

MILENKO PRŽULJ\*

## **SPREGNUTE KONSTRUKCIJE ČELIK-BETON ZA MOSTOVE**

### **REZIME:**

*Više od 200 godina, čelik je bio osnovni material za mostove. Od tridesetih godina prošlog stoljeća beton preuzima primat za mostove manjih i srednjih raspona.*

*Razvoj teorije i prakse sprežanja čelika i betona u poslednjim decenijama ponovo je učinio konkurentnim čelik kao material za mostove svih raspona i sistema.*

*U većem broju evropskih razvijenih zemalja u toku je novi zamah u primjeni spregnutih konstrukcija u mostogradnji uz izraženu kreativnost i inovativnost.*

*Na primjerima aktuelnih izgrađenih spregnutih mostova u svijetu i iz naše prakse ukazuje se na uslove, kada su spregnute konstrukcije u prednosti.*

*Ključne riječi: razvoj, EC4, gredni, lučni i zavješeni spregnuti mostovi;*

## **COMPOSITE STEEL AND CONCRETE STRUCTURES, APPLICATION IN BRIDGES**

### **SUMMARY:**

More than 200 years steel has been representing a basic material for bridges construction. In the thirties concrete took the lead for the bridges of short and middle spans.

By the development the theory and practice in composite steel and concrete structures in last decades, steel has been competitive as material for bridges of all spans and systems.

In many European countries there is a new upswing in the composite bridge construction accompanied by a creativeness and inventiveness.

Using examples of the actual constructed composite bridges and practice of different authors, it is intended to show the circumstances in which the composite steel and concrete structures are advantageous.

Key words: Development, EC4, Beam, Arch and Suspension Composite Bridges

\*) prof. dr. Milenko Pržulj, DDC svetovanje inženiring d.o.o., Kotnikova 40, Ljubljana

## 1. UVOD

Savremene tehnologije omogućuju sprezanje različitih materijala. Sprezanje u širem smislu je konstruktivno i funkcionalno objedinjavanje dva ili više materijala različitih osobina u jedinstven spregnut presjek. U nizu mogućih sprezanja različitih materijala u graditeljstvu imaju praktičnu primjenu sprezanje čelika i betona, sprezanje betona različite starosti i kvaliteta i sprezanje betona i drveta.

U definisanju osnovnih osobina čelika i betona realna je konstatacija:

- čelik je dobar material za mostove jer se, pored ostalog, može pouzdano i sigurno zaštititi od uticaja agresivne sredine;
- beton je dobar material za mostove, ali se još uvijek ne može garantovati njegova trajnija zaštita od uticaja agresivne sredine.

Beton bez pomoći čelika u smislu armiranja, prednaprezanja ili sprezanja ne može preuzeti napone zatezanja. Prevaziđene su zablude i predubjeđenja, da samo kod čeličnih mostova treba računati sa troškovima održavanja.

Razvoj spregnutih konstrukcija se odvija u dva pravca:

- razvoj teorije spregnutih konstrukcija i eksperimentalnih istraživanja
- razvoj i unapređenje prakse konstruisanja, projektovanja i postupaka građenja spregnutih konstrukcija u mostogradnji.

Kod projektovanja i izgradnje mostova sprezanje čelika i betona najčešće se primjenjuje za rasponske konstrukcije grednih sistema mostova. Pored grednih sistema sve više se primjenjuje sprezanje okvirnih, lučnih i zavješanih mostova.

Za projektovanje i izgradnju spregnutih mostova, pored poznavanja teoretskih osnova i propisa potrebno je poznavati postupke radioničke izrade, načina spajanja, posebno zavarivanje i montaže čeličnih konstrukcija. Namjena članka je, da pored ostalog, animira investitore, projektante i izvođače za veću primjenu spregnutih konstrukcija.

Materiali za betonske mostove imaju velike prirodne rezerve, cijena rada je niža, tako da je beton u prednosti za manje i srednje mostove.

Spregnuti mostovi su u prednosti za pojedinačne mostove srednjih raspona, jer omogućavaju brzu izgradnju bez angažovanja veće opreme i rada na gradilištu. Za veće mostove samo varijantna rješenja omogućavaju objektivni i racionalan izbor. Spregnuti mostovi se brže grade, lakše rekonstruišu i zamjenjuju.

## 2. KRATAK PRIKAZ RAZVOJA SPREGNUTIH MOSTOVA

Prije stotinu godina počela je upotreba betona za kolovozne ploče putnih i željezničkih mostova. U početku beton je imao funkciju ispune između čeličnih nosača ili koritastih limova. Od dvadeset do trideset godina prošlog stoljeća beton kao ispuna zamjenjen je nosivom armirano betonskom pločom koja se oslanja na čelične nosače.

Značajna istraživanja sudjelovanja armirano betonskih ploča i čeličnih nosača su bila od 1920–1940 godine. Prvi pisani članci o spregnutim nosačima su se pojavili na kongresu međunarodnog društva za mostove i konstrukcije u Parizu 1932 godine.

Značajan podsticaj za razvoj spregnutih mostova imali su rezultati probnog opterećenja i sa tim povezana istraživanja na mostu preko rijeke Save u Zagrebu 1939. godine. Most nije bio projektovan i dimenzioniran kao spregnuta konstrukcija. Izmjereni naponi i deformacije pri probnom opterećenju su pokazala veliki stepen sprezanja.

Prvi propisi za spregnute konstrukcije su se pojavili između 1940 i 1955 godine. Na našim prostorima korišten je »DIN 1078 – Verbund Träger Strassenbrücken. Prvi pravilnik o spregnutim konstrukcijama u Jugoslaviji usvojen je 1970. godine. Prva primjena spregnutih konstrukcija u Jugoslaviji bila je 1955. godine za kolovoznu ploču čeličnog rešetkastog mosta preko rijeke Save u Bosanskoj Gradiški. Petdeset godina upotrebe spregnutih konstrukcija za mostove obogatila je načine, konstruktivna rješenja i statičko dinamičku analizu sprezanja čelika i betona.

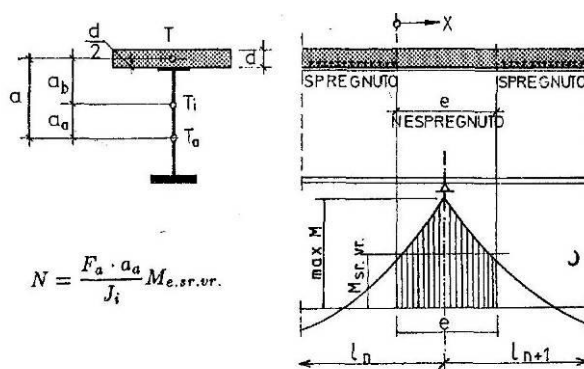
Savremene spregnute konstrukcije, čelik-beton i evropski propisi »Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures« obuhvataju sva tri osnovna konstruktivna elementa: nosače, ploče i stubove.

Razvoj teorije i prakse spajanja čeličnih konstrukcija zavarivanjem i visoko vrijednim vijcima omogućuju nove funkcionalne i skladne oblike presjeka, radioničkih i montažnih nastavaka i olakšavaju izradu i montažu.

Za sprezanje čeličnih nosača i armiranih betonskih ploča koriste se elastični i kruti moždanici raznih oblika. Podjela je zasnovana prema načinu preuzimanja napona smicanju. U savremenoj praksi najviše se koriste elastični moždanici u vidu čepova.

