

Zlatko Marković

**GRANIČNA STANJA ČELIČNIH
KONSTRUKCIJA PREMA
EVROKODU**

DRUGO IZDANJE

Beograd, 2019

Dr Zlatko Marković, redovni profesor
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

GRANIČNA STANJA ČELIČNIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODU

Drugo izdanje

Recenzenti:

Dr Dragan Buđevac, redovni profesor
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Ph.D Milan Veljković, full professor
Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering,
Luleå University of Technology, Sweden

Odobreno za štampu odlukom Nastavno naučnog veća Građevinskog fakulteta
Univerziteta u Beogradu, br. 22/134-2 od 29. novembra 2013. godine

Izdavači:

Akadska misao, Beograd
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Za izdavače:

Marko Vujadinović

Tehnički urednik:

Dušan Živković

Štampa:

Akadska misao, Beograd

Tiraž 300 primeraka

ISBN 978-86-7466-771-2

Sadržaj

Predgovor	IX
Poglavlje 1: Osnove proračuna	1
1.1 Razvoj metoda proračuna	1
1.2 Pouzdanost konstrukcija	3
1.3 Metode pouzdanosti	5
1.4 Metoda proračunskih vrednosti - metoda parcijalnih koeficijenata	6
1.5 Filozofija proračuna prema Evrokodu	16
1.5.1 Proračunske vrednosti uticaja usled dejstava	18
1.5.1.1 Kombinacije za granična stanja nosivosti	21
1.5.1.2 Kombinacije za granična stanja upotrebljivosti	25
1.6 Klase izvođenja čeličnih konstrukcija	26
Poglavlje 2: Dejstva na konstrukcije	29
2.1 Uvod	29
2.2 Sopstvena težina konstrukcije i stalna opterećenja	30
2.3 Korisna opterećenja u zgradarstvu	33
2.3.1 Vertikalna opterećenja	33
2.3.2 Horizontalna opterećenja	39
2.4 Dejstva snega	40
2.4.1 Dispozicije opterećenja od snega na krovovima	41
2.5 Dejstva vetra	46
2.5.1 Brzina vetra	46
2.5.2 Pritisak vetra	51
2.5.3 Koeficijenti spoljašnjeg i unutrašnjeg pritiska za zgrade	53
2.5.4 Opterećenje (sile) usled dejstva vetra	59
2.5.5 Koeficijent konstrukcije $c_s c_d$	60
2.6 Dejstva usled temperaturnih promena	65
2.7 Seizmička dejstva	69
2.7.1 Uvod	69
2.7.2 Filozofija Evrokoda za projektovanje u seizmički aktivnim područjima	72
2.7.3 Proračunsko ubrzanje tla	74
2.7.4 Horizontalni elastični spektar odgovora	75
2.7.5 Proračunski spektar za elastičnu analizu	77
2.7.6 Alternativni prikazi seizmičkih dejstava	79
2.7.7 Vertikalni elastični spektar odgovora	79
2.7.8 Projektovanje zgrada u seizmički aktivnim područjima	80
2.7.8.1 Kriterijumi konstrukcijske regularnosti	81

