



NUMERIČKO MODELIRANJE SLOBODNO KONZOLNOG MOSTA U PROGRAMSKOM PAKETU SOFiSTiK

Marino Jurišić

magistar građevinarstva

Mladen Glibić

izv. prof. dr. sc., dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak: Cilj rada je da se kroz izradu modela za proračun rasponske konstrukcije prođu sve faze potrebne za modeliranje mosta koji se gradi slobodno konzolnom metodom. Prikazat će se potrebni pripremni radovi da bi se pristupilo modeliranju kao i konkretni koraci modeliranja i proračuna u programskom paketu SOFiSTiK. Na kraju će se dati osvrt na druge modele potrebne za završetak statičkog proračuna i uvezivanje gotove dokumentacije.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, mostovi, metoda slobodno konzolne gradnje, SOFiSTiK

NUMERICAL MODELLING OF A BALANCED CANTILEVER BRIDGE IN SOFiSTiK SOFTWARE

Abstract: Goal of this paper is to go through all stages necessary to calculate a balanced cantilever bridge. Preparatory works for modelling will be shown as well as real modelling and calculation steps in SOFiSTiK software. At the end other models needed for complete structural design and documentation will be considered.

Key words: numerical modelling, bridges, balanced cantilever method, SOFiSTiK



1. UVOD

Ovaj rad će obraditi numeričko modeliranje mosta koji se gradi slobodno konzolnom metodom, držeći se pri tome izrade modela za proračun rasponske konstrukcije (bez modela temelja i upornjaka). Ostali modeli se neće obrađivati zbog velikog obujma posla, ali na kraju će se dati osvrt za daljnji proračun. Na početku će se napraviti kratki uvod u numeričko modeliranje i slobodno konzolnu gradnju.

Numeričko modeliranje je proces u kojem se stvarna konstrukcija određenim alatima simulira. Na takvu simuliranu konstrukciju moguće je nanijeti opterećenja i pratiti ponašanje konstrukcije pri raznim opterećenjima. Koristeći znanja iz raznih građevinskih disciplina kroz takve simulacije možemo dobiti rezne sile i naprezanja u elementima. Numeričko modeliranje danas je puno jednostavnije jer se većinom veže za neki grafički programski paket, u kojem možemo relativno jednostavno izmodelirati svojstva i oblik konstrukcije, a možemo je i zorno prikazati u 3D okolini. U ovom radu bazirat ćemo se na programskom paketu SOFiSTiK u kojem je moguće modelirati konstrukciju grafički preko programa SOFIPLUS čije je korisničko sučelje temeljeno na AutoCAD-u i lako se koristi. Nakon što se konstrukcija izmodelira i opterećenja nanese, model se iz SOFIPLUS-a izvozi u SSD (SOFiSTiK Structural Desktop) gdje se odrede razni proračunski parametri modela i gdje se na kraju model proračuna.

Slobodno konzolna gradnja je način gradnje gdje se prvo napravi donji ustroj mosta (stupovi i temelji), a nakon toga sa vrha stupa rasponska konstrukcija se gradi na jednu i drugu stranu po segmentima. Ovim načinom se mogu napraviti dosta veliki rasponi sa minimalnim brojem stupova, a izbjegava se skela ukoliko je teren nepristupačan. Segmenti mogu biti različite duljine, a često su prvi segmenti kraći zbog višeg presjeka i veće vlastite težine. Za ovakav način gradnje potrebna je posebna pokretna oprema (dvije krletke) koje se montiraju na bazni dio koji se napravi po završetku stupa i onda se pomjera lijevo i desno sukcesivno betonirajući segmente. Na krletku je ovješena oplata, a nakon završenog betoniranja i prednapinjanja jednog segmenta krletka i oplata se pomjeraju za segment dalje. Ovaj proces se nastavlja dok se konzole mosta ne spoje. Kada se most spoji krletka se može demontirati i počinju završni radovi.



2. MODELIRANJE

2.1 Trasa mosta

Za primjer u ovom tekstu ćemo uzeti most Vranduk 1 na koridoru Vc u Bosni i Hercegovini. Most premoštava rijeku Bosnu kod mjesta Vranduk po čemu je i dobio ime. Zbog uvjeta na terenu (rijeka Bosna, strm teren) cilj je bio da se napravi što manji broj stupova, pa se već iz toga uvjeta na ukupnoj duljini od 380 m odlučilo da se napravi most metodom slobodno konzolne izgradnje. Trasa se nalazi u S krivini sa oštrim krivinama radijusa cca 700 m. Treba napomenuti da se kod projektiranja prometnica sva vitoperenja nastoje uraditi prije objekata (mostova, vijadukata), te da se nastoji postaviti trasu da objekti idu u pravcu ili u konstantnoj krivini zbog puno lakše izrade objekta. Ovo se pogotovo odnosi na slobodno konzolne mostove koji se rade iz segmenata koji imaju problem sa postavljanjem oplata ukoliko je radijus krivine mali. Izbjegava se i vitoperenje na mostu zbog segmentne gradnje, jer tada svaki kraj i početak segmenta ima različit nagib i to puno otežava postavljanje oplata, izradu nacrtu konstrukcije, izradu nacrtu armature i samu izradu i postavljanje armature. Time se most poskupljuje.

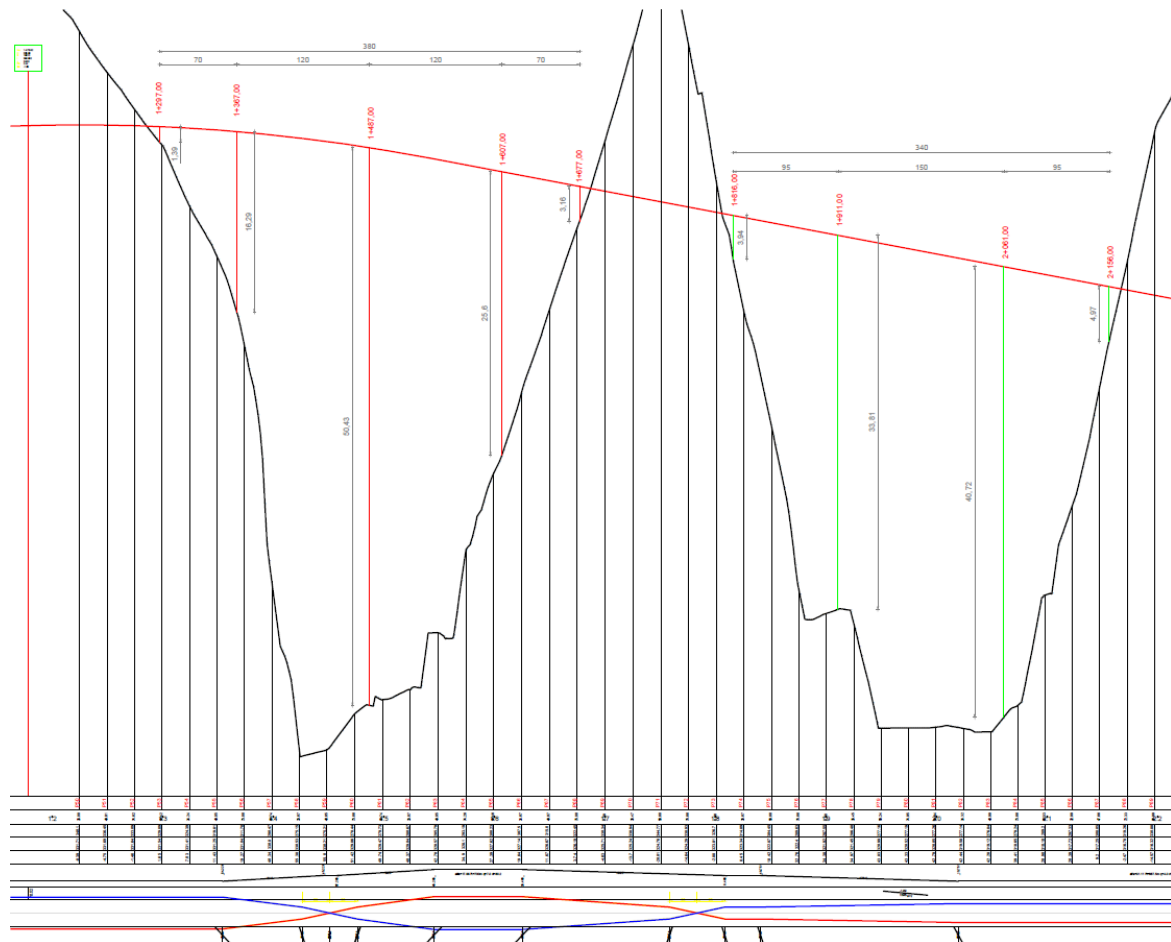
Prije nego modeliranje započne odlučuje se sa kojom točnošću se model radi. Ukoliko je most u maloj krivini koja se možemo zanemariti, model se može raditi kao da je most u pravcu. Ako most ima veće krivine ili su krivine bitne zbog načina izgradnje onda se može praviti točniji model gdje se iz cestarskih podloga uzimaju točni elementi trase i kao takvi se prenose i u model. U ovom slučaju krivine moramo modelirati iz dva razloga:

1. Na ovakvim mostovima jako je bitna reologija betona (puzanje i skupljanje) da bi se u fazi izvedbenog projekta mogla izračunati potrebna nadvišenja segmenata, a velike krivine će imati utjecaja na položaj kablova, skretne sile i reologiju
2. Dok se most gradi statički sustav mu je konzola. Težina ovakvih mostova je dominantno opterećenje pa ne možemo zanemariti to što će se konzola nagnjati na unutarnju stranu krivine. Ovo će imati utjecaja na proračun stupova i temelja.

Točna trasa se uzima iz cestarskih podloga gdje se vide svi potrebni elementi: broj profila, stacionaža profila, kota terena, kota nivelete, razlika nivelete i terena, pravci i krivine, uzdužni nagibi, vitoperenje i poprečni nagibi kao što se vidi na slici 1 i 2. Na projektantu ostaje da svoju građevinu prilagodi zadanoj trasi ceste. U ovom slučaju radi se o autocesti i uzdužni nagib je mali pa se ne treba uzimati u obzir vertikalna krivina. Cestarske podloge najčešće imaju y osu u mjerilu koje je 10 puta manje nego x osa da bi visinske razlike bile preglednije.

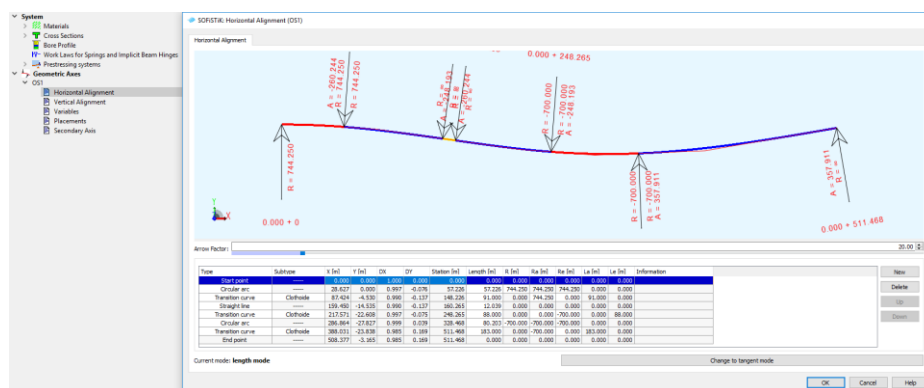
271.00	
BROJ PROFILA	
STACIONAŽA PROFILA	0.4
KOTA TERENA	
KOTA NIVELETE	
RAZLIKA NIVELETA-TEREN	
PRAVCI I KRIVINE	
UZDUŽNI NAGIB	
VITOPERENJE	
POPREČNI NAGIB	