Cijena izgradnje armirano betonskih ploča utiče na konkurentnost spregnutih mostova. Pokušaji da se AB ploče grade kao montažne, što je bilo primjenjeno na izgradnji velikih viadukata u Švajcercskoj i nekim drugim mostovima u periodu od 1960 – 1980 godine, pokazalo je nedostatke u smanjenoj trajnosti, pa se ne preporučuje za nove mostove. Na smanjenje cijene izrade AB ploča može se uticati preko tehnologije izgradnje sa primjenom pomičnih oplata koji kao oslonac koriste čelične nosače. Tanje AB ploče debljine 18 – 20 cm karakteristične za prve decenije primjene spregnutih mostova, sada su radi trajnosti i većih pokretnih opterećenja debele 22 – 30 cm.

Kod sprezanja čelika i betona razlikujemo kruto, elastično i diskontinualno sprezanje. Kod krutog sprezanja nema pomaka na spoju AB ploče i čeličnog nosača. Kod elastičnog sprezanja omogućena su pomjeranja na spoju AB ploče i čeličnog nosača što smanjuje uzdužne i smičuće sile u presjecima, a momenti se povećavaju skladno sa krutosti presjeka. Smanjenje uzdužnih sila lakše je postići primjenom diskontinualnog sprezanja. Na dijelovima nosača sa najvećim momentima presjeci se ne sprežu. Kolovozna AB ploča se na tim mjestima ne prekida. Na tim dijelovima nosača nema smičućih sila između AB ploča i čeličnih nosača, a uzdužna sila je konstantna. Momente preuzima čelični dio spregnutih presjeka (slika 1).

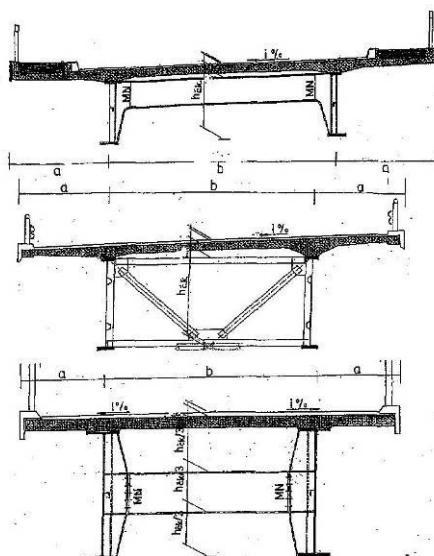


Slika 1

Reološki uticaji od skupljanja i tečenja betona kao i uticaji temperature ne utiču na povećanje sile, jer se ukupna smičuća sila preuzima na krajevima nosača gdje postoji sprezanje. U savremenoj praksi projektovanja spregnutih mostova primjenjuje se diskontinualno sprezanje pa se time izbegava primjena uzdužnih kablova za prednaprezanje kolovoznih AB ploča radi preuzimanja zatežućih napona. Povećana potrošnja čelika kompenzira se sa jednostavnijom i bržom izgradnjom.

Po obimu sprezanja razlikujemo sprezanje presjeka samo za pokretno opterećenje, tako da čelični nosač preuzima cijelu vlastitu težinu i težinu betona, bez privremenih oslonaca pod čeličnim nosačima postavljenim prije betoniranja. Sprezanje za ukupno stalno i pokretno opterećenje podrazumjeva da je čelični nosač poduprt pred betoniranjem AB ploče. Sprezanje se može kombinovati i sa predhodnim ili naknadnim prednaprezanjem čeličnih nosača i (ili) AB ploča.

U prvim decenijama primjene sprezanja, sprežani su samo punostjeni čelični nosači. U poslednjih dvadeset godina uspješno se sprežu i rešetkasti čelični nosači. U pogledu statičkih sistema u početku su se sprežali gredni sistemi sa jednim ili više diskontinualnih ili kontinualnih sistema. U savremenoj praksi sprezanje čelika i betona se primjenjuje i za okvirne, lučne i zavješene sisteme mostova. U našoj i evropskoj praksi za rasponske konstrukcije putnih mostova širine 8 – 14 m najčešće projektovani poprečni presjeci imaju dva glavna nosača (slika 2):

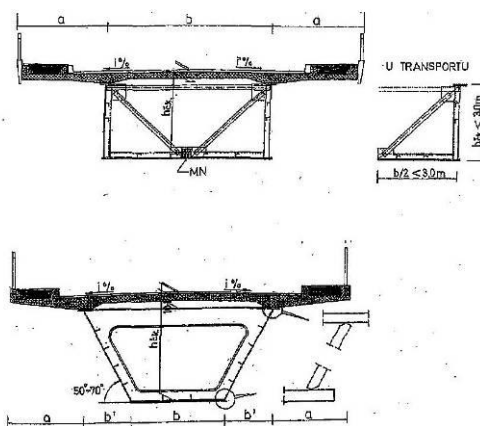


Slika 2

Razmak između nosača i raspon konzola potrebno je pravilno uravnotežiti, tako da je  $b \geq 2a$ .

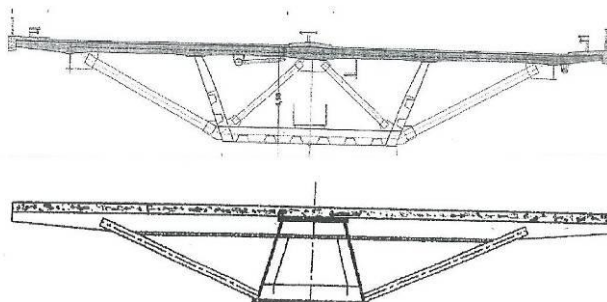
Visina, položaj, presjek, način spajanja poprečnih nosača sa glavnim nosačima, ako i razmak poprečnih nosača zavisi od više parametara (statički sistem, veličina raspona, oblik presjeka i visina glavnih nosača, način betoniranja AB ploče, radionička izrada i montaža).

Za mostove velikih raspona, posebno za mostove u krivini racionalni su pravokutni ili trapezni sandučasti presjeci (slika 3). Pri konstruisanju sandučastih presjeka neophodno je uvažavati i tehnologiju radioničke izrade, transporta i montaže.



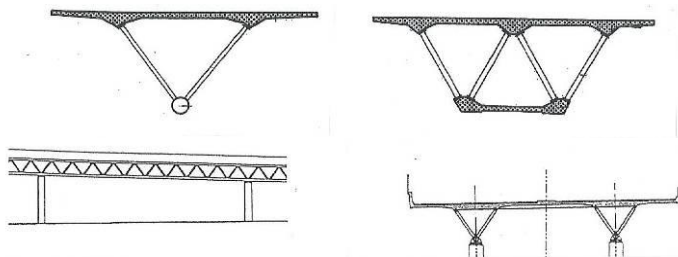
Slika 3

Za spregnute mostove većih raspona i veće širine na autoputevima moguće su vrlo različite koncepcije sandučastih poprečnih presjeka (slika 4). Ograničena širina sandučastog presjeka radi transporta i montaže upućuje na velike dužine konzola, koje je racionalno poduprijeti sa kosim potporama.