2.7.8.2	Koeficijenti kombinacije za promenljiva dejstva	84
2.7.8.3	Izbor metode analize konstrukcije.....	85
2.7.8.4	Metoda ekvivalentnih bočnih sila	86
2.7.8.5	Multimodalna spektralna analiza	87
2.7.8.6	Nelinearna dinamička analiza vremenskog odgovora - time-history analiza.....	91
2.7.8.7	Granična stanja upotrebljivosti	92
2.7.9	Posebna pravila za seizmičku analizu čeličnih konstrukcija u zgradarstvu	93
2.7.9.1	Kriterijumi za projektovanje disipativnih konstrukcija.....	97
2.7.9.1.1	Kriterijumi za projektovanje okvirnih nosača	98
2.7.9.1.2	Kriterijumi za projektovanje nosećih sistema sa centričnim spregovima.....	101
Poglavlje 3:	Materijali	105
3.1	Označavanje čelika.....	105
3.2	Konstrukcioni čelici.....	110
3.3	Ostali čelici koji se primenjuju u građevinskim konstrukcijama.....	118
3.3.1	Ugljenični čelici.....	118
3.3.2	Savremeni čelični materijali – „Histar“ čelici.....	119
3.4	Proračunski zahtevi za osnovni materijal	121
3.5	Izbor osnovnog materijala	124
3.5.1	Izbor čelika u pogledu žilavosti	125
3.5.2	Izbor materijala u pogledu svojstava po debljini	129
Poglavlje 4:	Analiza konstrukcija i klasifikacija preseka	133
4.1	Modeliranje čeličnih konstrukcija za globalnu analizu	133
4.1.1	Metode globalne analize.....	133
4.1.2	Modeliranje veza	136
4.1.3	Imperfekcije	139
4.1.4	Uticaji deformisane geometrije konstrukcije	143
	Primer 4.1 Izbor metode globalne analize za okvirni nosač u zgradarstvu.....	145
4.1.5	Metode proračuna okvirnih sistema	146
	Primer 4.2 Proračun uticaja usled deformisane geometrije okvirnog nosača.....	148
4.2	Klasifikacija poprečnih preseka	149
	Primer 4.3 Određivanje klase poprečnog preseka za vrućevaljani HEA profil	156
	Primer 4.4 Određivanje klase poprečnog preseka za zavareni I presek.....	156
	Primer 4.5 Određivanje klase poprečnog preseka za zavareni sandučasti presek.....	158
4.3	Plastična globalna analiza.....	160
	Primer 4.6 Kontinualni nosač - različite metode globalne analize.....	162
Poglavlje 5:	Nosivost poprečnih preseka.....	165
5.1	Uvod	165

5.2 Efektivan poprečni presek	165
5.3 Zatezanje	170
Primer 5.1 Nosivost poprečnog preseka UPN profila na zatezanje	174
Primer 5.2 Nosivost L profila sa zavrtnjevima na jednom kraku na zatezanje	176
5.4 Pritisak	177
Primer 5.3 Nosivost poprečnog preseka HEA profila na pritisak (klasa 4)	177
Primer 5.4 Nosivost zavarenog I preseka na pritisak (klasa 4).....	179
Primer 5.5 Nosivost monosimetričnog zavarenog preseka na pritisak (klasa 4)	180
5.5 Savijanje.....	183
Primer 5.6 Dimenzionisanje vrućevaljanih profila za dejstvo momenta savijanja	189
Primer 5.7 Plastičan moment nosivosti monosimetričnog zavarenog I preseka.....	190
Primer 5.8 Plastičan moment nosivosti simetričnog I preseka sa nožicama klase 1 ili 2 i rebrom klase 3	191
Primer 5.9 Moment nosivosti monosimetričnog zavarenog I preseka klase 3 - granica razvlačenja u zategnutoj zoni	192
Primer 5.10 Moment nosivosti zavarenog I preseka klase 4.....	194
Primer 5.11 Moment nosivosti oslabljenog poprečnog preseka.....	197
5.6 Smicanje.....	199
Primer 5.12 Nosivost poprečnog preseka vrućevaljanog I profila na smicanje....	203
5.7 Torzija	203
5.7.1 Uvod.....	203
5.7.2 Uniformna torzija.....	204
5.7.3 Neuniformna torzija.....	207
5.7.4 Kombinovana torzija	209
5.7.5 Proračun torzije prema Evrokodu 3.....	211
Primer 5.13 Nosivost poprečnih preseka na uniformnu torziju	212
5.8 Kombinovana naprezanja	214
5.8.1 Savijanje i smicanje	214
5.8.1.1 Plastična analiza - poprečni preseci klase 1 i 2.....	215
5.8.1.2 Elastična analiza - poprečni preseci klase 3 i 4.....	217
Primer 5.14 Nosivost I preseka na interakciju savijanja i smicanja	218
5.8.2 Savijanje i aksijalna sila.....	220
5.8.2.1 Plastična analiza - preseci klase 1 i 2	220
5.8.2.2 Elastična analiza - preseci klase 3 i 4	224
Primer 5.15 Nosivost I preseka na interakciju momenta savijanja oko jače y - y ose i aksijalne sile pritiska.....	225

