću procentualnu iskorišćenost preseka pri kontroli napona i stabilnosti prema Evrokodu. Provera ugiba je pokazala obrnuto. Uzrok toga je jedinični parcijalni koeficijent za opterećenje pri zadovoljenju graničnog stanja upotrebljivosti.

6. LITERATURA

- [1] EN 1991-1-1 Dejstva na konstrukcije
- [2] EN 1991-1-3 Dejstva na konstrukcije
- [3] EN 1991-1-4 Dejstva na konstrukcije
- [4] EN 1991-3 Actions on structures
- [5] EN 1992-1-1 Proračun betonskih konstrukcija
- [6] EN 1993-1-1 Proračun čeličnih konstrukcija
- [7] EN 1993-6 Design of steel structures
- [9] EN 1998-1 Proračun seizmički otpornih konstrukcija
- [10] Granična stanja čeličnih konstrukcija prema Evrokodu, Zlatko Marković
- [11] Metalne konstrukcije, Osnove proračuna i konstruisanja, Dr Dragan Buđevac, Mr Zlatko Marković, Mr Dragana Bogavac, Mr Drgoslav Tošić
- [12] Metalne konstrukcije u zgradarstvu, Dr Dragan Buđevac
- [13] Branko Ilić – Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