Slika 4

Dalji razvoj spregnutih mostova ide u pravcu sve veće primjene prostornijih rešetkastih cijevnih nosača koji se preko specialno oblikovanog gornjeg pojasa sprežu sa AB pločama (slika 5)



Slika 5

Prije deset godina u Švajcarskoj su izgrađeni autoputni dolinski viadukti dužine cca 1000 m sa rasponima 40–50 m, koji su na raspisu Investitora bili najuspješniji. Pored ekonomičnosti viadukti se lijepo prilagođavaju prirodnom ambijentu, djeluju lagano i transparentno (slika 6).



Slika 6

U savremenoj praksi projektovanja spregnutih mostova čelik - beton karakteristična su tri trenda:

- dvojno sprezanje
- okvirne integralne spregnute konstrukcije
- hibridni (mješani) mostovi

Kod spregnutih mostova velikih raspona primjenjuju se dvojno spregnuti presjeci. Betonska ploča u sastavu donjeg pojasa sandučastog presjeka smanjuje potrošnju čelika u zoni pritiska i povećava krutost presjeka.

**Pri projektovanju dvojno spregnutih mostova otvaraju se neka pitanja u izboru odgovarajućih statičkih modela, proračunu, konstruiranju i granicama ekonomičnosti.**

Ta pitanja se prije svega odnose na:

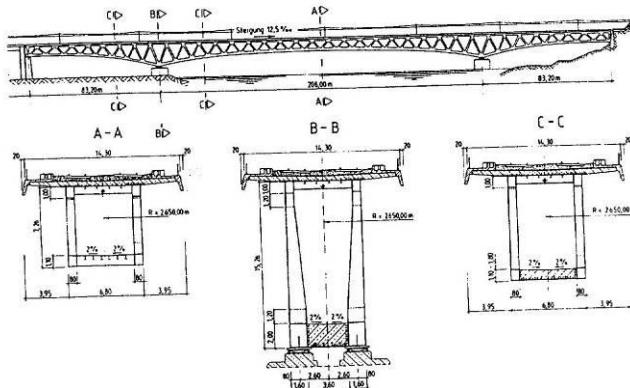
- Tok smičućih napona između čeličnog sandučastog nosača i betonske donje ploče.
- Djelotvornost površinskog sprežavanja između donje čelične i betonske ploče.
- Sudjelovanje moždanika i poprečnih ukrućenja pri prenosu smičućih sila u donju betonsku ploču.
- Unos sile u donju ploču na krajevima ploče.
- Predpostavke sudjelujuće visine i širine debelih betonskih ploča.
- Zamor visoko opterećenih moždanika.
- Uticaj pojedinačnih visokih smičućih napona krute betonske ploče na raspored statičkih količina.
- Ekonomična rješenja da se pritisak na oplatu i vlastita težina svježeg betona prenesu na čelične vertikalne limove i donju ploču.
- Konstruktivna rješenja i ekonomičnost upotrebe betonskih poprečnih nosača nad osloncima.

**Najbitniji rezultati nekih aktuelnih istraživanja**

- Za dvojno sprezanje su povoljnije konstrukcije sa promjenljivom visinom.
- Potrebno je izbjegavati nagle promjene poprečnog presjeka.
- Na krajevima donje ploče su nastupila velika opterećenja moždanika.
- Prenos sile u donju ploču se koncentriše u zonama vertikalnih limova.
- Ako je u vertikalnim limovima raspoređeno više redova moždanika možemo pojednostavljeno pretpostaviti, da uvođenje sile u donju ploču ide isključivo preko moždanika u vertikalnim limovima i u njihovoj blizini.

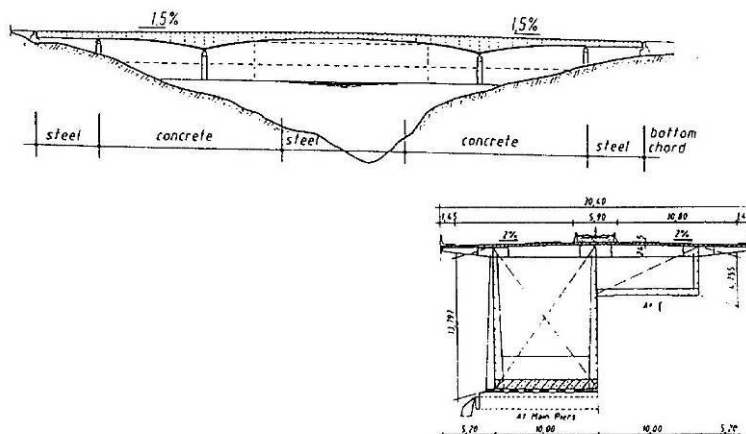
- Poprečna ojačanja vertikalnih limova i donjeg pojasa preuzimaju značajan dio smičućih napona i tako rasterećuju moždanike.
- Sile iz čeličnog poprečnog presjeka u donju betonsku ploču se prenose sa smičućim i nateznim silama u moždanicima.

Na novim brzim željeznicama u Njemačkoj izgrađeno je više mostova sa spregnutom rešetkastom konstrukcijom. Izuzetnu pozornost izaziva rješenje mosta preko rijeke Main kod Nantenbacha za dupli kolosjek, koji je dovršen 1993. godine. Dva glavna kontinualna rešetkasta nosača sa tri raspona, promjenljive visine od 8,5 do 16,5 m imaju rekordan srednji raspon od 208 m (sl. 7). Spregnuta su oba pojasa rešetkastog nosača izuzev srednje (zategnute) zone donjeg pojasa. Glavni raspon izgrađen je konzolnim postupkom, što je prirodno obzirom na odnos raspona i profil prepreke.



Slika 7

U Venezueli je biro Leonhardt, Andrä projektovao spregnuti most preko rijeke Caroni sa glavnim rasponom od 214 m (slika 8). Most ukupne širine 30,4 m služi za autoput i željeznicu. Presjek mosta je dvočelijski sanduk sa tri vertikalna lima promjenljive visine 4,75 m u polju i 13,79 nad osloncima. Pored spreznjanja gornjeg pojasa, betonska ploča je korištena i u pritiscutoj zoni donjeg pojasa. Interesantno je, da gornja ploča nije prednaprežana. Veliki čelični presjek gornjih pojaseva od 600x30 do 300x80, koji se koristio i za fazu montaže uz visok procent armiranja (do 4,8 %) činio je prednaprežanje nepotrebnim.



Slika 8

Kod projektovanja spregnutih mostova posebno većih raspona i u specifičnim uslovima produktivna je kombinacija materijala po dužini mosta. Na dijelovima iznad oslonaca i u kraćim rasponima koristi se betonski presjek, a u srednjem dijelu velikih raspona znatno lakši spregnuti presjek.

Okvirne integralne spregnute konstrukcije mostova otklanjaju nedostatke spregnutih grednih mostova na dva oslonca (nema dilatacija i ležišta) i omogućuju raspone i do 60 m.