Primer 5.16 Nosivost I preseka na interakciju momenta savijanja oko slabije z-z ose i aksijalne sile pritiska.....	226
Primer 5.17 Nosivost monosimetričnog zavarenog I preseka na interakciju momenta savijanja oko jače y-y ose i aksijalne sile pritiska	228
5.8.3 Koso savijanje	229
Primer 5.18 Nosivost I preseka na interakciju momenata savijanja oko y-y i z-z ose.....	232
5.8.4 Savijanje, smicanje i aksijalna sila.....	233
Primer 5.19 Nosivost I preseka na interakciju aksijalne sile, smičuće sile i momenata savijanja oko y-y ose.....	235
5.8.5 Smicanje i torzija.....	236
5.8.6 Savijanje, smicanje i torzija	237
Primer 5.20 Nosivost I preseka na interakciju smičuće sile, momenta torzije i momenata savijanja oko y-y ose	238
Primer 5.21 Elastična nosivost konzolnog nosača I preseka izloženog kombinovanom naprezanju (smicanju, torziji i savijanju)	239
Poglavlje 6: Stabilnost linijskih elemenata.....	243
6.1 Uvod	243
6.2 Izvijanje	243
6.2.1 Opšta razmatranja	243
6.2.2 Fleksiono izvijanje.....	244
6.2.2.1 Izvijanje u elastičnoj oblasti - teorijske osnove	244
6.2.2.2 Izvijanje u neelastičnoj oblasti	248
6.2.2.3 Nesavršenosti realnih štapova.....	249
6.2.2.5 Evropske krive izvijanja	255
6.2.2.6 Proračun nosivosti štapa na fleksiono izvijanje prema Evokodu 3.....	256
6.2.3 Torziono izvijanje.....	259
6.2.4 Torziono-fleksiono izvijanje.....	260
6.2.5 Izvijanje neuniformnih elemenata.....	262
Primer 6.1 Nosivost elementa kružnog šupljeg preseka (CHS) na izvijanje....	263
Primer 6.2 Nosivost elementa HEA preseka na izvijanje	264
Primer 6.3 Nosivost elementa zavarenog I preseka klase 4 na izvijanje.....	266
Primer 6.4 Nosivost elementa krstastog poprečnog preseka na izvijanje	268
Primer 6.5 Nosivost elementa zavarenog T preseka na izvijanje.....	269
Primer 6.6 Nosivost elementa linearno promenljivog I preseka na izvijanje ..	271
Primer 6.7 Nosivost neuniformnog elementa na izvijanje	274
6.3 Bočno-torziono izvijanje.....	276
6.3.1 Opšte	276
6.3.2 Teorijske osnove - linearno elastično bočno-torziono izvijanje.....	277

6.3.2.1 Kritičan moment u slučaju promenljivog dijagrama momenata.....	281
6.3.2.2 Kritičan moment konzolnih nosača i nosača sa prepustom	288
6.3.2.3 Neuniformni elementi	289
6.3.3 Bočno-torziono izvijanje realnih elemenata - uticaj imperfekcija.....	290
6.3.4 Proračun nosivosti na bočno-torziono izvijanje prema Evrokodu 3.....	293
6.3.5 Konstrukcijske mere za povećanje nosivosti na bočno-torziono izvijanje - bočno pridržani nosači.....	297
Primer 6.8 Nosivost nosača sistema proste grede, izrađenog od vrućevaljanog profila, na bočno-torziono izvijanje.....	301
Primer 6.9 Nosivost konzolnog nosača na bočno-torziono izvijanje.....	308
Primer 6.10 Nosivost kontinualnog nosača na bočno-torziono izvijanje	310
Primer 6.11 Nosivost nosača zavarenog monosimetričnog I preseka na bočno-torziono izvijanje	315
Primer 6.12 Nosivost nosača promenljivog I preseka na bočno-torziono izvijanje	317
6.4 Izvijanje ekscentrično pritisnutih elemenata	319
6.4.1 Teorijske osnove	319
6.4.1.1 Izvijanje u ravni savijanja	320
6.4.1.2 Interakcija izvijanja i bočno-torzionog izvijanja	323
6.4.2 Granična nosivost realnog elementa	325
6.4.3 Proračun stabilnosti ekscentrično pritisnutih elemenata prema Evrokodu.....	326
6.4.3.1 Proračun koeficijenata interakcije k_{ij} prema Prilogu A.....	329
6.4.3.2 Proračun koeficijenata interakcije k_{ij} prema Prilogu B	331
6.4.4 Opšta metoda za izvijanje izvan ravni.....	333
Primer 6.13 Nosivost konzolnog ekscentrično pritisnutog elementa šupljeg pravougaonog preseka - savijanje samo oko jače y-y ose ($N_{Ed} + M_{y,Ed}$)	335
Primer 6.14 Nosivost ekscentrično pritisnutog elementa izrađenog od vrućevaljanog IPE profila - savijanje samo oko jače y-y ose ($N_{Ed} + M_{y,Ed}$)	339
Primer 6.15 Nosivost ekscentrično pritisnutog elementa izrađenog od vrućevaljanog HEA profila - savijanje oko obe glavne ose inercije ($N_{Ed} + M_{y,Ed} + M_{z,Ed}$)	344
6.5 Izvijanje pritisnutih elemenata višedelnog poprečnog preseka	352
6.5.1 Opšte	352
6.5.2 Kritična sila izvijanja oko nematerijalne ose	353
6.5.3 Nosivost elementa višedelnog poprečnog preseka prema Evrokodu.....	355
Primer 6.16 Višedelni element ramovskog tipa	361
Primer 6.17 Višedelni element rešetkastog tipa.....	365