Slika 1 – Podaci dani u cestarskoj podlozi

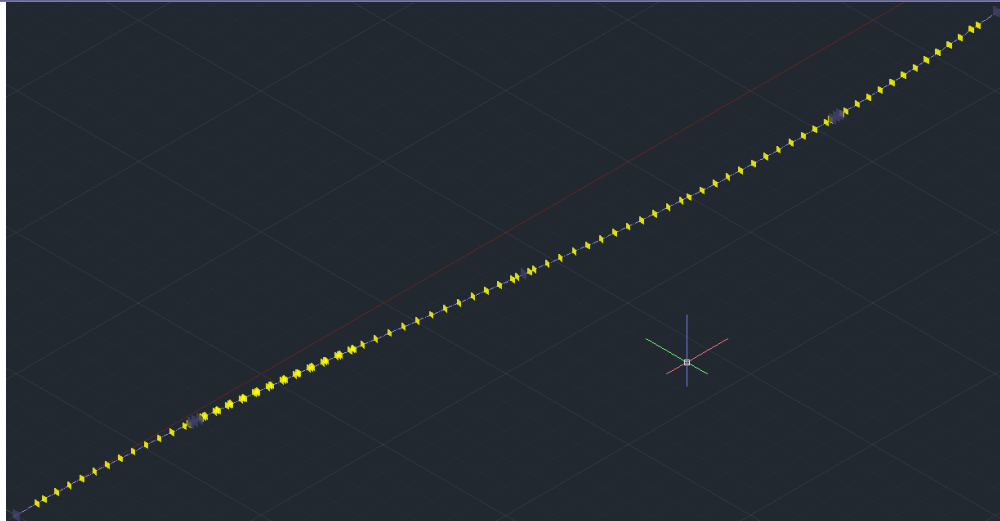


Slika 2 – Cestarska podloga

Nakon pregledavanja podloga modeliranje može početi, i to tako da se u programu SOFiPLUS zadaju točni parametri trase mosta po kojima će program napraviti osovinu mosta. Pored toga na osovinu mosta se na određenim razmacima postavljaju placementi - ravnine okomite na osovinu mosta koje služe za lakše određivanje segmenata. Elementi osovine, tj. elementi horizontalnih krivina mosta se zadaju kao i placementi po stacionaži. Svrha placementa je lakše modeliranje kablova za prednapinjanje i segmenata sa različitim presjecima. Izgled osovine mosta i elemenata krivine prikazan je na slici 3, a na slici 4 prikazana je osovinu mosta i placementi u 3D modelu.



Slika 3 – Izgled osovine mosta i elementi krivina



Slika 4 – Osovina mosta i placementi (žutom bojom)

2.2 Poprečni presjeci

Nakon što je postavljena osovina mosta i elementi krivine određuju se segmenti i poprečni presjeci. Rasponska konstrukcija mosta je najviša na stupovima, a najniža u sredini raspona i prema upornjacima. Zbog velikih raspona redovno ima sandučasti poprečni presjek. Sanduk osigurava veliku krutost konstrukcije kao i smještanje brojnih kablova za prednapinjanje koji će biti u rasponskoj konstrukciji, kako u fazi gradnje tako i u fazi kada se most spoji. Gornja ploča mosta prati uzdužni nagib mosta i možemo reći da je ravna, dok se donja ploča mijenja po paraboli. Za početak su potrebni presjeci nad stupom i u sredini raspona. Kod slobodno konzolnih mostova iz inženjerskog iskustva može se pretpostaviti da je presjek nad stupom visok $L/18$, a presjek u polju $L/38$ (gdje je L glavni raspon mosta, u ovom slučaju 120 m). Tako je odabrano da je presjek nad stupom visok 6.8 m, a presjek u polju 3.2 m. Kada se znaju visine presjeka nad stupom i u polju i svijetli razmak između stupova lagano se može izvesti izraz za parabolu donjeg ruba donje ploče. U ovom slučaju to će biti sljedeća formula(1):

$$y(x) = ax^2 + bx + c \Rightarrow 0.00138x^2 - 0.128x + 6.8 \quad (1)$$

Kada je poznat oblik parabole mogu se odrediti segmenti i presjeci. Ovo je na neki način iterativan proces, prvo treba pretpostaviti duljine segmenata nakon čega možemo odrediti visine presjeka na tim duljinama. Kada to završi ostaje provjeriti težine segmenata, jer je dužina segmenta ograničena težinom, tj. nosivošću pokretne opreme. Ukoliko nosivost ostane veća od težine segmenta takve dužine zadovoljavaju, a ako težina segmenta premaši nosivost kretke onda se (najčešće segmenti bliži stupu sa višim presjekom) skraćuju. U ovom slučaju jedna strana konzole ima ukupno 11 segmenata, gdje su prva dva segmenta duljine 4.75 m, a ostalih devet duljine 5 m. Jednostavnim uvrštavanjem u formulu (1) mogu se dobiti presjeci na svakom segmentu sada kada znamo duljine (tablica 1). Presjeci se računaju od ruba stupa do početka spojnog segmenta, tako da prvi dio od 1.75 m predstavlja samo kratku konzolu baznog dijela na vrhu stupa.

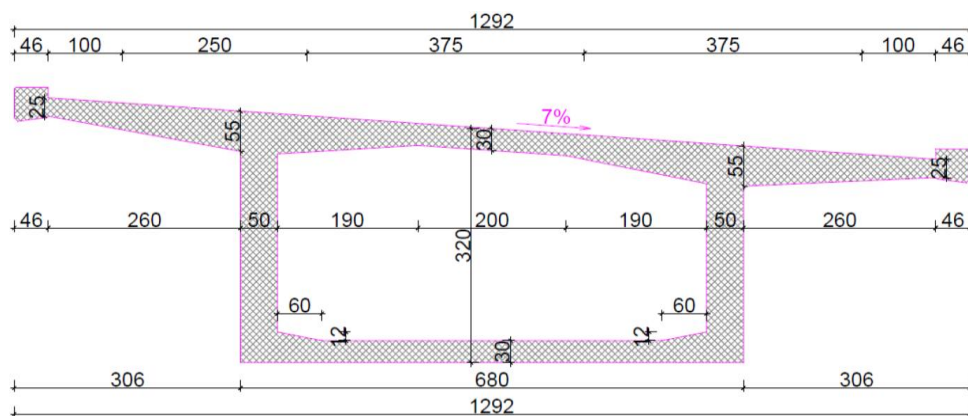
Stupovi su različitih visina, stup S1 je visok 12.58 m, stup S2 je visok 46.64 m, a stup S3 je visok 20.87 m. Most je okvirni, a stupovi su upeti u rasponsku konstrukciju. Zbog ovoga očekivano je da će most imati problema sa prisilnim deformacijama (temperatura, puzanje i skupljanje, seizmika) ako svi stupovi budu iste krutosti, tj. da će najkraći stup S1 zbog velike krutosti na sebe preuzeti veliki dio opterećenja. Zbog toga je visoki stup S2 sandučast, a stupovi S1 i S3 su sastavljeni od dva paralelna zida kako bi im se umanjila krutost.



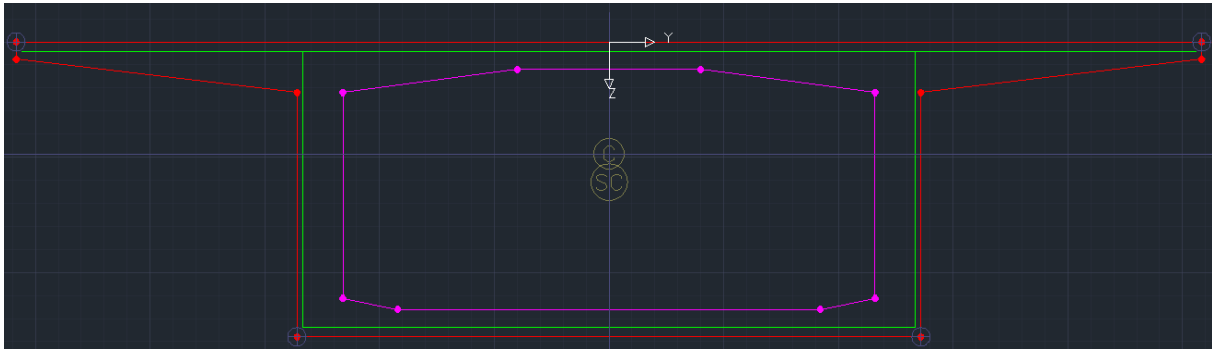
Tablica 1 – visine presjeka rasponske konstrukcije

Donji rub donje ploče	Udaljenost	Duljina	Visina (m)
presjek 1	0	0	6.80
presjek 2	1.75	1.75	6.58
presjek 3	6.5	4.75	6.02
presjek 4	11.25	4.75	5.50
presjek 5	16.25	5	5.02
presjek 6	21.25	5	4.59
presjek 7	26.25	5	4.22
presjek 8	31.25	5	3.91
presjek 9	36.25	5	3.66
presjek 10	41.25	5	3.46
presjek 11	46.25	5	3.31
presjek 12	51.25	5	3.23
presjek 13	56.25	5	3.20

Prije nego što se presjeci rasponske konstrukcije i stupova počnu crtati mora se odabrati materijal od kojeg je presjek izrađen. U ovom slučaju rasponska konstrukcija i stupovi izrađeni su od betona klase C40/50, a armirani su osim prednapetim kablovima i betonskom armaturom B500B. Presjeci rasponske konstrukcije su uvjetovani cestom koja prelazi preko mosta, tj. autocestom. Ukupna širina kolovoza skupa sa ogradama u jednom smjeru (za jedan most) je 12.92 m ($3.75 + 3.75 + 2.5 + 1 + 1 + 0.46 + 0.46 = 12.92$) tako da i gornja ploča mora biti te širine. Od vanjske strane lijevog do vanjske strane desnog rebra širina presjeka je 6.8 m. Gornja ploča je debljine 0.30 m sa zadebljanjima na 0.55 m nad rebrima i stanjenjem na 0.25 cm na kraju konzola kod ograde. Širina rebara je promjenjiva i kroz prva tri segmenta smanjuje se sa 0.65 m na 0.50 m kakva ostaje do sredine raspona. Donja ploča se stanjuje sa početne debljine od 0.95 m uz stupove na debljinu 0.30 m u sredini raspona. Ovakav presjek se crta u SOFiPLUS-u, s tim da se na rubu konzole gdje je ograda neće uzimati u obzir zadebljanje kraja konzole. Nakon što se presjek nacрта dodijeli mu se materijal i nacрта se pretpostavljena minimalna armatura (linijski ili točkasto) kojoj se isto tako dodijeli materijal. Program ovu armaturu uzme kao minimalnu pri proračunu naprezanja i presječnih sila i uzima je u obzir pri proračunu krutosti betonskog presjeka u stadiju I i II. Svaki rub segmenta je zaseban presjek pa će tako za rasponsku konstrukciju trebati 13 presjeka, za stupove ukupno 6 (jedan za dno stupa jedan za vrh stupa).