Poglavlje o razvoju spregnutih – čeličnih mostova sa posebnim zadovoljstvom završavam citatom iz eseja Mostovi iz 1933. godine uvaženog Nobelovca Ive Andrića:

*»Tanki železni mostovi zategnuti od jedne obale do druge kao žica, što drhte i zvuče od svakog voza koji projuri, oni kao da još čekaju svoj poslednji oblik i svoje savršenstvo, a ljepota njihovih linija otkriće se potpuno očima naših unuka.«*

### 3. KOMENTAR EUROCODE 4 ZA PRORAČUN SPREGNUTIH KONSTRUKCIJA - ČELIK-BETON

Jugoslovenski standard za spregnute konstrukcije usvojen 1990. godine – JUS U.21 010 1990 zasnovan je na prvom modelu – nacrtu Eurocode 4 za spregnute konstrukcije iz 1985. godine. Standard se odnosi na sva tri konstruktivna elementa, t.j. na spregnute nosače, spregnute ploče i spregnute stubove. Uvedeni su pojmovi graničnih stanja, definisane su sudjelujuće širine, data je klasifikacija poprečnih presjeka. Za proračun presječnih sila kod statički neodređenih nosača dozvoljena je preraspodjela momenata. Standard je općenit za sve vrste konstrukcija, t.j. zajednički za zgrade i mostove. Standard nije bio vezan na propise za beton i propise za opterećenja. Praktična primjena standarda kod projektovanja mostova bila je otežena, jer su se otvarale brojne dileme i nedoumice.

U knjizi Spregnute konstrukcije koju je autor objavio 1989. godine u izdanju Građevinske knjige iz Beograda učinjen je napor da se knjiga maksimalno prilagodi prvom prednacrtu Eurocode 4 iz 1985. godine. Tada sam konstatovao da je uz sva uvažavanja prednosti proračuna preko graničnih stanja teška primjena graničnih stanja i za oblast mostogradnje. Konstruktivnim metodama djelovanja na spregnuti presjek u toku montaže, betoniranja kolovozne ploče, prednaprezanja i eksploatacije mijenjaju se karakteristike presjeka i vrste naprezanja pa je sumarne uticaje moguće odrediti samo preko analize napona i deformacija.

Suvišno je da ponavljamo konstatacije o korisnosti i prednosti zajedničkih evropskih propisa za građevinske konstrukcije. Također je bezpredmetna rasprava u okviru manjih država da li ih treba koristiti i prilagoditi im se.

Eurocode 4 (EC 4) za proračun spregnutih konstrukcija od čelika i betona je četvrti po redu ali i po značaju, zajedničkih evropskih normi, odmah iza EC 1 koji obuhvataju dejstva na konstrukcije, EC 2 koji se odnosi na betonske konstrukcije i EC 3 za čelične konstrukcije. Redoslijed je logičan jer se EC 4 u dobrom dijelu poziva i povezuje na tri prethodna standarda.

Za EC 4 zadužen je Podkomitet SC4 u okviru Tehničkog komiteta CEN/TC250. Prema planu ovog Podkomiteta EC 4: PRORAČUN SPREGNUTNIH KONSTRUKCIJA OD ČELIKA I BETONA sadrži:

- Dio 1.1: Opšta pravila i pravila za zgrade
- Dio 1-2: Otpornost na dejstvo požara
- Dio 2: Opšta pravila za mostove

Kao i kod ostalih Eurocoda prvo je objavljen dio 1.1 Opšta pravila i pravila za proračun zgrada koji je od strane Podkomiteta SC4 odobren jula 1992. godine, a maja 2005 objavljen kao ENV 1994-1-1.

Dio 1.2 Protivpožarno projektovanje je objavljen oktobra 1994. godine kao EN 1994-1-2.

Dio 2 koji se odnosi na spregnute mostove objavljen je decembra 2005 kao EN 1994-2:2005.

EC 4 je savremeno koncipiran standard zasnovan na konceptu proračuna prema graničnim stanjima i odnosi se na sva tri konstruktivna elementa, nosače, ploče i stubove.

Dio 1.1 Opšta pravila i proračun zgrada je obrađen dosta obsežno sa više načela i manje pravila, za primjenu pa se doima kao neka vrsta priručnika. Ovakav koncept standarda nije restriktivan i ostavlja dosta slobode konstrukterima. EC 4 dio 1.1 u manjoj meri obuhvata i kontrolu građenja sa ciljem da ukaže na zahtjevani kvalitet radova i usaglašenost sa pretpostavkama iz proračuna.

Dio 1.2 **Otpornost na dejstvo požara** izdvojen je kao poseban dio i opširno je obrađen tako da se može primjenjivati kao zaseban dokument.

Dio 1.2 sadrži sledeća poglavlja:

1. Uvod
2. Osnove
3. Termomehaničke osobine materiala
4. Pravila za požarnu zaštitu
5. Konstruktivne pojedinosti

Osnovni zaštitni material za čelik u spregnutim presjecima je beton u specifičnoj ulozi. Svi objekti su svrstani u rizične grupe u zavisnosti od namjene, veličine, visine, vrste materiala, izloženosti požaru, stupnju ugroženosti ljudi, imovine itd.

Dio 2 Eurocode 4 daje pravila konstruisanja i proračuna za spregnute mostove čelik-beton odnosno za dijelove mostova. Dio 2 je dodatak za EN 1994-1-1 Opšta pravila. Zavješeni mostovi sa spregnutom rasponskom konstrukcijom nisu cjelovito obrađeni u dijelu 2 odnosno u EN 1994-2:2005.

Dio 2 sadrži sledeća poglavlja:

1. Uvod
2. Osnove za projektovanje
3. Materiali

4. Trajnost
5. Analiza konstrukcije
6. Granično stanje nosivosti
7. Granično stanje upotrebljivosti
8. Prefabricirane betonske ploče kod spregnutih mostova
9. Spregnute ploče na mostovima

Države koje namjeravaju primjenjivati EC 4 kao standard i sve druge Eurocode treba da izrade i usvoje »National Application Document«, skraćeno NAD. Sa NAD se uspostavlja veza između EC (EN) i odgovarajućih nacionalnih propisa i standarda. NAD prvenstveno definišu parcijalne koeficijente sigurnosti, kombinacije i sve druge elemente od značaja za sigurnost građevinskih objekata koji su u EC 4 dati orijentaciono i u tekstu posebno naznačeni.

Nakon usvajanja NAD-a slijedi izrada priručnika sa karakterističkim brojnim primjerima koji će pomoći projektantima, da u svom radu primjenjuju ove savremene racionalne konstrukcije.

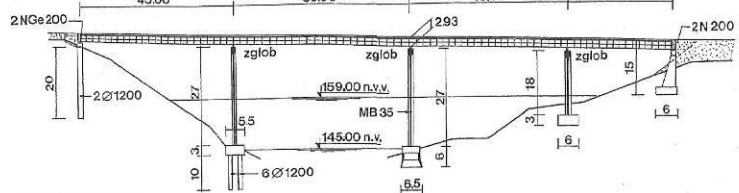
#### 4. GREDNI SPREGNUTI MOSTOVI

Sprezanje čelika i betona se najviše primjenjuje pri projektovanju putnih i željezničkih mostova grednih sistema. Racionalne veličine raspona ovise od morfologije, prvenstveno visine - dubine prepreke, uslova temeljenja, namjene mosta, statičkog sistema, načina montaže i odnosa tržišnih cijena u funkciji vremena i lokacije. Na primjerima projektovanih i izgrađenih mostova moguće je uvjerljivo i pregledno prikazati praktičnu primjenu savremenih trendova razvoja spregnutih mostova.

##### Most preko rijeke Neretve kod Jablanice (8)

Za razliku od ranije izgrađenih mostova sa kontinualnim spregnuto-prednapregnutim konstrukcijama kod kojih je kablovima ostvareno kontinualno sprezanje, putni most preko rijeke Neretve ima kontinualnu konstrukciju sa diskontinualnim sprezanjem (sl. 9).