Poglavlje 7: Izbočavanje.....	369
7.1 Uvod	369
7.2 Izbočavanje usled normalnih napona pritiska	370
7.2.1 Opšte	370
7.2.2 Teorija linearno elastičnog izbočavanja.....	371
7.2.3 Granična nosivost neukručene pravougaone ploče na izbočavanje	378
7.2.3.1 Metoda efektivne širine	383
7.2.3.3 Metoda redukovano napona.....	387
Primer 7.1 Proračun momenta nosivosti zavarenog I preseka primenom metode redukovano napona.....	387
7.2.4 Granična nosivost ukručene pravougaone ploče	388
7.2.4.1 Čisto izbočavanje - površinsko ponašanje.....	393
7.2.4.2 Izvijanje - stubno ponašanje.....	398
7.2.4.3 Interakcija izvijanja i izbočavanja	399
7.2.4.4 Kontrola nosivosti na izbočavanje.....	402
Primer 7.2 Proračun nosivosti na izbočavanje ukručene pravougaone ploče opterećene konstantnim naponom pritiska	403
Primer 7.3 Proračun nosivosti na izbočavanje polja limenog nosača sa jednim podužnim ukrućenjem rebra u zoni pritiska	407
7.3 Izbočavanje smicanjem.....	412
7.3.1 Uvod.....	412
7.3.2 Kritičan napon elastičnog izbočavanja.....	413
7.3.2 Post-kritična nosivost.....	416
7.3.3 Granična nosivost rebra na izbočavanje smicanjem.....	419
Primer 7.4 Proračun nosivosti na izbočavanje smicanjem polja limenog nosača sa podužnim ukrućenjem	424
7.4 Izbočavanje usled dejstva poprečne sile	426
7.4.1 Uvod.....	426
7.4.2 Granična nosivost na lokalno izbočavanje usled dejstva poprečne sile	429
Primer 7.5 Proračun nosivosti na izbočavanje usled dejstva poprečne sile....	434
7.5 Interakcije različitih slučajeva izbočavanja	436
7.5.1 Izbočavanje usled normalnih i smičućih napona	436
7.5.2 Izbočavanje usled normalnih napona i poprečne sile	437
Primer 7.6 Kontrola interakcije izbočavanja	437
7.5.3 Kontrola interakcije primenom metode redukovano napona.....	438
7.6 Proračun i konstruisanje ukrućenja.....	441
7.6.1 Poprečna međuukrućenja	442
7.6.2 Oslonačka ukrućenja	449
7.6.3 Podužna ukrućenja	452
7.6.4 Konstruisanje.....	453