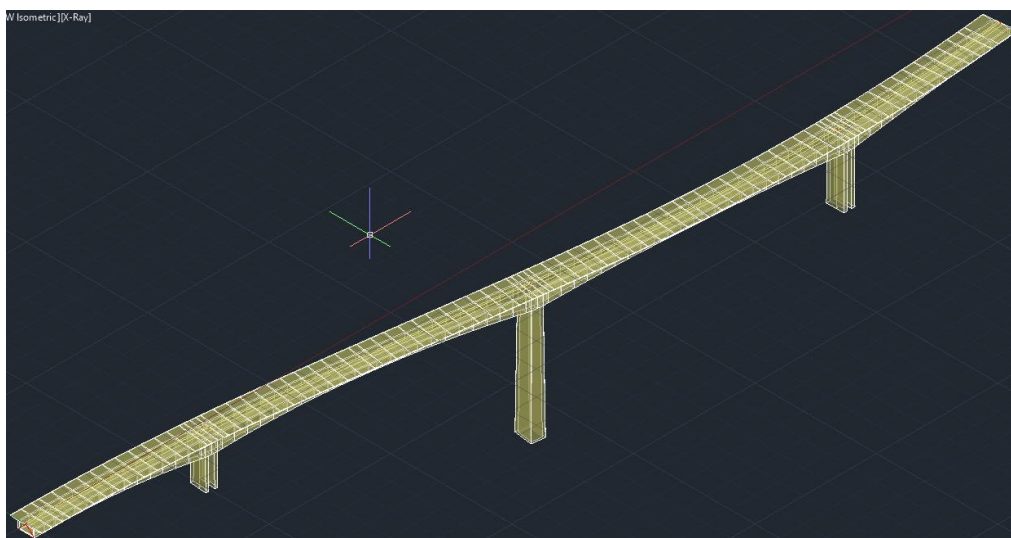
Slika 5 – Stvarni poprečni presjek



Slika 6 – Poprečni presjek u modelu

2.3 Konstrukcijske linije i veze

Nakon što su presjeci završeni mogu se formirati segmenti rasponske konstrukcije i stupovi. Svaki segment se sastoji iz početnog i krajnjeg presjeka, a program između pravi interpolirane presjeke. Cijeli model je linijski (nema naglavnice pilota i upornjaka) pa je svaki segment i stup linija sa različitim presjecima na početku i na kraju. Primjerice, segment 1 će na početku imati presjek 2 a na kraju presjek 3. Između njih program će automatski praviti interpolacije ovisno o tome na koliko dijelova podijeli jedan segment. Kod crtanja konstrukcijskih linija (segmenti i stupovi) potrebno je paziti na numeraciju. Nakon exporta modela u SSD (SOFiSTiK Structural Desktop) trebaju se napraviti faze gradnje i zbog toga svaki segment mora imati drugu grupu kako bi ih mogli sukcesivno paliti u fazama gradnje. Konstrukcijske linije vežemo za osovinu mosta između Placement-a i na ovaj način prave se točni segmenti kao što će biti i na stvarnom mostu. Jedina razlika je što se na stvarnom mostu najčešće segment i u krivini pravi poligonalno, a u ovome modelu oblik segmenta će točno pratiti osovinu mosta. Ovako smo dobili točan model mosta, još je potrebno da definiramo veze između upornjaka i rasponske konstrukcije, upornjaka i stupova, te stupova i tla. Na upornjacima se postavljaju veze (tzv. constraints) do stvarnog mjesta ležaja, a ležajevi se simuliraju elastičnim oprugama. Stupovi se povezuju za rasponsku konstrukciju vezama koje prenose svaki smjer sile i momenta i time se simulira upetost stupova u rasponsku konstrukciju. Stupovima se u dnu zadaju nepomicni ležajevi da se simulira upetost. Na slici 7 možemo vidjeti kako izgleda gotov model prikazan u 3D.



Slika 7 – Model mosta u 3D

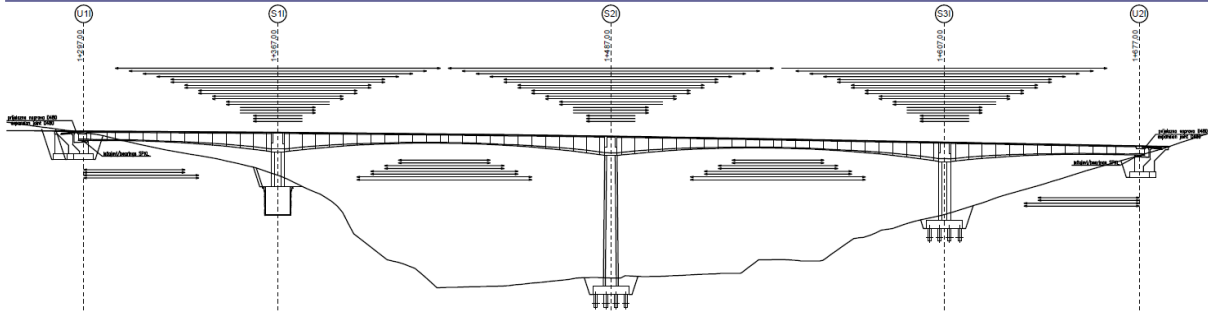


2.4 Kablovi za prednapinjanje

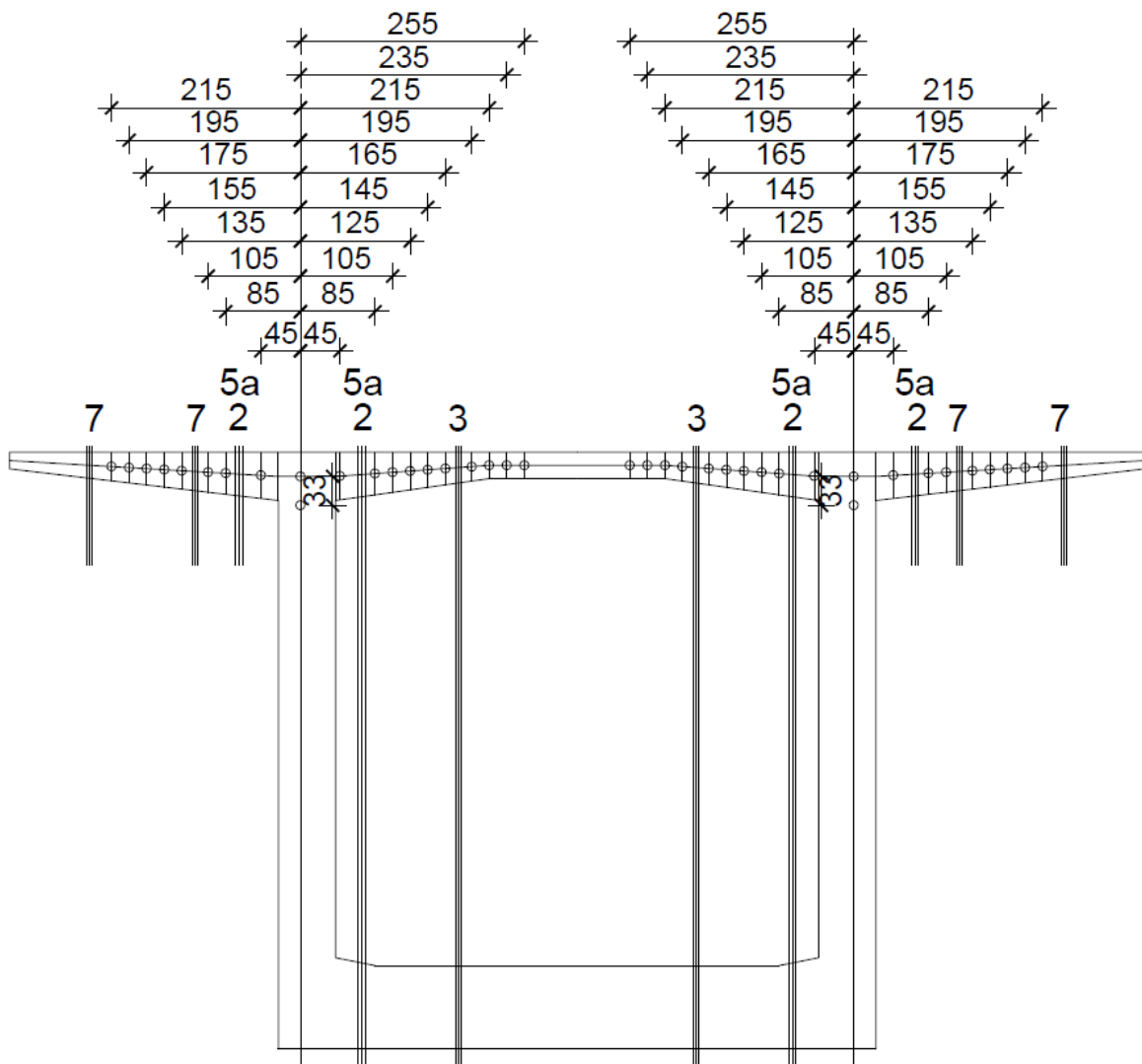
Kablovi za prednapinjanje su sastavni dio slobodno konzolne gradnje. U fazi gradnje kablovi se postavljaju u gornju ploču segmenata i nakon betoniranja se prednapinju da bi se suprostavili težini segmenata. Nastoji se odabrati optimalni broj kablova tako da pri prednapinjanju na vrhu ne bude vlačnog naprezanja, a da na dnu tlačno naprezanje ne premaši maksimalno dopušteno (u ovom slučaju za C40/50 je 18 Mpa). Nakon spajanja mosta u glavnim rasponima i prema upornjacima prednapinju se kablovi u donjoj ploči kako bi se smanjila potrebna armatura za savijanje u fazi kada je most spojen i pušten u promet. Često se na prvih dva ili tri segmenta po jedan kabal iz gornje ploče povije u rebro da bi pomogao u preuzimanju posmičnih sila. Taj kabal se treba spustiti barem do donje trećine presjeka. Poseban je problem pri postavljanju kablova zaobići rupe od krletke u rasponskoj konstrukciji mosta. Naime, pri postavljanju krletke ona se sidri u postojeći segment na kojem stoji. Rupe za sidrenje krletke se moraju ostaviti, a to često dovede u situaciju manjka prostora za postavljanje kablova u ploči. Zbog toga se kod većih raspona na prvim segmentima gdje prolazi više kablova prave zadebljanja gornje ploče da bi se smjestili dodatni kablovi. Cijela trasa kablova se u modelu treba provjeriti i potvrditi da niti jedan kabal nije u dodiru ili ne prolazi kroz rupu za sidrenje krletke. Preporučljivo je ostaviti jednu cijev praznu u slučaju da pri prednapinjanju ili nakon prednapinjanja neki kabal pukne. Tada se novi kabal može provući kroz rezervnu cijev i prednapeti.

Rasponska konstrukcija se prednapinje s kablovima smještenima unutar betonskog presjeka, koji se nakon napinjanja injektiraju mortom. Svaki kabal se sastoji od 19 užadi površine poprečnog presjeka 1.5 cm^2 što daje ukupnu površinu poprečnog presjeka kabla od 28.5 cm^2 . Užad je od visokovrijednog čelika 1600/1860 Mpa, s niskom relaksacijom koja iznosi 2.5% nakon 1000 sati pri naprezanju od $0.7 \cdot 1860 \text{ Mpa}$. Kablovi u gornjoj ploči do kraja trećeg segmenta se napinju jednostrano, dok se ostatak kablova napinje sa obje strane. Kablovi u donjoj ploči sanduka u glavnim rasponima se napinju dvostrano. Kablovi u rebrima napinju se dvostrano.

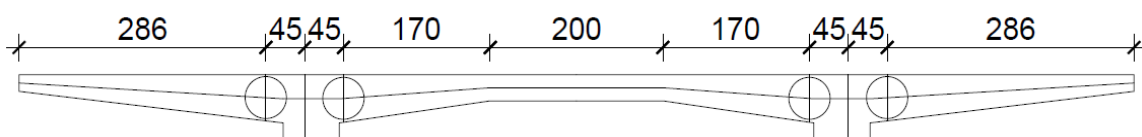
Ukupno ima 168 kablova, od kojih je 120 kablova za konzolnu gradnju koji se nalaze u gornjoj ploči i služe za fazu gradnje, a 48 kablova se nalazi u donjoj ploči i služi za fazu eksploatacije mosta. Nad svakim stupom u gornjoj zoni prolazi 40 kablova (iznad svakog rebra po 20) konzolne gradnje koji se sidre pojedinačno po segmentima. Na prvom i drugom segmentu sidri se po 6 kablova, od trećeg do sedmog segmenta sidre se po 4 kabla, a od sedmog do jedanaestog segmenta sidre se po 2 kabla. Razlog smanjenja kablova što se ide prema daljim segmentima je i smanjenje vlastite težine zbog manjeg poprečnog presjeka. U glavnim rasponima nalazi se po 16 kablova u donjoj ploči (8 na svakoj strani). Na svim segmentima gdje kablovi završavaju sidre se po 4 kabla. Kablovi se sidre u betonskim zadebljanjima što izlaze iz donje ploče na mjestu sidrenja. Na dijelovima od upornjaka prema stupovima nalazi se po 8 kablova (4 sa svake strane) koji prolaze kroz rebro poprečnog presjeka. U svakom presjeku sidre se po 4 kabla, a ovi kablovi se sidre u betonskim zadebljanjima uz rebro presjeka na mjestu sidrenja. U nastavku će se prikazati shema kablova i izgled svih kablova u rasponskoj konstrukciji (slika 8), te skice rasporeda i sidrenja kablova na određenim mjestima u konstrukciji.