Most je izgrađen 1985. godine za samo 6 mjeseci kao ekonomičnije rješenje u odnosu na varijantu sa konstrukcijom od prednapregnutog betona. Visina mosta iznad terena čine neekonomičnu izradu privremenih oslonaca za montažu i sprezanje vlastite težine. U zonama pozitivnih momenata izvršeno je sprezanje čeličnog nosača, dok se u zonama negativnih momenata sprezanje ne može obezbijediti bez dodatnog prednaprezanja kablovima. Da bi se izbjeglo prednaprezanje, ojačani čelični nosač iznad oslonaca prima uticaje bez sadejstva armirano-betonske ploče. Ekonomski opravdanost takve koncepcije je pojednostavljenje montaže, skraćivanje vremena građenja, eliminisanje nepovoljnih dopunskih utjecaja od prednaprezanja, te smanjenje uticaja u vremenu  $t = t_n$  od skupljanja i tečenja betona uz nešto veću potrošnju čelika. Betoniranjem kolovozne ploče po fazama, prvo u poljima a zatim nad osloncima, uticano je na smanjenje napona zatezanja u betonu.

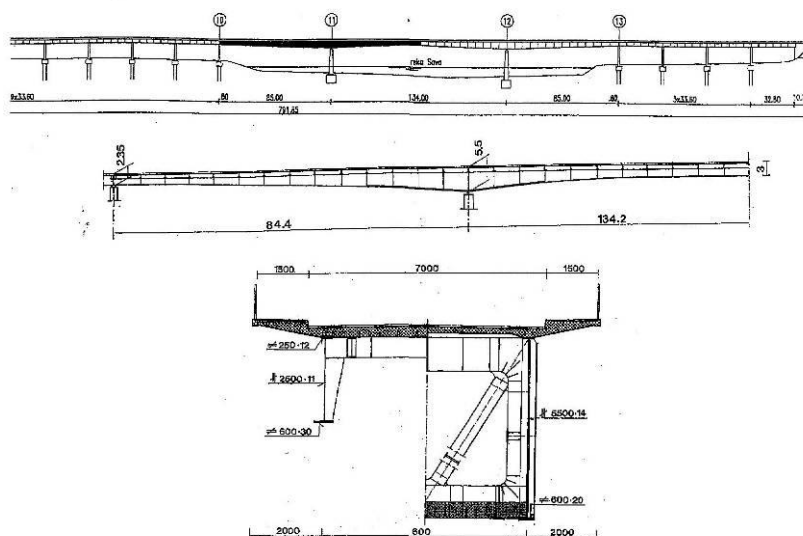


Slika 9

## Most preko rijeke Save u Orešju (10)

Glavna konstrukcija mosta raspona 85+134+85 projektovana je kao kontinualna dvojno spregnuta-prednapregnuta konstrukcija promjenljive visine do 5,80 m nad riječnim stubovima do 3.00 m u sredini mosta.

Izgrađena je – montirana sa po dva pomoćna oslonca u krajnjim poljima i slobodnom konzolnom gradnjom srednjeg raspona uz sukcesivno betoniranje donje odnosno gornje ploče i prednaprezanje. Prema našim saznanjima ovo je bila prva primjena dvojnog spreznjanja i otvorila je put za nove mogućnosti kombinacije čelika i betona u mostogradnji. U vrijeme projektovanja mosta od 1966 – 1968 godine kao i danas konkurentnost čeličnih mostova i za ove raspane bila je manja u odnosu na mostove od prednapregnutog betona. Iz ove okolnosti proizišla je ideja i realizacija dvojnog spreznjanja uz maksimalno smanjenje učešća čelika i povećanje učešća betona u spregnutom presjeku mosta (slika 10).



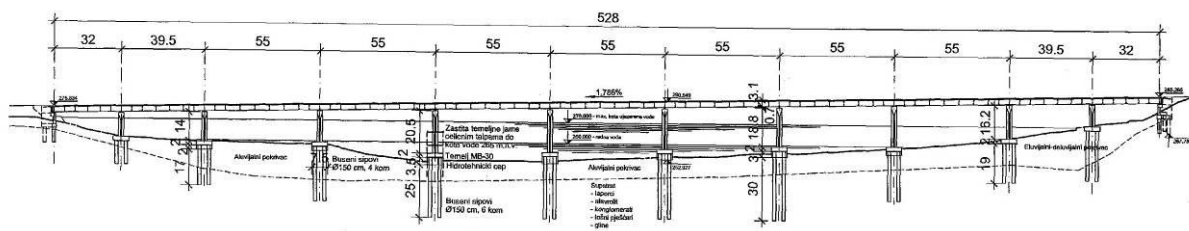
Slika 10

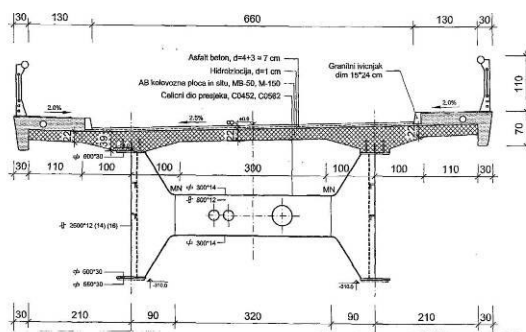
## Most preko Jablaničkog jezera (15)

Kontinualna spregnuta rasponska konstrukcija mosta ima 11 uravnoteženih simetričnih raspona  $32,00+39,50+7 \times 55,00+39,50+32,00=528,00$  m. Konstrukcija mosta slijedi geometriju ceste na mostu i prilagođava se krivinama i proširenjima na krajnjim dijelovima mosta. Raspon od 55,00 m na većem dijelu mosta je optimalan za kontinualne spregnute konstrukcije sa diskontinualnim spreznjanjem bez primjene kablova za prednaprezanje armirane betonske ploče na dijelovima iznad srednjih stubova. Raspon od 55.00 m je limitni za montažu čeličnog roštilja rasponske konstrukcije navlačenjem bez pomoćnih oslonaca i bez privremenog zavješanja. Ovako pojednostavljena tehnologija ugradnje i montaže opravdava nešto povećanu potrošnju čelika za čeličnu konstrukciju što potvrđuje savremena praksa u Švajcarskoj i drugim razvijenim državama.

Cjelokupna tehnologija izgradnje mosta koncipirana je na maksimalnom korištenju jezera promjenljivog nivoa i radne plovne platforme sa koje se buše šipovi, postavljaju talpe zagata, betoniraju temelji i stubovi, montira čelična konstrukcija i betonira kolovozna ploča.

Zadržali smo uobičajeni koncept poprečnog presjeka mosta sa dva glavna nosača i otvorenim presjekom bez spreznjanja poprečnih nosača koji je vrlo racionalan i prisutan je u evropskoj i našoj praksi (slika 11).