7.7 Izbočavanje rebra usled savijanja nožica	454
7.8 "Šir leg" efekti	456
7.8.1 Uvod.....	456
7.8.2 "Šir leg" efekti za elastičnu globalnu analizu.....	457
7.8.3 Efektivna širina za elastične "šir leg" efekte.....	458
7.8.4 "Šir leg" efekti pri graničnom stanju nosivosti.....	460
Poglavlje 8: Granična stanja upotrebljivosti	461
8.1 Uvod	461
8.2 Ugibi, pomeranja i obrtanja preseka.....	461
8.3 Vibracije	465
8.3.1 Uvod.....	465
Primer 8.1 Kontrola graničnih stanja upotrebljivosti međuspratne konstrukcije.....	469
8.4 Ograničenja napona	471
Literatura	475

PREDGOVOR

Nakon gotovo 30 godina, propisi za proračun čeličnih konstrukcija u građevinarstvu, koji su bili zasnovani na konceptu dopuštenih napona, zamenjeni su savremenim evropskim standardima - evrokodovima, utemeljenim na teoriji graničnih stanja. Već nekoliko godina nastava iz oblasti metalnih konstrukcija na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu je u potpunosti prilagođena evrokodovima. Ova knjiga plod je dugogodišnjeg sistematskog istraživačkog rada i trebalo bi da ponudi odgovore na mnoga važna pitanja vezana za proračun graničnih stanja čeličnih konstrukcija, u skladu sa Evrokodom. To je prva knjiga u našoj zemlji koja sveobuhvatno obrađuje ovu tematiku. Koncipirana je tako da, pored analize graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti čeličnih konstrukcija, koja predstavlja težište knjige, obuhvati i filozofiju proračuna prema evrokodu, kao i proračun najznačajnijih dejstava na konstrukcije. Ovakva, pomalo neobična struktura jedne knjige o čeličnim konstrukcijama, posledica je činjenice da u ovom trenutku veoma važna problematika dejstava na konstrukcije, koja je izuzetno aktuelna za inženjere svih profila, nije pokrivena odgovarajućom literaturom na srpskom jeziku.

Sušтина graničnih stanja nosivosti čeličnih konstrukcija prezentovana je kroz analizu nosivosti poprečnih preseka, stabilnosti linijskih elemenata i izbočavanja površinskih elemenata čeličnih konstrukcija. Granična stanja nosivosti poprečnih preseka su analizirana za sve karakteristične vrste naprezanja: zatezanje, pritisak, savijanje, smicanje, torziju i kombinovana naprezanja. Posebna pažnja posvećena je nosivosti linijskih elemenata, odnosno stabilnosti elemenata na izvijanje, bočno-torziono izvijanje i ekscentrični pritisak. Takođe su detaljno analizirani i problemi stabilnosti pločastih elemenata, odnosno izbočavanje punih limenih nosača. Svaka od ovih oblasti, u knjizi je tretirana na sličan način. Nakon analize teorijskih osnova, detaljno je prikazan proračun razmatranog graničnog stanja nosivosti prema važećim standardima, a na kraju su dati ilustrativni numerički primeri. Numerički primeri su pažljivo birani tako da ne predstavljaju puko zamenjivanje brojeva, već da daju

odgovore na neka pitanja koja nisu dovoljno jasno ili nedvosmisleno obrađena u samom tekstu standarda. Za čelične konstrukcije često su granična stanja upotrebljivosti kritična za dimenzionisanje, pa je stoga ovoj problematici posvećeno posebno poglavlje koje se, pored uobičajenih problema upotrebljivosti bavi i problematikom vibracija međuspratnih konstrukcija u zgradarstvu.

Teško je reći kome je ova knjiga namenjena. Verujem i nadam se da će biti od pomoći studentima građevinskih fakulteta konstruktivnog usmerenja, ali i inženjerima u projektantskim biroima kojima predstoji neminovan proces usavršavanja i prilagođavanja novim standardima. Bio bih izuzetno srećan ako bi budući čitaoci ove knjige osetili bar delić zadovoljstva koje sam ja imao pišući je.