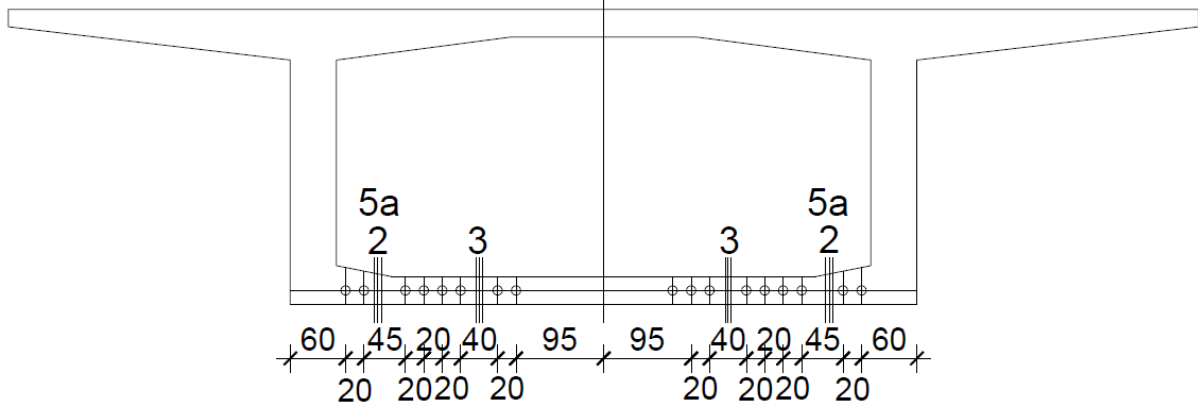
Slika 8 – Shema kablova



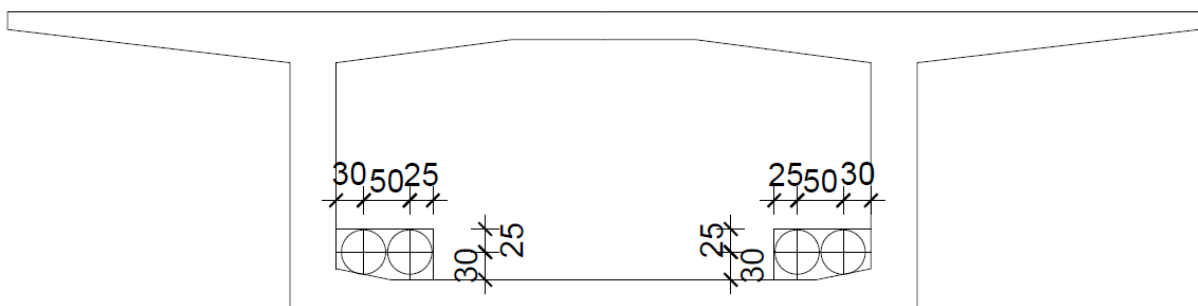
Slika 9 – Raspored kablova nad stupovima 2x20 (19x150 mm²)



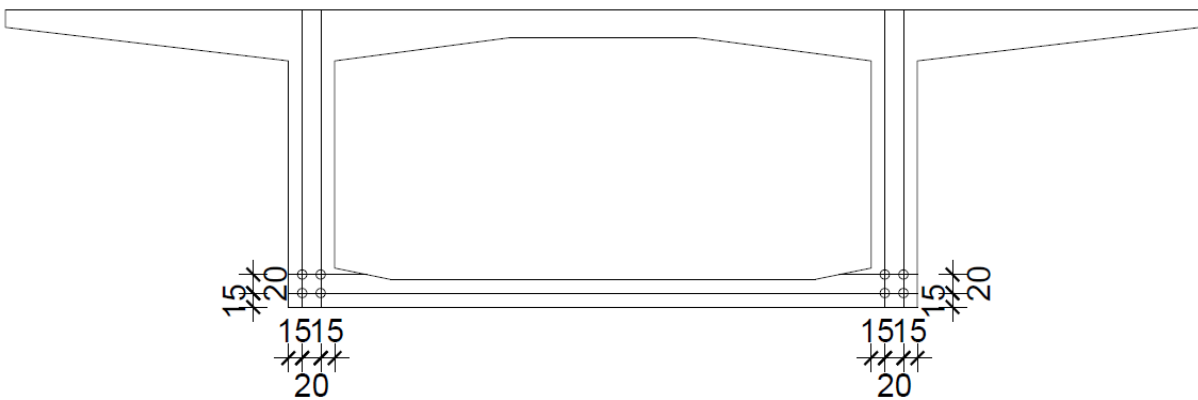
Slika 10 – Sidrenje kablova nad stupovima



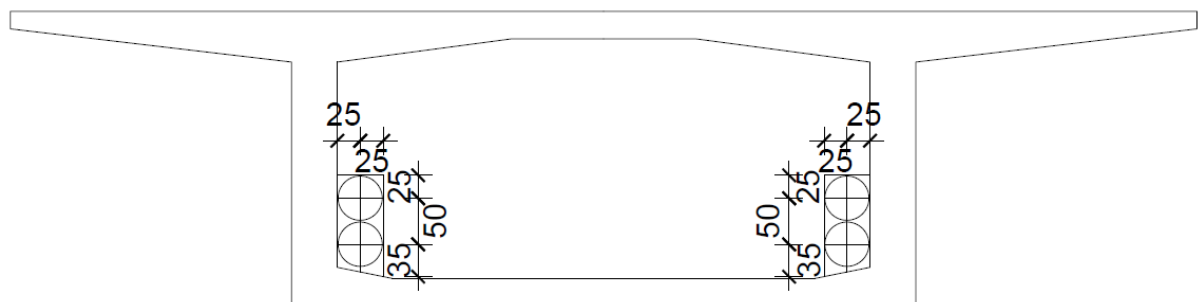
Slika 11 – Raspored kablova u donjoj ploči



Slika 12 – Sidrenje kablova iz donje ploče



Slika 13 – Raspored kablova u rebrima



Slika 14 – Sidrenje kablova u rebrima

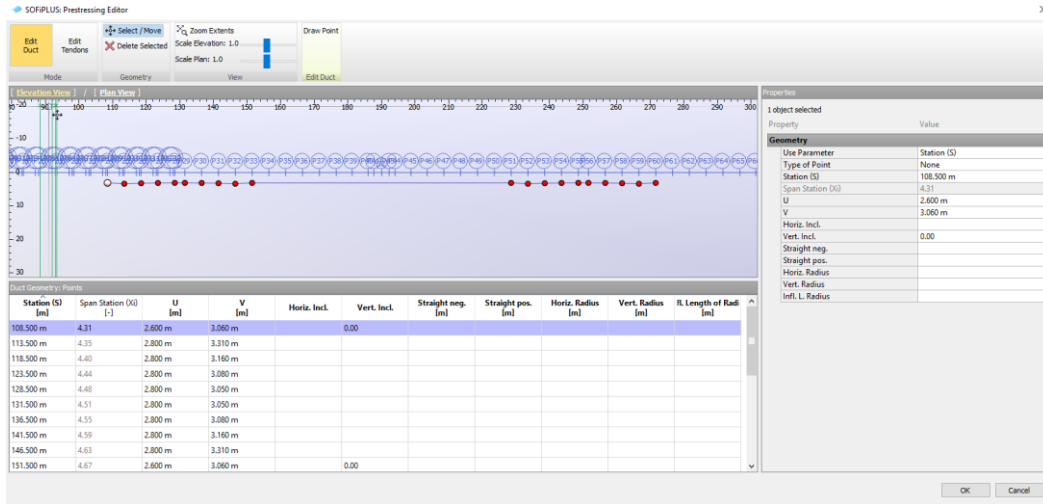


Modeliranje kablova za prednapinjanje počinje odabirom sustava prednapinjanja u SOFiPLUS-u. Odabire se proizvođač sustava, propisi po kojima se prednapinjanje kontrolira, presjek užeta, kvaliteta čelika i broj užadi u jednom kabelu. Nakon što se odaberu željene karakteristike program izračuna maksimalnu silu prednapinjanja preko Youngovog modula elastičnosti i karakteristika čelika uzimajući u obzir ograničenja prednapinjanja od propisa. U ovom slučaju uzet je sustav DYWIDAG po ETA propisima, Y1860S7B35, kabal sa 19 užadi. Program automatski uzima ograničenje početne sile prednapinjanja na $0.8 \cdot 1860$ ili $0.9 \cdot 1600$, te ograničenje sile nakon zaklinjenja na $0.75 \cdot 1860$ ili $0.85 \cdot 1600$ i daje maksimalnu silu prednapinjanja jednog kabla od 4104 kN. Program iz zadanog broja užadi u kابلu automatski uzima promjer cijevi za kabal, a moguće je promijeniti sve parametre kao što su: pomak klina kod zaklinjenja, gubitak na aktivnom i pasivnom sidru, kut skretanja, koeficijent trenja između natege i cijevi i maksimalni ekscentricitet u cijevi. Na slici 15 prikazan je postupak odabira sustava prednapinjanja.

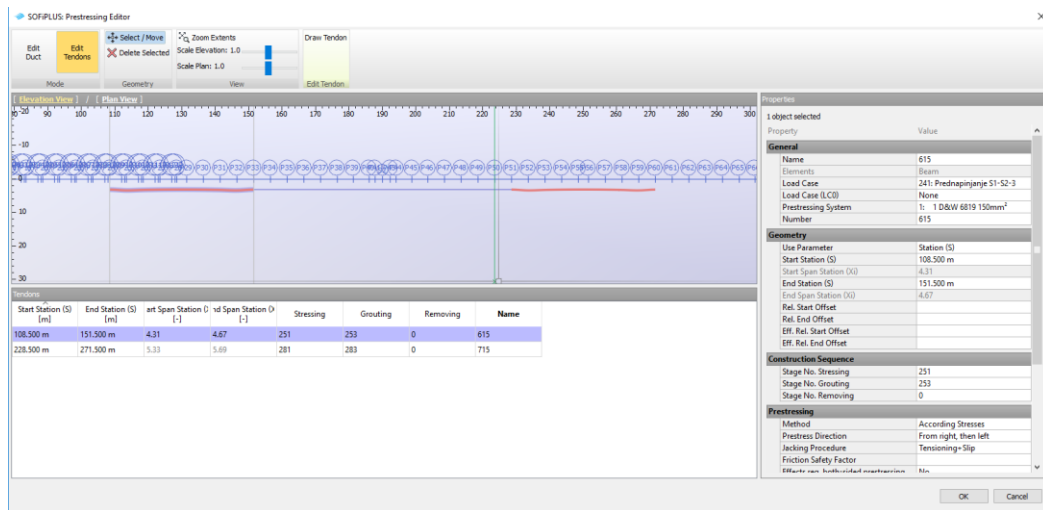
Parameter	Value	Unit
Slip at active anchor:	1.000	[mm]
Slip at coupler:	0.0	[mm]
Slip at passive anchor:	2.000	[mm]
Loss at active anchor:	2.400	[%]
Loss at coupler:	0.0	[%]
Loss at passive anchor:	0.0	[%]
Straight length at active anchor:	0.0	[cm]
Straight length at coupler:	0.0	[cm]
Straight length at passive anchor:	0.0	[cm]
Inner diameter of duct:	95.00	[mm]
Outer diameter of duct:	95.00	[mm]
Minimum radius of curvature:	6.800	[m]
Wobble coefficient:	0.290	[%/m]
Wobble coefficient (external prestress):	0.0	[%/m]
Friction coefficient (stressing):	0.200	[-]
Friction coefficient (release):	0.200	[-]
Maximum eccentricity in the duct:	4.000	[mm]