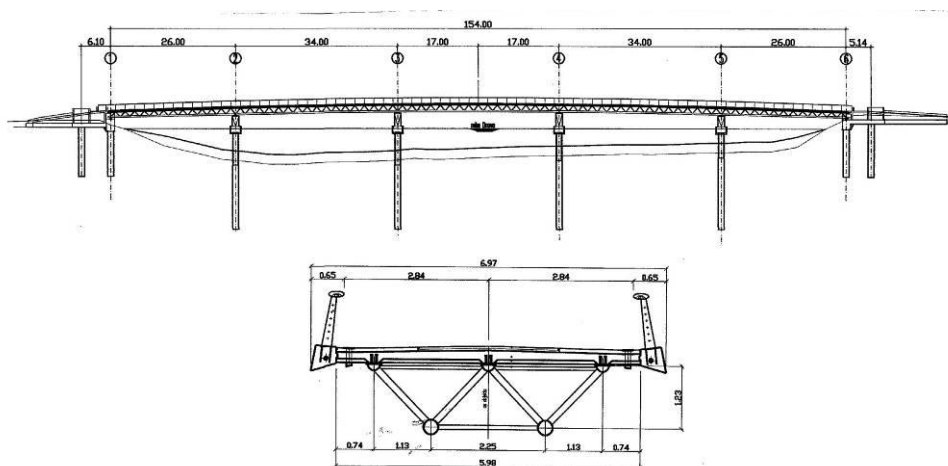




Slika 11

### Pješački most preko rijeke Drave u Ptuj u (16)

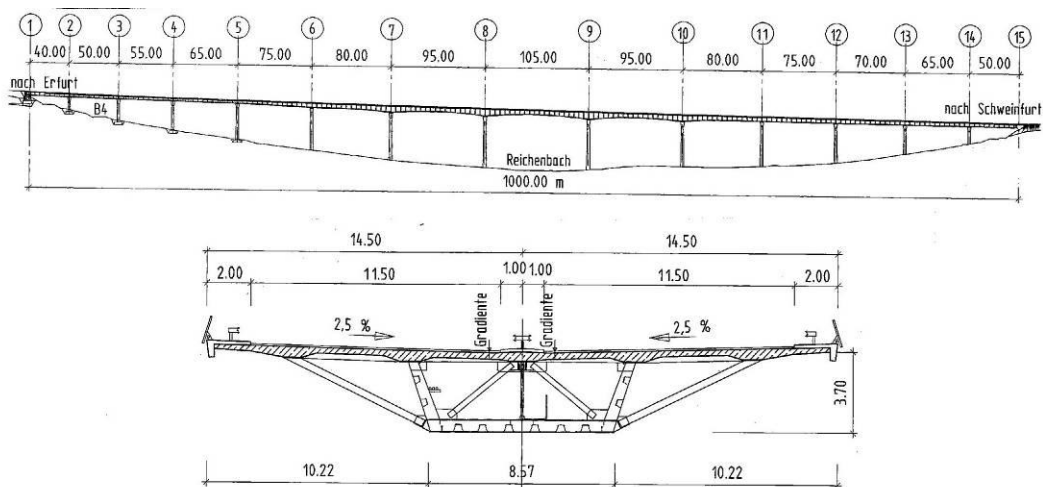
Most je lijep primjer savremene spregnute kontinualne rešetkaste konstrukcije izgrađene 1997. godine. Čelična rešetkasta prostorna konstrukcija mosta visine 1,23 m izrađena je od cijevi u zavarenoj izvedbi. Čelična konstrukcija preuzima težinu svježeg betona, a spregnuti presjek težinu opreme i korisno opterećenje pješaka (slika 12).



Slika 12

### Novi viadukti na autoputevima u Njemačkoj (12)

U posljednjim godinama na autoputevima u Njemačkoj izgrađeni su vrlo lijepi savremeni viadukti sa spregnutim rasponskim konstrukcijama. Viadukt Talbrücke Ruchenbach na A 71 dužine 1000 m ima raspona od 50 – 105 m i premoštava dolinu dubine do 60 m (slika 13).



Slika 13





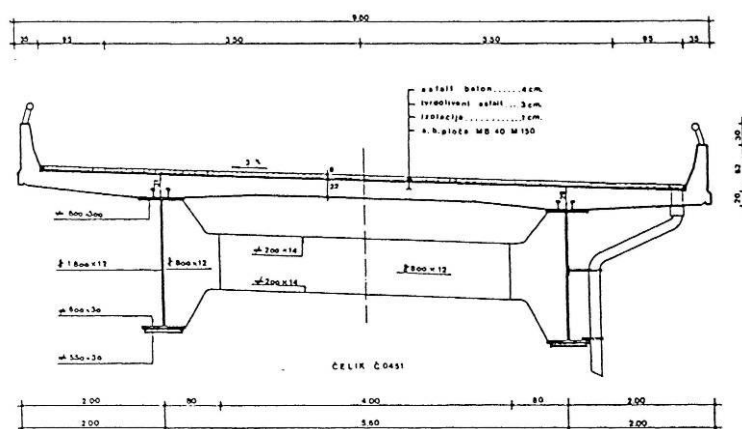
Slika 16

### Obnova mosta preko jezera HE Salakovac na putu Sarajevo – Mostar

Most ukupne dužine 164 m sa visinom stubova oko 30 m ima 5 raspona 20+4x36 m. Izgrađen je 1981. godine sa nosivom konstrukcijom od AB prednapregnutih nosača. U toku rata 1993. godine porušena su 4 raspona mosta po 36 m i stubovi mosta. Brza obnova mosta u teškim uslovima neposredno iza rata pokazala je prednosti u primjeni spregnute konstrukcije. Istovremeno sa radovima na porušanim stubovima proizvedena je transportovana i kopletirana na trupu magistralne ceste, čelična konstrukcija. Montaža čelične konstrukcije i betoniranje kolovozne ploče obavljeno je u kratkom periodu. Obnovljeni most je kontinualna spregnuta konstrukcija 4 x 36 m istih raspona i iste konstruktivne visine kao srušeni betonski most. Dva glavna zavarena nosača konstantne visine 1800 mm na razmaku 5,6 m slijede krivinu ceste u radijusu 500 m. Poprečni nosači su spuštene i ne sprežu se sa kolovoznom pločom čime se smanjuju naponi u kolovoznoj ploči, a spuštene položaj povoljan je za rješenje oplate. Negativni momenti na osloncima preuzeti su podužnom armaturom, s time, da i čelični presjek može sam da preuzme te momente (slika 17).

Potrošnja materijala za spregnutu konstrukciju:

konstrukcioni čelik ST4-2	$228.000/144 \times 9,6 = 165 \text{ kg/m}^2$
beton MB 40 za kolovoznu ploču	$346 \text{ m}^3/144 \times 9,6 = 0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$
betonsko željezo RA 400/500	$96.000 \text{ kg}/144 \times 9,6 = 69 \text{ kg/m}^2$



Slika 17

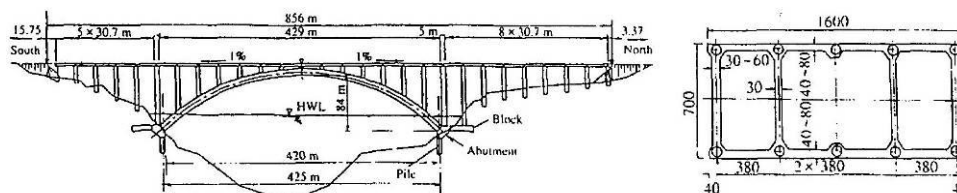
## 5. LUČNI MOSTOVI SA SPREGNUTIM PRESJEKOM LUKOVA ILI NADLUČNE KONSTRUKCIJE

Prije 10 – 15 godina lučni mostovi su se gradili iz betona ili od čelika. Betonski lučni mostovi su imali širok spektar raspona od 50 do rekordnih 390 m na mostu za otok Krk. Čelični lučni mostovi su dostigli najveći raspon od 518 m koji je izgrađen 1976. godine u SAD.