Posebnu zahvalnost dugujem recenzentima prof. dr Draganu Buđevcu i prof. dr Milanu Veljkoviću, kao i kolegi prof. dr Đorđu Lađinoviću na redakciji dela teksta o seizmici. Veliku pomoć pri tehničkoj obradi i korekturi teksta su mi pružili i moji dragi saradnici Milan, Jelena, Marko i Nina, te im se iskreno zahvaljujem. Takođe hvala i sponzorima na prijateljskoj i bezrezervnoj podršci u naporima da ova knjiga dospe do svojih čitalaca.

*Beograd,
maj 2014. godine*

Autor

Predgovor drugom izdanju

Budući da je prvo izdanje knjige „Granična stanja čeličnih konstrukcija prema Evrokodu“ rasprodato, a da u stručnoj javnosti i među studentima još uvek postoji potreba za ovom knjigom priređeno je drugo izdanje u kome su samo otklonjene uočene štamparske greške.

*Beograd,
april 2019. godine*

Autor

Poglavlje 1

Osnove proračuna

1.1 Razvoj metoda proračuna

Propisi, proračun i projektovanje konstrukcija nisu pojmovi sa kojima su bili familijarni prvi graditelji i konstrukteri, što im nije smetalo da podignu velelepne građevine kojima se i danas divimo. Oni su uglavnom bili vođeni intuicijom, primerima iz prirode, proporcijama i sličnošću, a potom i iskustvom. I upravo to iskustvo, poduprto razvojem teorijskih disciplina, prvenstveno mehanike i otpornosti materijala, dovodi do primene prvih računskih metoda. Krajem XIX veka ustanovljen je matematički aparat za modeliranje ponašanja čeličnih konstrukcija, naravno u domenu linearno-elastičnog ponašanja. Imajući u vidu da se čelik do dostizanja granice razvlačenja ponaša po Hukovom zakonu kao idealno elastičan materijal, dostizanje napona na granici razvlačenja (f_y) označeno je kao početak loma konstrukcije, odnosno kao kriterijum za njeno dimenzionisanje. Na ovoj pretpostavci zasnovana je teorija dopuštenih napona koja je, uz određene modifikacije, decenijama bila nezamenjiv oslonac svim konstrukterima i okosnica većine propisa za proračun čeličnih konstrukcija. Suština koncepta dopuštenih napona je u ograničenju maksimalnih napona koji se usled realnih opterećenja javljaju u elementima konstrukcije na domen elastičnog ponašanja. Naime, propisani su odnosno determinisani jedinstveni koeficijenti sigurnosti (ν) čije vrednosti zavise od slučaja opterećenja i na osnovu kojih se određuju dopušteni naponi ($\sigma_{\text{dop}} = f_y / \nu$). Ovakav pristup proračunu se naziva determinističkim, zbog toga što su vrednosti dopuštenih napona unapred definisane, odnosno determinisane. Vrednosti koeficijenata sigurnosti, a samim tim i dopuštenih napona, su određene (kalibrisane) na osnovu dugogodišnjeg iskustva u izgradnji objekata sa nosećim čeličnim konstrukcijama. Definisana su tri slučaja opterećenja: I slučaj (osnovno opterećenje), II slučaj (osnovno + dopunsko opterećenje) i III slučaj (osnovno + dopunsko + izuzetno opterećenje), za koje su propisane različite vrednosti koeficijenta sigurnosti. Vrednosti koeficijenta sigurnosti se smanjuju sa smanjenjem verovatnoće pojave kombinacija dejstava karakterističnih za razmatrani slučaj opterećenja. Stoga je vrednost koeficijenta sigurnosti najveća za osnovno opterećenje (I slučaj), čije je delovanje na konstrukciju gotovo izvesno, ili veoma verovatno tokom dužeg vremenskog perioda (stalno opterećenje, korisno opterećenje, sneg,...), a najmanja za III slučaj opterećenja u koji spadaju izuzetna opterećenja (seizmika, udar vozila, požar,...) koja se mogu, ali i ne moraju javiti tokom životnog veka jednog objekta, odnosno konstrukcije.