Slika 15 – Sustav prednapinjanja

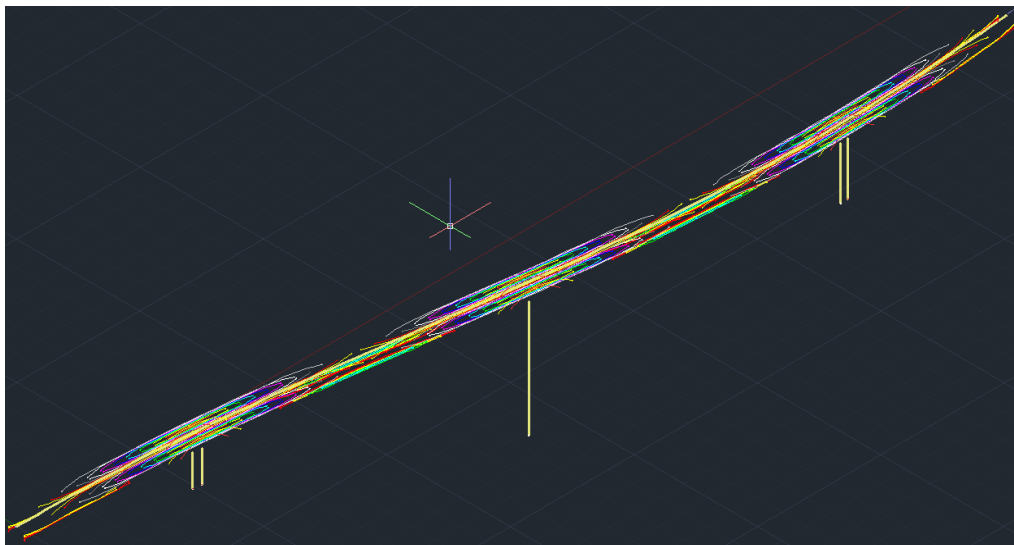
Nakon što je sustav prednapinjanja odabran može se pristupiti modeliranju kablova u konstrukciji. Zbog krivina na mostu i velikog broja kablova ručno crtanje kablova nije preporučljivo jer bi uzelo previše vremena. Drugi način crtanja kablova je preko PT Editor (Developed Geometry) gdje se cijev kabla veže za osovinu mosta (slika 16). Nakon toga se odrede neke točke skretanja cijevi, recimo na krajevima gdje znamo gdje će se kabal sidriti i na mjestima gdje kabal počinje skretati. Između ovih točaka program automatski zakrivi cijev kubičnim splineom, a na korisniku je da odabere u točkama nagib tangente i time kontrolira nagib. Cijev ovako cijelom dužinom prati točno osovinu mosta i skreće kako ona skreće, s tim da poštuje mjesta skretanja i sidrenja koja su zadana. Kada je cijev postavljena još ostaje da je ispunimo kablovima. Cijev se može protezati od početka do kraja mosta, ali ne mora cijela biti ispunjena kablovima. U ovom primjeru imamo 3 stupa nad kojima prolaze kablovi u potpuno istim položajima, pa možemo nacrtati jednu cijev koja ide iznad sva 3 stupa, a popuniti je kablovima samo na dijelovima gdje zapravo postoje. Nakon toga kablovima dajemo brojeve, zbog lakšeg raspoznavanja možemo ih označiti po stupovima, primjerice isto kabal na stupu S1 je 105, na stupu S2 je 205, a na stupu S3 je 305. Kod određivanja kablova osim broja zadajemo i način prednapinjanja, te stranu sa koje se prednapinje (slika 17). U ovom slučaju prva tri segmenta su prednapeta izmjenično jednostrano, a svi ostali kablovi su prednapeti dvostrano. Nema potrebe da posebno definiramo ograničenja sile jer program to automatski uzima u obzir preko propisa ETA što se kasnije vidi na dijagramu sila. Nakon postavljanja svih cijevi i kablova možemo pogledati 3D prikaz, na njemu posebnom bojom označiti kablove i prednapinjanja po segmentima i ujedno provjeriti i geometriju (slika 18).



Slika 16 – Postavljanje cijevi



Slika 17 – Popunjavanje cijevi kablovima



Slika 18 – 3D prikaz kablova



2.5 Opterećenja

Sa kablovima je u potpunosti definiran model konstrukcije mosta. Preostaje da se nanese sva opterećenja koja su propisana kao djelovanja na konstrukciju i koja će se kasnije kombinirati u SSD-u. Kako je već na početku modeliranja određen pravilnik Eurocode program nam dosta olakšava i sam uzima potrebne parcijalne koeficijente sigurnosti na strani opterećenja. Na projektantu je da odredi koje skupine opterećenja će imati (vlastita težina, dodatno stalno, slijeganje, prometno, vjetar sa prometom, vjetar bez prometa, snijeg, korisno u tijeku gradnje, incidentno, prednapinjanje, temperatura...). Nakon što su skupine opterećenja određene prave se pojedinačni slučajevi opterećenja (Loadcase) koji se svrstavaju u već navedene skupine. U ovom slučaju bit će analizirana sljedeća opterećenja:

1. Vlastita težina
2. Dodatno stalno
3. Temperatura
4. Slijeganje
5. Vjetar bez prometa
6. Vjetar sa prometom
7. Prednapinjanje
8. Puzanje i skupljanje
9. Težina krletke i svježeg betona u fazama gradnje
10. Promet – opterećenje koncentriranim silama
11. Promet – raspodjeljeno opterećenje
12. Kočenje

Vlastita težina kod ovakvog mosta je dominantno opterećenje zbog velikih presjeka stupova i rasponske konstrukcije. Dodatno stalno opterećenje sastoji se od težine betonskih ograda i čeličnog rukohvata na ogradi, betonskih vuta i dijafragmi, instalacija, odvodnje, hidroizolacije i asfalta koji se dodaju nakon spajanja mosta. Pri nanošenju opterećenja temperature na most kombinira se jednolika i linearno promjenjiva temperatura po visini sa određenim koeficijentima. Diferencijalno slijeganje u većini slučajeva ovisi o tlu i dopuštenom slijeganju, u ovom slučaju se uzima 1 cm. Vjetar bez prometa se odnosi na jaki vjetar kada promet vozila na mostu nije dozvoljen. Vjetar sa prometom je slabiji vjetar pri kojem se dozvoljava prometovanje preko mosta. Opterećenja vjetrom se nanose kao poprečno, uzdužno i upravno opterećenje pojedinačno. Prednapinjanje se odnosi na napinjanje kablova gornje i donje zone u fazama gradnje i po spajanju mosta. Puzanje i skupljanje su reološki procesi u betonu koji su neizbježni i moraju se uzeti u obzir. Puzanje je proces u kojem se pod konstantnim opterećenjem beton deformira zbog izlaska vode iz pora pod pritiskom. Skupljanje je proces gdje beton hidratacijom gubi vodu i smanjuje svoj obujam. Posebno su važni kod ovakvih mostova jer svaka promjena reologije uzrokuje promjenu nadvišenja segmenata, a poželjno je da se pri spajanju mosta niveleta što manje poravnava asfaltom. Reologija se detaljno uzima u obzir nakon svakog betoniranja segmenta kao i nakon određenih perioda nakon spajanja mosta. Program sam uzima u obzir padove sile prednapinjanja zbog promjene naprezanja od reologije. Težina krletke i svježeg betona se nanose na svaki položaj krletke, tj. na svakom segmentu. Kasnije se nakon importa u SSD-u definira kada se koje opterećenje od krletke i betona pali i gasi. Prometno opterećenje koncentriranim silama je zapravo opterećenje od teških vozila koje se postavlja po pravilniku Eurocode u glavnu i preticajnu voznu traku. Vozila su približno 60 i 40 tona i postavljaju se kao pokretno opterećenje na malom intervalu, u ovom slučaju to je 5 m. Prometno raspodjeljeno opterećenje po pravilniku iznosi 9 kN/m² u glavnoj traci i 2.5 kN/m² u ostalim trakama. Postavlja se šahovski da bi se dobio najveći utjecaj nad stupovima odnosno u sredini polja. Kočenje se zadaje kao raspodjeljeno opterećenje na cijeloj dužini mosta koje djeluje u smjeru vožnje.



Jedino opterećenje koje se ne zadaje u SOFiPLUS Load Case Manageru je seizmičko opterećenje. Seizmičko opterećenje se zadaje preko Taska „Earthquake“ u SSD-u, može se zadati za svaki smjer posebno a radi se spektralnom analizom. Samo opterećenje se zadaje preko ubrzanja podloge, a svi parametri tla, dodatnog opterećenja, primarnog opterećenja mogu se prilagoditi. U isto vrijeme sa potresnim opterećenjem radi se i modalna analiza za vlastite oblike. Na slici 19 vide se slučajevi opterećenja, a na slici 20 prikazan je izgled modela sa svim nanesenim opterećenjima. U 3D modelu možemo kontrolirati smjer i intenzitet opterećenja.

SOFiSTiK Loadcase Manager

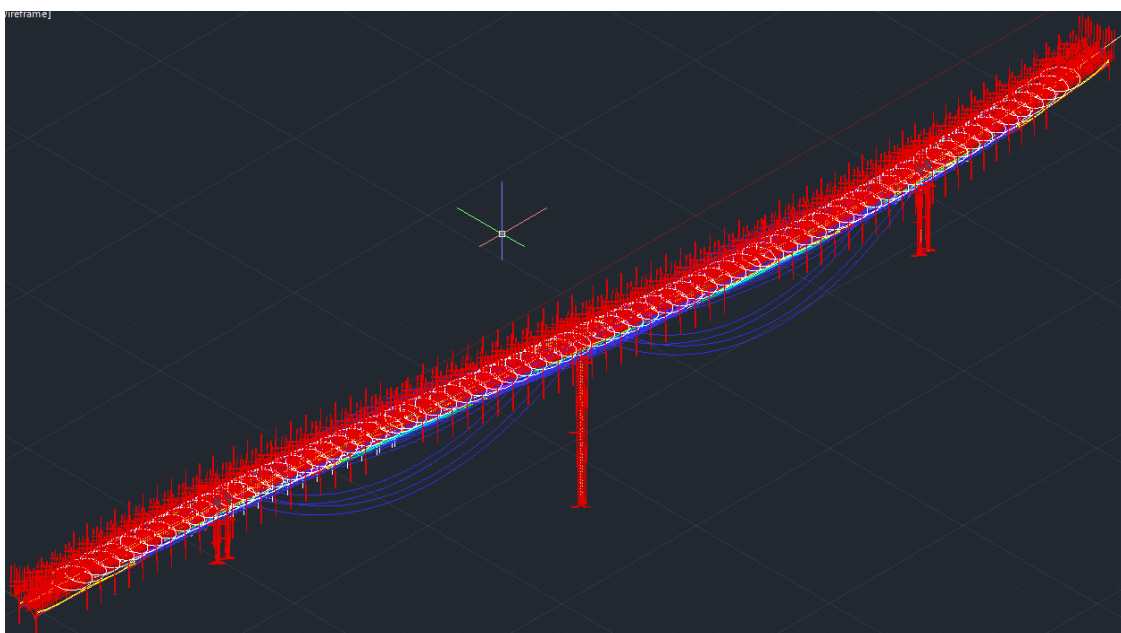
Nr	Title	Action	DLZ	$\gamma-u$	$\gamma-f$	$\gamma-a$	$\psi-0$	$\psi-1$	$\psi-2$	$\psi-1'$
1	Vlastita težina	G_1 dead load g1	1.00	1.35 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
2	Dodatno stal...	G_2 dead load g2	0.00	1.35 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
100	$\Delta TN, pos + \omega...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
101	$\Delta TN, pos + \omega...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
102	$\Delta TN, neg + \omega...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
103	$\Delta TN, neg + \omega...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
104	$\omega N \times \Delta TN, p...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
105	$\omega N \times \Delta TN, p...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
106	$\omega N \times \Delta TN, n...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
107	$\omega N \times \Delta TN, n...$	T temperature loadi...	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.60 (Action)	0.50 (Action)	0.80 (Action)
110	Slijeganje U1	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
111	Slijeganje S1	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
112	Slijeganje S2	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
113	Slijeganje S3	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
114	Slijeganje U2	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
120	Zamjena lezaj...	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
121	Zamjena lezaj...	F settlement	0.00	1.00 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)	1.00 (Action)
170	Vjetar bez pro...	W wind loading	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.20 (Action)	0.00 (Action)	0.60 (Action)
171	Vjetar bez pro...	W wind loading	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.20 (Action)	0.00 (Action)	0.60 (Action)
172	Vjetar bez pro...	W wind loading	0.00	1.50 (Action)	0.00 (Action)	1.00 (Action)	0.60 (Action)	0.20 (Action)	0.00 (Action)	0.60 (Action)

Use global deadload directions Increment loadcases automatically from selected on