### Lučni spregnuti mostovi izgrađeni u Kini (11)

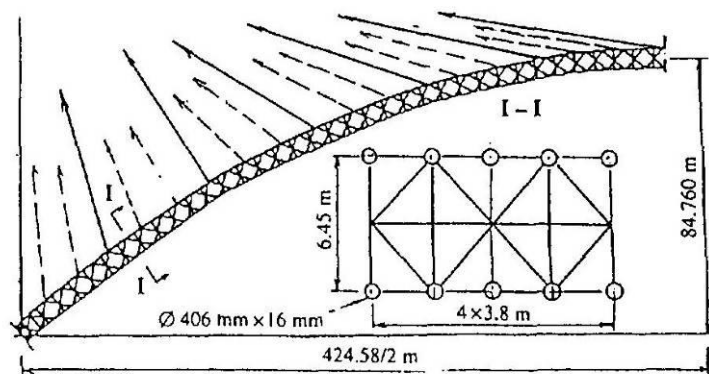
Posljednjih godina u Kini je izgrađeno 14 velikih lučnih mostova raspona od 130 do rekordnih 425 m. Zajednička karakteristika svih ovih mostova je, da imaju presjeke lukova iz čelika i betona kao spregnuti ili obbetonirani presjeci. Čelični dio presjeka služi kao skela (i oplata) za betonski dio presjeka. Oprema za montažu čeličnih dijelova je minimalna i čine je samo zatege. Čelični presjeci lukova su kombinacija jedne ili više cijevi raznih dijametara i debljine zidova koja se po montaži ispunjavaju betonom – sprežu. Ovdje se na najbolji način koristi saznanje, da su za pritisnute spregnute elemente najracionalni kružni presjeci ispunjeni betonom. Za kompletan utisak bila bi interesantna komparativna analiza lukova izgrađenih po ovom konceptu sa spregnutim presjekom i armirano betonskih lukova, kakvi su se gradili u Europi.

Most Wanxian – Yangtze širine 24 m ima rekordan raspon luka 420 m (slika 18).



Slika 18

Čelični dio presjeka lukova formiran je kao prostorna rešetkasta konstrukcija od 10 čeličnih cijevi na razmaku 6,45 po visini i 4 x 3,8 m po širini (sl. 19). Segmenti dužine 15,2 m montiraju se dizalicama sa plovne platforme i pridržavaju kosim zategama. Nakon kompletiranja čelične konstrukcije lukova cijevi se ispunjavaju betonom i kao spregnuti presjek preuzimaju težinu betonskog dijela presjeka.



Slika 19

### Most Skradin na dijelu autoputa Zadar-Šibenik (14)

Za teške i duboke prirodne prepreke i lučne mostove velikih raspona jedinstven most za oba kolovoza autoputa ukupne širine 21 m (bez zaustavnih traka) je smisljeno i racionalno rješenje (slika 20). Nad betonskim lukom sandučastog dvočeličnog presjeka raspona 204 m izgrađena je spregnuta nadlučna konstrukcija sa 12 raspona  $4 \times 32 + 3 \times 28 + 3 \times 32 + 28 + 24 = 360$  m. Konstrukciju čine dva nosača sandučastog presjeka 1200/1700 mm sa konzolama 7,60 m i jakim poprečnim nosačima na razmaku 4,00 m. Sandučasti presjek ima potrebnu torzijsku krutost za konzole naglašenih raspona. Na krajevima konzola su rubni povezujući nosači I presjeka visine 400 mm.

Prednosti spregnute nadlučne konstrukcije je manja težina a time i manje opterećenje i dimenzije presjeka luka, jednostavna i brza izgradnja. Komparativna analiza mosta Skradin i mosta Maslenica sličnih raspona lukova pokazuje prednosti rješenja sa spregnutim nadlučnim konstrukcijama.



### **Lučni most preko jezera Gazivode kod Kosovske Mitrovice**

Čelični rešetkasti dvozglojni lukovi raspona 200 m imaju obješenu spregnutu rasponsku konstrukciju. Prednosti spregnute konstrukcije je manja cijena u odnosu na čeličnu ortotropnu konstrukciju a znatno manja težina, a time i potrošnja čelika za lukove u odnosu na betonsku konstrukciju (slika 22).



Slika 22

### **Lučni spregnuti nadvoz na brznoj cesti u Mariboru**

Spregnute lučne konstrukcije su našle svoju primjenu i za rješenje nadvoza sa jednim rasponom (slika 23).

