

UNIVERZITET U NIŠU
GRADJEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET

Mr Dragan Kostić

**PRILOG REŠENJU PROBLEMA
STABILNOSTI
DVOPOJASNIH LANČANIČNIH SISTEMA**

doktorska disertacija

Niš, 2007.

Izradom ove doktorske disertacije rukovodila je dr Grozdana Radivojević, redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu. Najtoplije joj se zahvaljujem na podršci, strpljenju, pomoći, sugestijama i pozitivnoj energiji kojom je zračila, bez obzira na njeno narušeno zdravlje.

Ideja za izradu ovog rada realizovana je zahvaljujući svesrdnoj stručnoj i moralnoj podršci koju mi je pružio u periodu formulisanja i izrade disertacije dr Ljubomir Vlajić, redovni profesor Građevinskog fakulteta u Subotici Univerziteta u Novom Sadu. Takođe, eksperimentalni deo disertacije realizovan je zahvaljujući njemu.

Dr Mirku Aćiću, redovnom profesoru (u penziji) Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu dugujem veliku zahvalnost na njegovom stalnom praćenju mog rada, a naročito za stručno i naučno usmerenje ka temi koju sam obradio.

Koristim priliku da se zahvalim svim kolegicama i kolegama koji su mi na bilo koji način pomogli prilikom izrade ovog rada u svim fazama njegovog nastanka.

Svojoj porodici zahvaljujem na strpljenju, razumevanju, podršci, i pomoći da svakog dana povučem bar po jednu crtu.

Autor,

NULLA DIES SINE LINEA

PRILOG REŠENJU PROBLEMA STABILNOSTI DVOPOJASNIH LANČANIČNIH SISTEMA

Rezime

Rad je teorijsko-eksperimentalnog karaktera. Dvopojasni lančanični sistemi su elastične viseće konstrukcije za pokrivanje velikih raspona. Usled dejstva spoljašnjeg opterećenja, ovi sistemi su skloni ljuljanju, pa je osnovni problem stabilisanje za moguće kombinacije realnih opterećenja. Najefikasniji i najprimenjivaniji način stabilisanja dvopojasnih lančaničnih sistema je prednaprezanje.

U radu su prikazani osnovni pojmovi, istorijat i dosadašnja teorijska i praktična dostignuća u oblasti visećih prethodno napregnutih sistema, kao i prilog rešenju problema stabilnosti visećih dvopojasnih i prethodno napregnutih lančaničnih sistema. Sprovedena istraživanja i analize, nedvosmisleno ukazuju na praktične rezultate za rešenje problema stabilnosti kablovskih rešetki.

Doprinos rešenju problema stabilnosti sadržan je u Zaključcima, koji su proistekli iz istraživanja autora:

- Analitičko-numerički model statičkog proračuna,
- Kriterijumi dinamičke stabilnosti visećih konstrukcija,
- Analiza definisanih modela tip "D" i "V" po kriterijumima za dinamičku stabilnost i preporuke za minimalne nivoe njihovog prednaprezanja,
- Uspostavljanje metodologije najracionalnijeg proračuna kablovskih rešetki,
- Definisanje vetra kao harmonijskog i udarnog dejstva na viseće konstrukcije.

Ključne reči:

Viseće konstrukcije, kablovske rešetke, prednaprezanje, stabilnost, dinamički uticaj vetra

CONTRIBUTION TO THE SOLUTION OF THE STABILITY PROBLEM OF THE DOUBLE LAYERED CATENARY SYSTEMS

Summary

The paper is theoretical and practical. The double layered catenary systems are elastic suspended structures aimed at bridging great spans. Under the action of external load, these systems are prone to swinging, so the basic problem is making them stable for the potential combinations of real loads. The most efficient and most applied way of stabilization of double layered catenary systems is prestressing.

The paper lays out the basic notions, history and the theoretical and practical achievements to the present times in the field of the suspended prestressed systems, and the contribution to the solving the stability problem of double layered and prestressed catenary systems. The conducted research and analysis, unequivocally demonstrate the practical results of the solution of stability problem of cable truss.

The contribution to the stability problem is comprised in conclusions, which are derived from the author's research:

- Analytical-numerical model of static design
- Criteria of dynamic stability of suspended structures
- Analysis of defined models type "D" and "V" by the criteria of dynamic stability and the recommendations for the minimum levels of their prestressing.
- Constituting the methodology of the best design of cable truss.
- Definition of wind as a harmonic and impact action on the suspended structures.