EuroNorm EN 1992 (2004) Concrete Structures

OK Cancel Help

Slika 19 – Slučajevi opterećenja



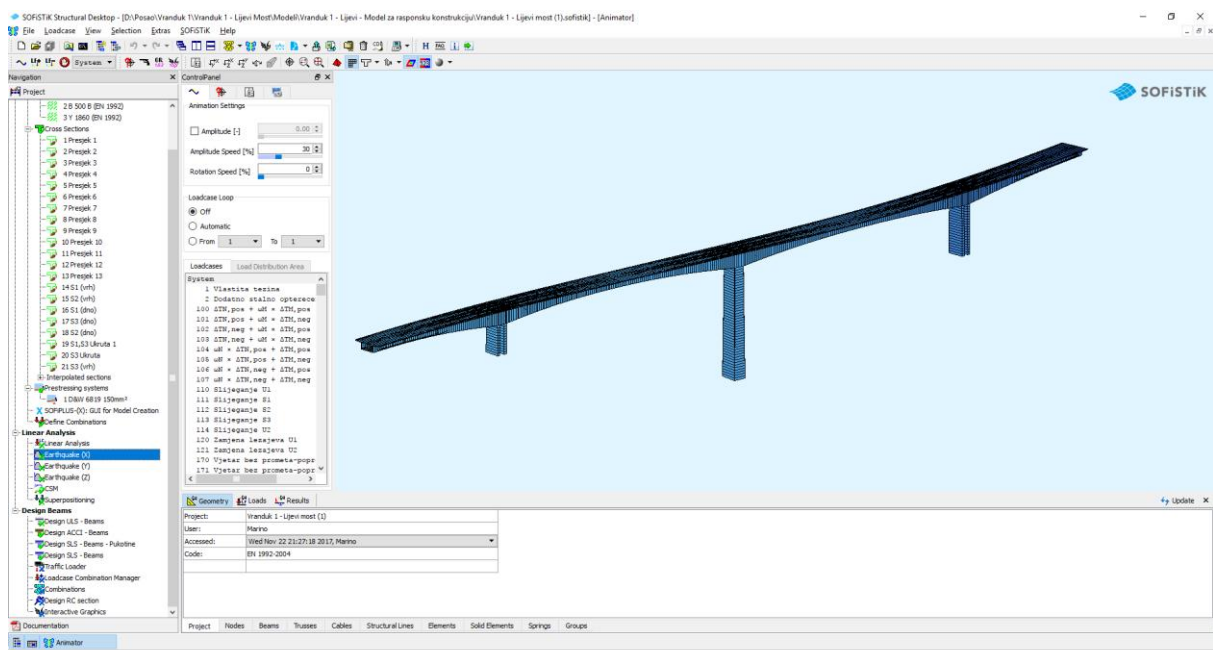
Slika 20 – Sva nanesenana opterećenja u 3D modelu



3. PRORAČUN

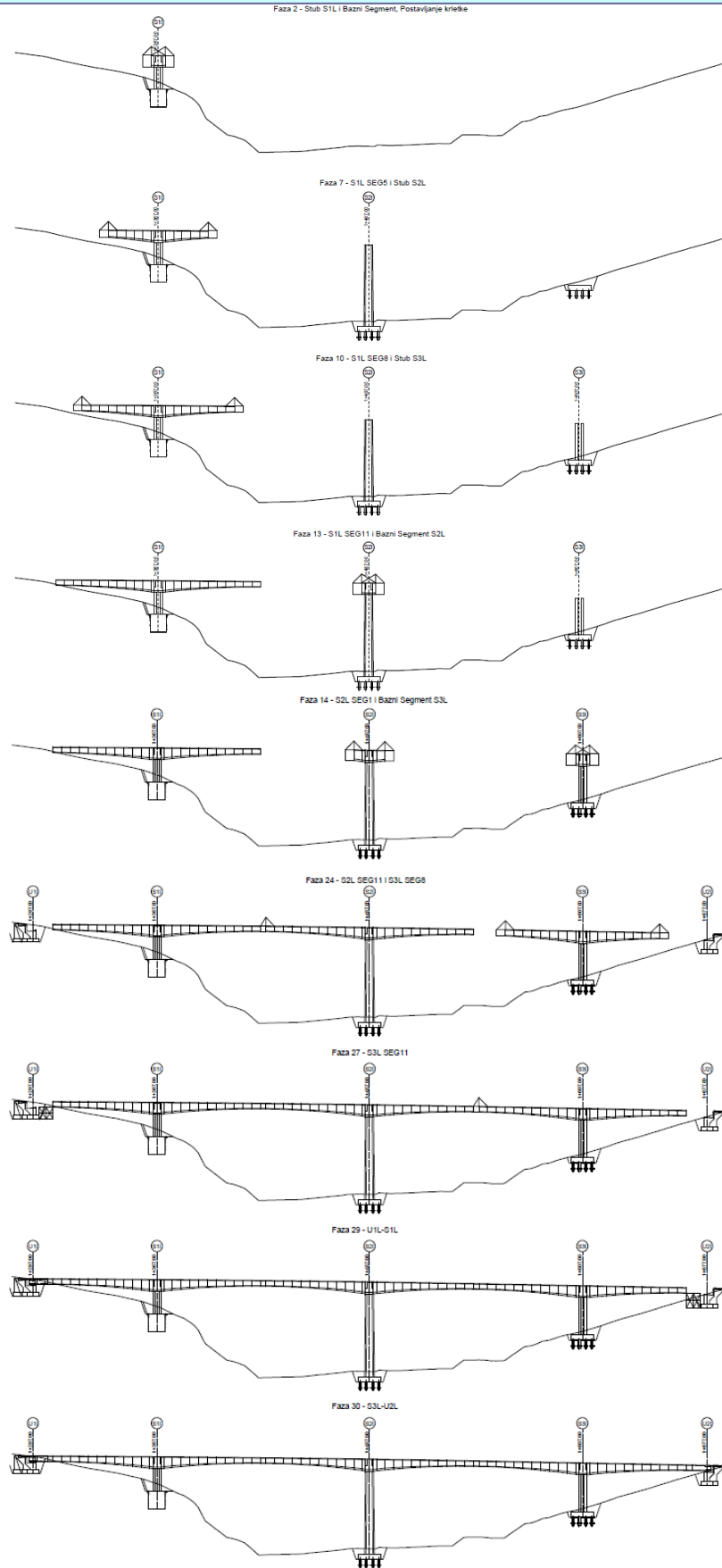
3.1 Faze gradnje

Nakon što je model u potpunosti izrađen u SOFiPLUS-u potrebno ga je izvesti u SSD. Ovim korakom program prebacuje konstrukcijske linije i uvjete oslanjanja u konačne elemente i daje im broj i veze sa ostalim elementima. Opterećenja koja smo nacrtali se prebacuju na te elemente i generiraju se kablovi za prednapinjanje. Veličinu konačnih elemenata program određuje automatski ali projektant ima mogućnost da ručno unese željenu veličinu konačnog elementa. Nakon što se export završi program SOFiPLUS može se zatvoriti, a u SSD-u će se u animatoru prikazati 3D model mosta sa svim elementima. U ovoj fazi može se provjeriti geometrija u animatoru. Na lijevoj strani nalaze se grupe u kojima se nalaze zadaci. Grupe se dijele na sustav, linearnu analizu i dimenzioniranje. U bilo kojem trenutku mogu se ubaciti razni zadaci potrebni za analizu i proračun konstrukcije. Neki zadaci su zadani već na početku (materijali, presjeci, linearna analiza, kombinacije, superpozicija...) a neki se moraju ručno napraviti (potres, CSM, dimenzioniranje...). Na slici 21 prikazan je izgled korisničkog sučelja SSD-a kao i model u animatoru.



Slika 21 – Korisničko sučelje SSD-a i animator

Najbitnija stvar za ovaj tip mosta je da se pravilno odrede faze gradnje. Prije nego što se pristupi stvaranju faza u SSD-u potrebno je unaprijed pripremiti približnu dinamiku gradnje mosta. Dinamika gradnje ovisi od opreme i ovisi od ostalih raspoloživih resursa. U ovom primjeru pretpostavka je da se most radi sa dva para krletki, kao i da postoji po jedna grupa specijaliziranih radnika (grupa za temelje, grupa za stupove...). Na ovaj način postavljena su neka ograničenja, na primjer da se ne može raditi temelj stupa S2 dok se ne završi temelj stupa S1. Određeno je da se most gradi u smjeru stacionaža, tj. gradnja počinje na stupnom mjestu S1 a završava na S3. Najlakši način da se napravi dinamika građenja je da se u programu Microsoft Project napišu aktivnosti i njihovo trajanje, a nakon toga se odrede veze između aktivnosti. Ovo može biti podloga za pravljenje faza gradnje u SSD-u. Na slici 22 je prikazano postupno građenje mosta po fazama.



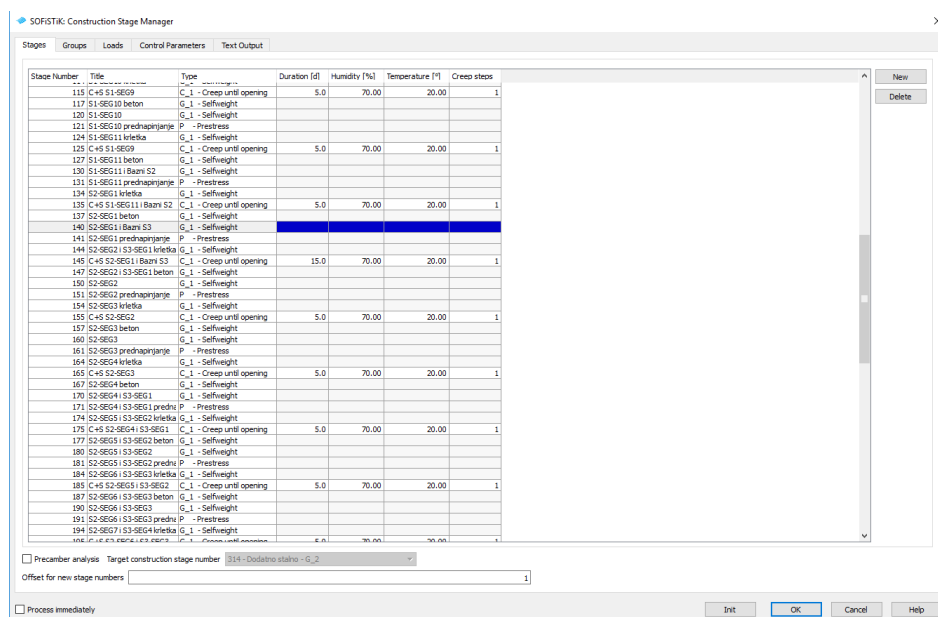
Slika 22 – Faze izgradnje mosta



Faze izgradnje su napravljene i može se pristupiti CSM zadatku. CSM (Construction Stage Manager) je zadužen za fazno građenje konstrukcije. U njemu se može odrediti koji dio konstrukcije se aktivira u nekom trenutku, kada se aktivira vlastita težina, kada se aktivira krutost a isto tako možemo do neke faze aktivirati i deaktivirati opterećenja. Da bi počeli sa aktivacijom segmenata i stupova prvo moramo napraviti neke faze gradnje. U slučaju konzolnog mosta faze gradnje su izgradnja stupa, izgradnja baznog dijela na vrhu stupa, izgradnja svakog segmenta pojedinačno, te izgradnja spojnih segmenata i dijelova na skeli uz upornjak. U ovom dijelu ćemo napraviti iste faze gradnje koje smo pravili u Projectu, obraćajući pozornost na točan redoslijed gradnje segmenata. Uobičajeno, izgradnja jednog segmenta se sastoji iz pet različitih faza. Uzmimo za primjer da se izgradio segment broj 3 a gledamo faze do aktiviranja segmenta 4 na stupu S1. Faze idu sljedećim redoslijedom:

50	S1-SEG3	- aktiviranje segmenta 3, krutost i težina
51	S1-SEG3 prednapinjanje	- prednapinjanje segmenta 3
54	S1-SEG4 krlетка	- pomak krlетke na rub 3. segmenta za izradu 4.
55	C+S S1-SEG3	- korak puzanja i skupljanja konstrukcije (5 dana)
57	S1-SEG4 beton	- težina svježeg betona, bez krutosti segmenta 4
60	S1-SEG4	- očvršćavanje betona, aktiviranje segmenta 4

Na ovaj način se naprave faze za izgradnju cijelog mosta kojih u ovom slučaju ima 315. Na kraju se doda faza dugoročnog puzanja i skupljanja, često za vrijeme od 30000 dana (grubo oko 82 godine). Nakon što smo napravili faze, svakoj fazi pridružujemo aktiviranje određenog segmenta, primjerice fazi 50 pridružujemo aktiviranje konstrukcijske linije segmenta 3. Na isti način aktiviramo i terete, pa tako fazi 51 pridružujemo kablove za prednapinjanje segmenta 3 na stupu S1, fazi 54 pridružujemo teret krlетke za taj položaj koji se gasi na fazi 64 kada se krlетка pomakne, fazi 57 pridružujemo teret svježeg betona segmenta 4 koji se gasi kada se S1-SEG4 aktivira. Između toga kroz faze xx5 program računa puzanje i skupljanje sustava i prilagođava rezne sile i naprezanja, kao i gubitak sile prednapinjanja. Program automatski stavlja faze gradnje u rezultate dok se most ne završi, tj. dok ne dođe do zadnje faze (u ovom slučaju 315). U rezultatima stavlja kumulativne faze gradnje u 4000, pojedinačne razlike između faza u 5000, a naprezanja iz faza gradnje u 7000.