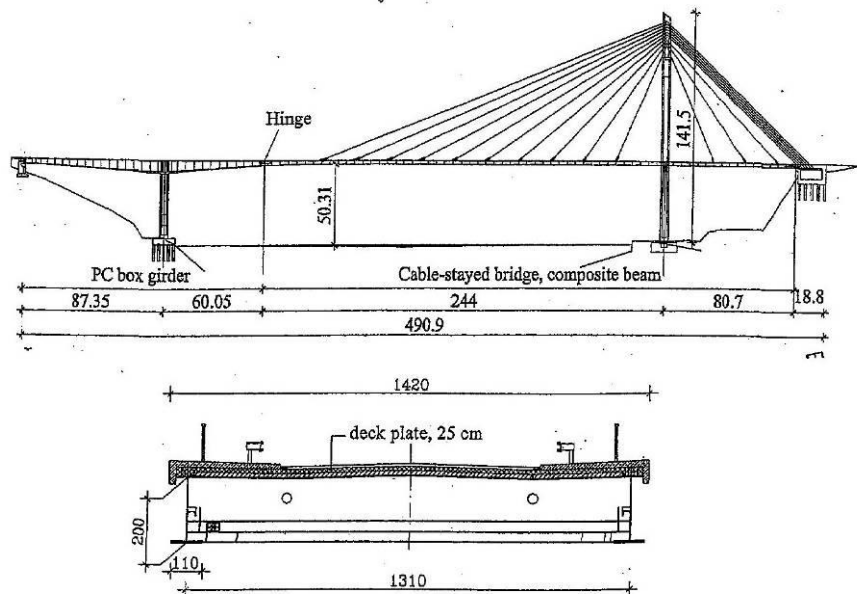


Slika 23

## 6. SPREGNUTE RASPONSKE KONSTRUKCIJE NA MOSTOVIMA SA KOSIM ZATEGAMA

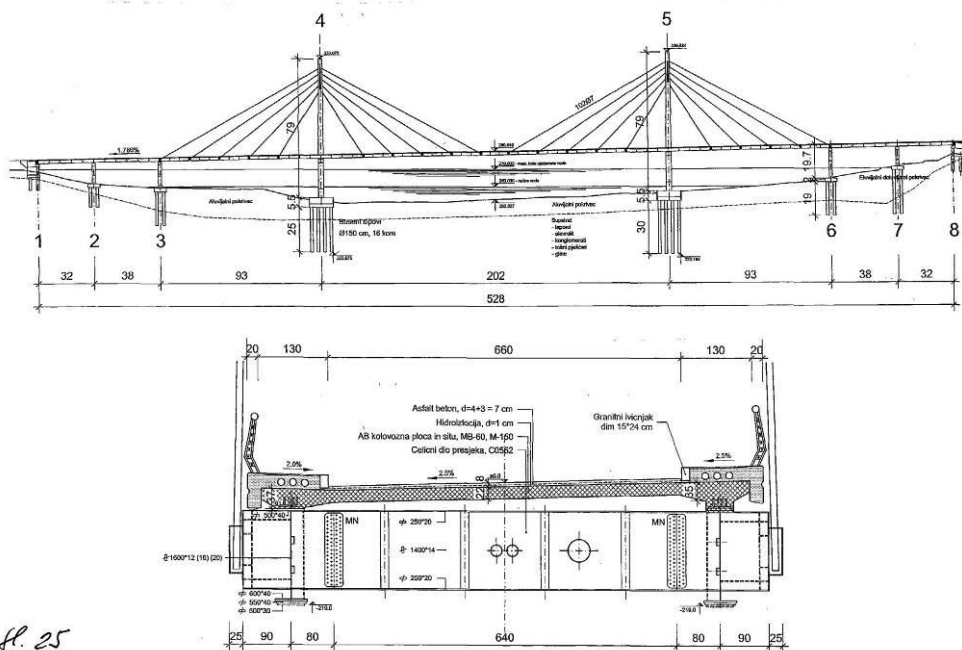
U intenzivnom razvoju i izgradnji mostova sa kosim zategama, karakteristično za zadnje decenije (zavješeni – zauzdani mostovi) spregnute rasponske konstrukcije su konkurentne za raspone od 200 – 400 m. Za raspone do 200 m konkurentan je beton, a za raspon preko 400 m čelik sa ortotropnom pločom. Prednosti spregnute konstrukcije je manja težina u odnosu na beton, a niža cijena u odnosu na čelik, brza je i relativno jednostavna izgradnja.

Glavni dio mosta preko Dubrovačke rijeke je obješen sa kosim zategama raspona 244+80,7 (slika 24). Ima spregnutu rasponsku konstrukciju sa dva čelična I nosača visine 2 m i AB pločom debljine 25 cm.



Slika 24

Za most preko Jablaničkog jezera projektovana je i varijanta sa kosim zategama raspona 93+202+93 sa spregnutom rasponskom konstrukcijom (slika 25). Rasponska konstrukcija ima dva čelična zavarena glavna nosača visine 1600 mm na razmaku 8,00 m, jake poprečne nosače na mjestima zavješnja i AB ploču debljine 22 cm spregnutu sa glavnim nosačima. Namjena varijantnog rješenja bila je da se smanji broj stubova koji se temelje duboko na šipovima u dubokoj vodi jezera. I pored smanjenja cijene temeljenja i manjeg broja stubova u dubokoj vodi jezera, varijanta sa kosim zategama bila je skuplja za 15 % radi značajnog udjela cijene zatega i pilona (slika 25).



sl. 25

Slika 25

## 7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

- Sve dok se inženjeri u ulozi investitora, projekatara ili graditelja unapred opredeljuju i specijaliziraju za materiale a ne za objekte, beton kao material masovnije upotrebe bit će u prednosti i u mostogradnji. Inženjer treba da realizuje najpodobniju konstrukciju, a material bira prema osobenosti prepreke i uslovima tržišta.
- Material za betonske konstrukcije ima velike prirodne resurse, a cijena rada je niža. Beton je u prednosti kod manjih i srednjih mostova, posebno kod izgradnje skupine objekata na novim saobraćajnicama.
- Čelik u vidu spregnutog presjeka je u prednosti kod pojedinačnih mostova srednjih raspona, jer omogućuje brzu izgradnju bez učešća veće opreme i rada za gradilišta.
- Za veće mostove samo varijantna, konkurentna rješenja daju pravo na prednost pojedinim materialima ili sistemima.
- Ako neka sredina želi održati konkurentnost materiala, mora brinuti da oba materiala imaju šansu za kontinuitet u poslu i čuvanje stručnih ljudi i referenci.
- Zahvaljujući prednostima koje pružaju spregnute konstrukcije može se s sigurnošću očekivati njihov značaj, razvoj i primjena u budućnosti uz sve oštriju konkurenciju sa AB prednapregnutim mostovima.
- Izgledna mogućnost ekonomskog poboljšanja kod mostova većih raspona sa dvojnim sprezanjem čine spregnute konstrukcije najekonomičnijim i za raspone preko 150m.
- Spregnute konstrukcije sa pločom kao krovom iznad čelične konstrukcije uz pravilnu odvodnju, izolaciju i dobru antikorozivnu zaštitu nemaju oštećenja ni posle 30 godina eksploatacije, pa je to njihova prednost u odnosu na konstrukciju od betona.
- U većem broju evropskih država primjetan je novi zamah u primjeni spregnutih konstrukcija u mostogradnji uz izraženu inovativnost. Bila mi je želja da u ovom radu ukažem na taj zamah kao animirajući podsticaj za konstruktore mostova sa ovih prostora.
- Čelične spregnute konstrukcije se jednostavnije saniraju, obnavljaju i zamjenjuju.
- Izgradnja spregnute konstrukcije manje remeti prirodni ili urbani ambijent.
- I dalje ostaju otvorena stručna pitanja poboljšanja tehnologije betoniranja kolovoznih ploča, prednapreznja i optimalizacija debljine i oblika vertikalnih limova i pojaseva.

### LITERATURA:

1. N. Hajdin: Različite mogućnosti spreznja betona i čelika u mostogradnji, Spregnute konstrukcije, specialno izdanje časopisa Izgradnja, Beograd 1972
2. N. Hajdin: Einige Beispiele der Kombination von Stahl und Beton im Brückenbau, Schweizer Architekt und Ingenieur 103 (1985)
3. F. Nather: Stahlbrücken mit Doppelverbund in Deutschland, Bauingenieur 72 (1997) 131-141 Springer-vdi Verlag 1997
4. F. Nather: Verbundbrücken–Stand der Technik–Perspektive für Zukunft, Stahlbau '90
5. R. Saul, W. Zellner: Railway Bridge with double Composite Action Across River Main, IABSE Symposium, Leningrad 1991
6. R. Saul, W. Zellner: Combined Highway-Railway Bridge with Double Composite Action, IABSE Symposium, Leningrad 1991
7. F. Kržić: Jeklene konstrukcije, Gradbena fakulteta Ljubljana (1997)
8. M. Pržulj: Spregnute konstrukcije, univerzitetni učbenik, Građevinska knjiga, Beograd, 1989
9. M. Pržulj: Savremeni oblici spreznja čelika i betona u mostogradnji, Građevinar br. 41, Zagreb, 1989
10. M. Pržulj: Composite Steel and concrete structures Applications in Bridges, 7th International Symposium, Ohrid, oktobar 1997
11. Structural Engineering International 2/97, 3/97, 3/2007, Zürich, IABSE
12. Brücken und tunnel der Bundesfernstrassen 2004, Deutscher Bundes Verlag
13. Z. Šavor, G. Hrelja, N. Mujkanović, Design and Construction of Mirna Viaduct, International conference on Bridges, Dubrovnik 2006
14. Z. Šavor, G. Hrelja, N. Mujkanović, Most preko kanjona reke Krke kod Skradina, Zlatni sabor HDGK 1953-2003, Zagreb 2003
15. M. Pržulj, Z. Hadžihasanović, M. Kamenica: Projekt mosta preko Jablaničkog jezera, Građevinar br. 58, 02/2006