Koncept dopuštenih napona je do nedavno bio prisutan i u standardima za proračun nosećih čeličnih konstrukcija u našoj zemlji. Međutim, uprkos dugogodišnjoj dobroj praksi u projektovanju čeličnih konstrukcija u čitavom svetu, koncept dopuštenih napona je počeo da se napušta, pre svega zbog težnje građevinskih konstruktera da se što više približe realnom ponašanju čeličnih konstrukcija i iskoriste post-elastične rezerve koje čelik kao izrazito elasto-plastičan materijal poseduje. Ako se ima u vidu i napredak u teorijskim disciplinama, ali i brojna eksperimentalna ispitivanja koja su sprovedena širom sveta, onda je sasvim razumljivo što je već tridesetak godina u najrazvijenijim zemljama Evrope i sveta koncept dopuštenih napona napušten, uzevši zasluženo mesto u istoriji razvoja metoda proračuna čeličnih konstrukcija. Nova era pripada probabilističkim metodama proračuna koje se oslanjaju na stohastičku prirodu slučajnih promenljivih i teoriju verovatnoće. Naime, većina promenljivih veličina koje figurišu u proračunu konstrukcija kao što su opterećenja (sneg vetar, seizmika, temperatura, ljudska navala, saobraćajno opterećenje,...) svojstva materijala i geometrijski podaci, su stohastičke veličine i podležu zakonima verovatnoće. Sve ove veličine treba uvesti u proračun pomoću odgovarajućih krivih raspodele, a krajnji cilj je da se pokaže da je ostvaren odgovarajući stepen sigurnosti, odnosno da je verovatnoća da će doći do otkaza, odnosno loma konstrukcije zadovoljavajuće mala. Međutim, primena ovakvih proračuna je veoma složena i zahtevna, pa kao takva nije primerena inženjerskoj praksi. Stoga je, izvršeno pojednostavljenje tako što je pretpostavljeno da sve veličine koje se koriste u proračunu podležu istom zakonu verovatnoće odnosno da za sve važi ista kriva raspodele - normalna, odnosno Gausova funkcija raspodele. Ovakve metode proračuna se nazivaju polu-probabilističke, ili semi-probabilističke metode i danas su osnov za većinu savremenih propisa za proračun konstrukcija, pa tako i Evrokodova za konstrukcije koji se primenjuju u svim zemljama članicama Evropske unije, a od nedavno i u našoj zemlji. Evrokodovi predstavljaju familiju evropskih standarda za proračun građevinskih konstrukcija, kojima su obuhvaćena dejstva na konstrukcije, kao i proračun konstrukcija od različitih materijala. Prema sadržini podeljeni su na deset delova:

- Evrokod 0 (SRPS EN 1990): Osnove projektovanja konstrukcija
- Evrokod 1 (SRPS EN 1991): Dejstva na konstrukcije
- Evrokod 2 (SRPS EN 1992): Projektovanje betonskih konstrukcija
- Evrokod 3 (SRPS EN 1993): Projektovanje čeličnih konstrukcija
- Evrokod 4 (SRPS EN 1994): Projektovanje spregnutih konstrukcija od čelika i betona
- Evrokod 5 (SRPS EN 1995): Projektovanje drvenih konstrukcija
- Evrokod 6 (SRPS EN 1996): Projektovanje zidanih konstrukcija
- Evrokod 7 (SRPS EN 1997): Geotehničko projektovanje
- Evrokod 8 (SRPS EN 1998): Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija
- Evrokod 9 (SRPS EN 1999): Projektovanje aluminijumskih konstrukcija

Pored suštinskih razlika između determinističkog koncepta proračuna prisutnog u teoriji dopuštenih napona i polu-probabilističkog koncepta, koje se ogledaju kroz drugačiji tretman stohastički promenljivih veličina, treba istaći da Evrokod pruža mogućnosti inženjerima - projektantima da u potpunosti iskoriste elasto-plastična svojstva čelika kao materijala i precizno utvrde nosivost poprečnih preseka ili elemenata, uzimajući u obzir i post-elastično ponašanje, odnosno plastične rezerve nosivosti. Dakle, ponašanje konstrukcije se više ne ograničava na elastičnu oblast, već se analizira njeno ponašanje sve do

dostizanja graničnog stanja nosivosti ili upotrebljivosti. Graničnim stanjima se nazivaju ona stanja konstrukcije čijim dostizanjem, odnosno prekoračenjem konstrukcija prestaje da ispunjava propisane uslove nosivosti ili upotrebljivosti. Prema tome, granična stanja se mogu podeliti na dve suštinski različite grupe:

- **granična stanja nosivosti** (*ULS - Ultimate Limit State*) i
- **granična stanja upotrebljivosti** (*SLS - Serviceability Limit State*).