Slika 23 – Faze gradnje u CSM-u



3.2 Kombinacije

Kombinacije opterećenja se prave za granična stanja uporabivosti i nosivosti. Pravilnik Eurocode propisuje pravila kombinacije različitih opterećenja za ova stanja po vjerojatnosti istovremene pojave. U ovom radu se neće detaljno opisivati pravila kombiniranja jer ih ima mnogo, ali će se nabrojati kombinacije za različita granična stanja. U graničnim stanjima nosivosti u obzir se uzimaju parcijalni koeficijenti sigurnosti kao i koeficijenti kombiniranja. U graničnim stanjima uporabivosti u obzir se uzimaju samo koeficijenti kombiniranja, dok je parcijalni koeficijent sigurnosti 1.0.

Kombinacije za granično stanje nosivosti:

1. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C+1.0F+1.5H+1.5*0.6*0.6T$
2. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C+1.0F+1.5Q(TS)+1.5q(UDL)+1.5*0.6ZW$ – promet lijevo
3. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5Q(TS)+1.5q(UDL)+1.5*0.6ZW$ – promet desno
4. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5ZW+1.5*0.75Q(TS)+1.5*0.4q(UDL)$ – promet lijevo
5. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5ZW+1.5*0.75Q(TS)+1.5*0.4q(UDL)$ – promet desno
6. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5W$
7. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5*0.6T+1.5*0.75Q(TS)+1.5*0.4q(UDL)$ – promet lijevo
8. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5*0.6T+1.5*0.75Q(TS)+1.5*0.4q(UDL)$ – promet desno
9. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5Q(TS)+1.5q(UDL)+1.5*0.6*0.6T$ – promet lijevo
10. $1.35G+1.0P+1.0*0.6C +1.0F+1.5Q(TS)+1.5q(UDL)+1.5*0.6*0.6T$ – promet desno
11. $1.0G+1.0P+1.0*0.6C +1.0E(X)+0.3E(Y)+0.3E(Z)$
12. $1.0G+1.0P+1.0*0.6C +0.3E(X)+1.0E(Y)+0.3E(Z)$
13. $1.0G+1.0P+1.0*0.6C +0.3E(X)+0.3E(Y)+1.0E(Z)$

Kombinacije za granično stanje uporabivosti:

Kvazi-stalna:

1. $1.0G+1.0P+1.0C+0.5T$

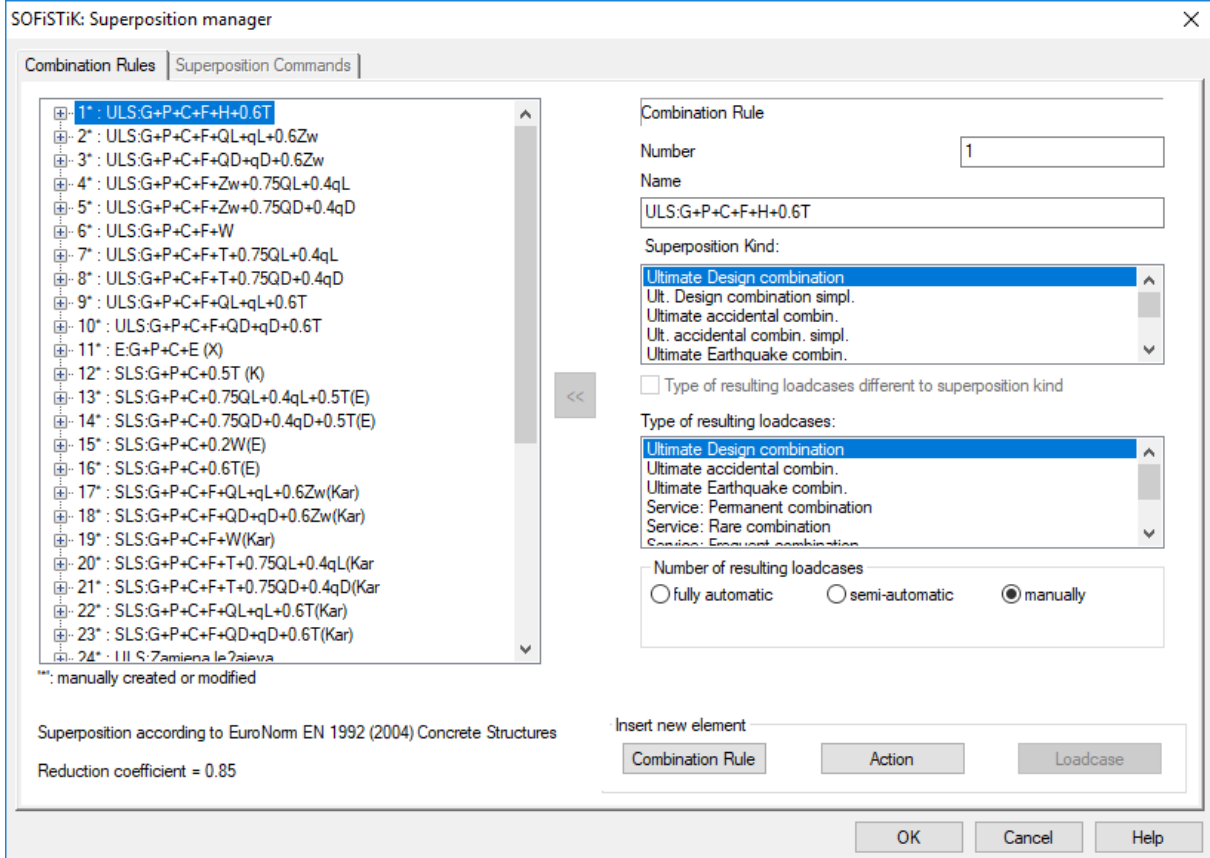
Česta:

1. $1.0G+1.0P+1.0C+0.75Q(TS)+0.4q(UDL)+0.5T$ – promet lijevo
2. $1.0G+1.0P+1.0C+0.75Q(TS)+0.4q(UDL)+0.5T$ – promet desno
3. $1.0G+1.0P+1.0C+0.2W$
4. $1.0G+1.0P+1.0C+0.6T$

Karakteristična:

1. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+Q(TS)+q(UDL)+0.6ZW$ – promet lijevo
2. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+Q(TS)+q(UDL)+0.6ZW$ – promet desno
3. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+W$
4. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+T+0.75Q(TS)+0.4q(UDL)$ – promet lijevo
5. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+T+0.75Q(TS)+0.4q(UDL)$ – promet desno
6. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+Q(TS)+q(UDL)+0.6T$ – promet lijevo
7. $1.0G+1.0P+1.0C+1.0F+Q(TS)+q(UDL)+0.6T$ – promet desno

Program olakšava izradu kombinacija preko zadatka „Define Combinations“. U njemu se može odabrati pravi li se kombinacija za granično stanje nosivosti ili uporabivosti i koeficijenti se uzimaju automatski. Svi slučajevi opterećenja se mogu ubaciti u kombinaciju, a koeficijente je moguće i ručno izmijeniti ukoliko bude potrebno. Na slici 24 prikazan je zadatak „Define Combinations“.



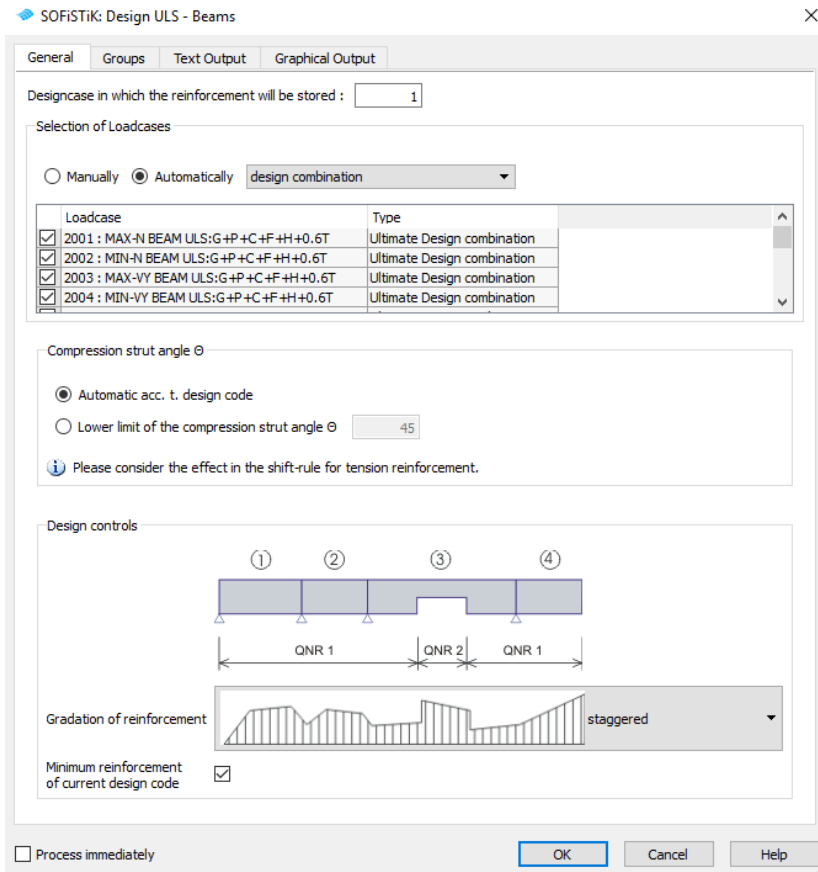
Slika 24 – Kombinacije

3.3 Granično stanje nosivosti i uporabivosti

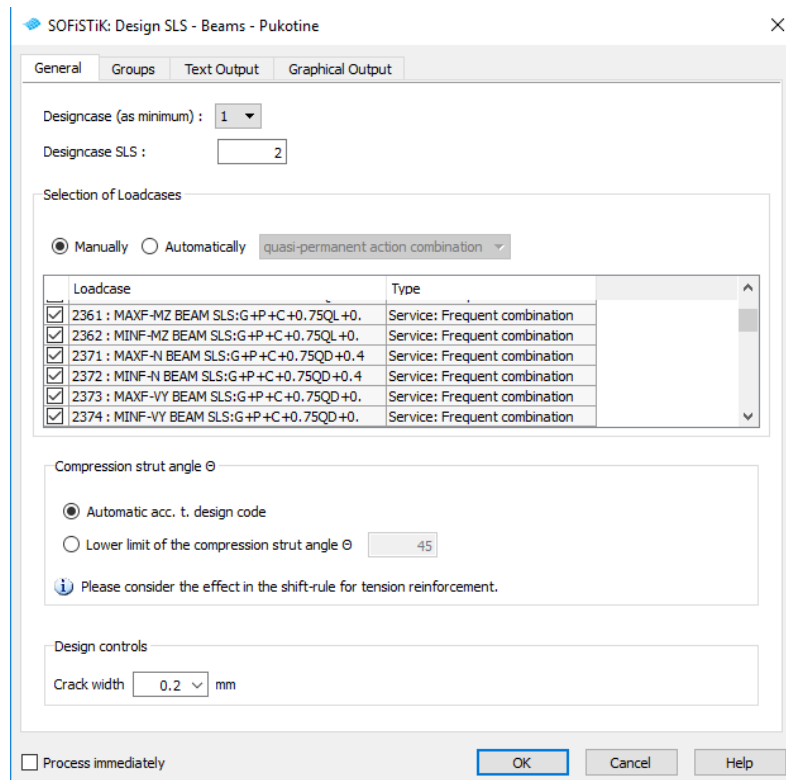
Za kraj je ostalo traženje armature u rasponskoj konstrukciji i u stupovima, kao i provjeru naprezanja i pukotina. Konstrukciju treba izračunati na kombinacije iz prošlog poglavlja.