U Evrokodu se, dakle, primenjuje metoda graničnih stanja, zasnovana na polu-probabilističkom konceptu proračuna. Primena ovakvih metoda proračuna omogućava projektovanje racionalnijih čeličnih konstrukcija, što je, imajući u vidu većitu tržišnu utakmicu, i bio jedan od osnovnih razloga za uvođenje novih metoda proračuna i novih propisa.

1.2 Pouzdanost konstrukcija

U svakodnevnom životu pouzdanost predstavlja svakako poželjnu ljudsku osobinu, može se čak reći vrlinu. Svi težimo da budemo okruženi prijateljima, saradnicima i partnerima koji su pouzdani, na koje se možemo osloniti i koji nas neće izneveriti. Koliko smo u tome uspešni zavisi od mnogo čega, ali prvenstveno od nas samih. U inženjerskoj terminologiji, kada je reč o konstrukcijama, pojam pouzdanosti ima slično značenje. Da bi se konstrukcija mogla smatrati pouzdanom ona mora da prihvati sva dejstva i uticaje koji će se javiti tokom njenog životnog veka i da pri tom ostane podobna za upotrebu za koju je namenjena. Dakle, osnovni zadatak građevinskih inženjera je da njihove konstrukcije budu projektovane i izvedene tako da sa zadovoljavajućim stepenom sigurnosti i ekonomično ispunjavaju sve zahtevane uslove tokom čitavog eksploatacionog (životnog) veka. Stoga se slobodno može reći da pouzdanost konstrukcija obuhvata tri pojma: **sigurnost**, **funkcionalnost** i **trajnost**. Konstrukcija, prema tome, kao prvo treba da ispuni sve uslove sigurnosti koji su tesno povezani sa njenom nosivosti, odnosno sposobnosti da se odupre svim dejstvima za koja se očekuje da će se javiti tokom njene izgradnje i eksploatacije. Ovi uslovi mogu da se kvantifikuju odgovarajućim proračunskim dokazima kojima se pokazuje da konstrukcija poseduje zadovoljavajući stepen sigurnosti. Pored toga, da bi odgovorila svim zahtevima koji se odnose na funkcionisanje objekta kao celine, ili nekog njegovog dela, konstrukcija treba da ispuni i sve kriterijume funkcionalnosti, odnosno upotrebljivosti koji se od nje zahtevaju. Ovi uslovi zavise od vrste objekta, ali i od tipa elementa konstrukcije. Najčešće se odnose na deformacije ili vibracije konstrukcije kao celine i njenih pojedinačnih elemenata. Važnost ovih uslova nije ništa manja od uslova sigurnosti i oni su definisani, ili u odgovarajućim propisima, ili projektnim zadatkom. I dok se ispunjenje uslova sigurnosti i funkcionalnosti ostvaruje proračunskim metodama, trajnost konstrukcije se ne može obezbediti samo na nivou projekta. Na trajnost konstrukcije, pored projektovanja, kojim se obezbeđuje pravilan i kvalitetan izbor materijala i konstrukcijsko oblikovanje detalja, utiču i kvalitet izvođačkih radova, nadzor pri izgradnji, uslovi sredine i program održavanja. Kod čeličnih konstrukcija najveći problemi u pogledu trajnosti mogu se očekivati od korozije i zamora materijala.

Na kraju treba istaći da, pored ispunjenja svih pomenutih uslova, čelične konstrukcije moraju da bude ekonomične i isplative, odnosno konkurentne drugim konstrukcionim materijalima. Jasno je, dakle, da postoji direktna veza između nivoa pouzdanosti konstrukcije i količine uloženog novca, pa je stoga filigranski tanka linija po kojoj se balansira između uloženog i dobijenog. Imajući u vidu značaj ove problematike, a kada je novac u pitanju, značaj je uvek veliki, savremeni propisi za proračun konstrukcija,