Za granično stanje nosivosti provjere se sve kombinacije i kao rezultat trebala bi se dobiti uzdužna armatura u svim layerima, kao i posmična armatura u oba pravca i torziona armatura u oba pravca. Kut rešetke pri proračunu posmične armature se uzima 45 stupnjeva, ali moguće ga je promijeniti ručno. Pri proračunu armature u obzir se uzima i minimalna armatura koju smo već postavili u presjecima, a moguće se i odrediti na to da program automatski računa minimalnu armaturu za svaki presjek. Projektantu se ostavlja mogućnost da odabere koje grupe elemenata želi proračunati, s tim da je default na svim elementima. Granično stanje nosivosti podrazumijeva i provjeru na potresno opterećenje. S obzirom na to da se potresno opterećenje uzima sa koeficijentima 1.0 ono spada u seizmičke kombinacije koje se provjeravaju u posebnom zadatku „Design ACCI – Beams“. Na slici 25 prikazan je zadatak „Design ULS – Beams“ koji je zadužen za proračun armature u graničnom stanju nosivosti greda (ULS – Ultimate Limit State).

Za granično stanje uporabivosti provjeravaju se naprezanja i pukotine. Za kvazistalne kombinacije provjerava se tlačno naprezanje koje ne bi trebalo prijeći 45% od tlačne čvrstoće betona u svim elementima i provjeravaju se pukotine u AB elementima (stupovima) koje su ograničene na 0.3 mm. Za česte kombinacije provjeravaju se pukotine u prednapetom betonu koje su ograničene na 0.2 mm. Za karakteristične kombinacije provjerava se tlačno naprezanje u betonu koje ne smije prijeći 60% tlačne čvrstoće betona. Ovo se provjerava zadatkom „Design SLS – Beams“ koji je prikazan na slici 26.



Slika 25 – Izgled zadatka „Design ULS – Beams“



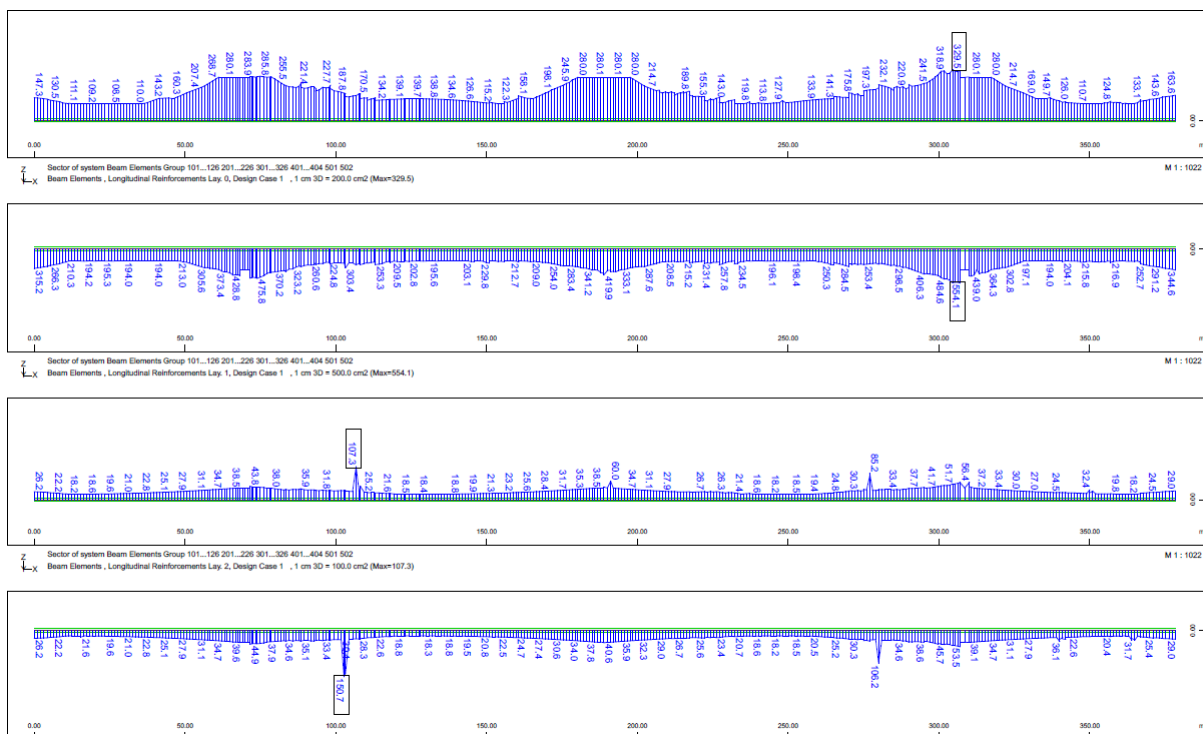
Slika 26 – Izgled zadatka „Design SLS – Beams“



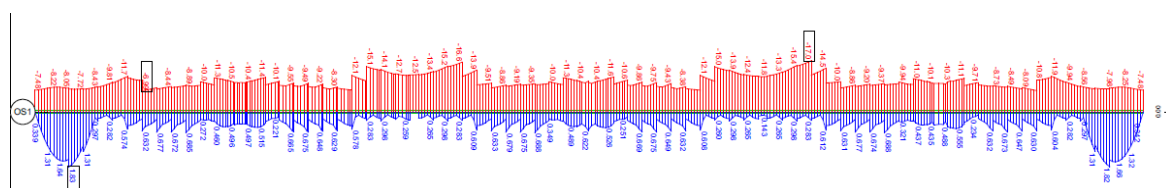
3.4 Pregled rezultata

Nakon proračuna slijedi pregledavanje rezultata i stvaranje izvještaja. U rezultatima trebamo naći potrebnu armaturu za svaki layer armature u poprečnom presjeku. S obzirom na to da je konstrukcija prednapeta očekujemo manji udio meke armature u svim područjima poprečnog presjeka. Osim savojne armature trebamo pogledati i armaturu od posmika i torzije. Kod ovakvih mostova, zbog idealiziranog i nestvarnog vezanja stupa i rasponske konstrukcije često se javi problem posmika u točki u kojoj se stup veže. Razlog tomu je veliko naprezanje na mjestu koje u stvarnoj konstrukciji zapravo ne postoji zbog stvarne dimenzije stupa. Naime, u modelu stup je linija isto kao i rasponska konstrukcija, no u stvarnosti i stupovi i rasponska konstrukcija se sastoje od ploča/zidova. To znači da će se utjecaj u području spoja stupa i rasponske konstrukcije u stvarnoj konstrukciji izgubiti. U dijagramima armature može se provjeriti ukoliko dođe do povećanja armature iz uvjeta ograničenja pukotina.

Naprezanja se moraju provjeriti za faze gradnje i za granično stanje uporabivosti. Za faze gradnje bitno je da naprezanja budu ograničena na 45% konačne tlačne čvrstoće betona ili na 60% tlačne čvrstoće betona u trenutku prednapinjanja. Provjerava se i zadovoljavanje rastlačenja (da nema zatezanja u zoni kablova pri prednapinjanju). Za granično stanje uporabivosti naprezanja se provjeravaju po već navedenim kriterijima.



Slika 27 – Dijagrami armature



Slika 28 – Dijagram naprezanja



4. OSVRT NA DALJNJE MODELE

Sa ovime bi završio posao na modelu za proračun rasponske konstrukcije jednog konzolnog mosta, no posao još nije gotov. Da bi u potpunosti analizirali most koji se gradi slobodno konzolno moramo napraviti poseban model za stupove. U tom modelu možemo u graničnom stanju nosivosti izmijeniti koeficijente kombiniranja prisilnih deformacija temperature i puzanja i skupljanja kako bi dobili realnije rezultate za dimenzioniranje stupova.

Osim toga trebaju se i napraviti modeli konzolne gradnje, gdje se u svakom modelu pravi pojedinačno stupno mjesto koje se onda izlaže opterećenjima nesimetričnog vjetrova i incidentne situacije gdje na jednoj strani na mostu stoji krletka i tek izbetoniran segment, a na drugoj stranu se dogodi pad krletke. U ovom razmatranju kao dodatna sigurnost beton jedne strane konzole se uzima kao sa 5% više težine, a beton sa druge strane sa 5% manje težine.

Model za temelje je najkompliciraniji jer treba sadržavati sve elemente mosta. To znači da se treba izmodelirati sve što smo radili u prethodnim modelima, s tim da se prave još i upornjaci, temeljne ploče, naglavne ploče za pilote, bunari i piloti. Poseban je izazov ispravno povezati konstrukciju pilota sa naglavnom pločom a zatim povezati naglavnu ploču za dno stupa. U ovom slučaju u modelu se miješaju linijski BEAM elementi (stup i piloti) sa pločastim QUAD elementima (naglavna ploča). Povezivanje se može uraditi na više načina ali je bitno da se održi realno ponašanje konstrukcije i prenošenje opterećenja. Osim toga u ovom modelu potrebno je i modelirati tlo, a samim time i interakciju između tla i pilota odnosno bunara. Iz ovog modela dalje moramo temeljne konstrukcije vratiti u model konzolne gradnje gdje ćemo i temeljnu konstrukciju provjeriti na incidentne situacije u tijeku gradnje.

Nadalje, ukoliko su stupovi visoki, trebao bi se napraviti posebni model u kojem će se obraditi teorija drugog reda. Rezultate koje dobijemo iz ovog modela trebamo usporediti sa rezultatima iz prošlih modela i uzeti najveću armaturu za stupove.

Posebno se radi i model za pomake ležajeva i prijelaznih naprava iz razloga što se u tom modelu uzimaju drukčije kombinacije.

Na kraju trebamo znati da je na svim prethodnim modelima gledan globalni nosivi sustav i određena uzdužna armatura i naprezanja u globalnom sustavu. Neke lokalne stvari moraju se posebno provjeriti, tako se pravi pločasti model raspona gdje se sanduk rasponske konstrukcije modelira pločastim QUAD elementima i izlaže sličnim opterećenjima kao i ranije u cilju dobijanja poprečne armature. Moguće je da se u nekim slučajevima i visoki stupovi pa čak i veći dijelovi rasponske konstrukcije modeliraju pločastim elementima kako bi se dobili točniji rezultati armature i jeftinija konstrukcija. U ovim modelima mogu se dodati i dijafragme na spoju stupa sa rasponskom konstrukcijom.

Jako je bitno da se analizira što se vrijedi točnije proračunati. Ukoliko znamo da je neki dio konstrukcije moguće točnije proračunati te da će se na tome dobiti veća sigurnost i uštede uz manje truda sigurno da je bolje da se to i uradi. Ali s druge strane, ako znamo da se točnijim modeliranjem neće ništa bitno promijeniti, često se ne isplati trošiti vrijeme na ponovno modeliranje. Ove procjene se ostavljaju samom projektantu objekta.



5. LITERATURA

1. Mathivat,J.: *The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges*, A. Wiley-Interscience Publication, Pariz, 1979.
2. Grupa autora: *Design guide – Prestressed concrete bridges built using the cantilever method*, Setra, 2003.(2007.)
3. BS EN 1992-1-1:2004, *Design of concrete structures, general rules and rules for buildings*, 2004.
4. BS EN 1992-2:2005, *Design of concrete structures, concrete bridges, design and detailing rules*, 2005.
5. Jurišić,M., Glibić M.: Diplomski rad, *Izrada dijela glavnog projekta za most Vranduk 1 Lijeve na AC koridor Vc*
6. SOFiSTiK AG – FEM, BIM and CAD Software for Structural Engineers, <https://www.sofistik.com/>, 23.11.2017.