Key words: suspended structures, cable truss, prestressing, stability, dynamic wind action

Sadržaj

I	Uvod	1
	I-1 Opšte	1
	I-2 Istorijat	2
II	Savremeni dvopojasni lančanični sistemi u vertikalnoj ravni	7
	II-1 Uvod	7
	II-2 Stabilizacija visećih krovnih sistema	7
	II-3 Savremeni dvopojasni lančanični krovni sistemi	8
	II-4 Osnovni konstruktivni elementi „kablovskih rešetki“	9
	II-5 Proizvodnja, transport i montaža	10
	II-6 Primeri izgradjenih objekata	11
	<i>Pokriveno klizalište u Johaneshovu kod Štokholma</i>	11
	<i>Radionica za popravku autobusa, Berlin-Vajsenze</i>	12
	<i>Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu</i>	13
	II-7 Savremeni pristup razvoju i primeni kablovskih rešetki	14
	<i>Idejno rešenje rekonstrukcije i dogradnje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu</i>	18
	II-8 Osvrt na moguće probleme koji se javljaju pri izgradnji i eksploataciji krovova pokrivenih kablovskim rešetkama	21
III	Kriterijumi stabilnosti	23
	III-1 Uvod	23
	III-2 Osvrt na propise za proizvodnju kablova	23
	<i>Kablovi</i>	24
	<i>Klasifikacija žičanih kablova</i>	24
	<i>Zaštitni omotač žičanih kablova</i>	25
	<i>Mehanička svojstva i jačina žičanih kablova</i>	26
	<i>Prednaprezanje i dužina kablova</i>	26
	III-3 Osvrt na propise za konstruisanje zgrada od kablova	29
	<i>Granična stanja nosivosti – sile u kablovima</i>	29
	<i>Granična stanja upotrebljivosti – otpornost konstrukcije</i>	29

	<i>Kriterijumi komfora usled vetrom izazvanih pomeranja krova</i>	30
	<i>Zamor</i>	34
III-4	Projektne preporuke u upotrebi	34
III-5	Sublimirani kriterijumi stabilnosti	36
IV	<i>Analiza visećih krovnih sistema korišćenjem metode konačnih pomeranja</i>	37
IV-1	Opšte	37
IV-2	Metod pomeranja <i>Osnovne postavke</i>	38
IV-3	Jednačine metode pomeranja u Dekartovom koordinatnom sistemu	38
IV-4	Numeričke procedure <i>Šema 1: Modifikovan Njutn-Rafsonov metod</i> <i>Šema 2: Njutn-Rafsonov metod</i> <i>Šema 3: Inkrementalno opterećenje</i> <i>Procedura prekida</i>	42
IV-5	Dinamička analiza prethodno napregnutih kablovskih sistema <i>Opšte</i> <i>Analiza modela sa koncentrisanim masama</i> <i>Osnovne jednačine analize svojstvenih oblika (mode-frequency analysis)</i> <i>Pojam modalne analize</i> <i>Metode za ekstrakciju modalnih parametara</i> <i>Pretpostavke i ograničenja</i> <i>Opis analize</i> <i>Dinamička analiza prolaznih vibracija (Transient Dynamic Analysis)</i> <i>Metode za analizu prolaznih – tranzijent vibracija</i> <i>Opis tranzijent analize</i> <i>Rešenje potpunim metodom</i>	45
V	<i>Prilig rešenju problema visećih krovnih sistema*</i>	53
V-1	Opšte	53
V-2	Problem stabilnosti – aerodinamički fenomen	53
V-3	Metode proračuna	54
V-4	Pojam referentnog položaja	55
V-5	Postupci za odredjivanje parametara u referentnom položaju	55
V-6	Odredjivanje parametara u referentnom položaju u zatvorenom obliku <i>Geometrijske odlike kablovske rešetke</i>	56

□ Zasenčeni delovi sadržaja upućuju na poglavlja disertacije u kojima je autor prezentirao svoj originalni naučni doprinos

Jednačina oblika nosećih kablova 58

Jednačina oblika stabilizujućih kablova 59

Sila u kablju raspona l_0 59

Dužina luka kabla 61

Uticao jednako raspodeljenog opterećenja na promenu strele kabla 62

Uticao rasterćenja konstrukcije visećeg krova 63

Smanjenje reaktivnog opterećenja prethodno zategnutog stabilizujućeg kabla pod uticajem opterećenja krova 65

Odedjivanje sila u kablovima 65

V-7	Odredjivanje sila u štapovima <i>Programski blok "CABL-T"</i> 67 <i>Programski blok "CABL-TP"</i> 67 <i>Programski blok "CABL-N"</i> 68	66
V-8	Prilog rešenju problema proračuna kablovskih rešetki	70

VI Analiza stabilnosti nekih izvedenih konstrukcija 72

VI-1	Uvod	72
VI-2	Konstruktivske karakteristike nekih izvedenih kablovskih rešetki	72
VI-3	Kontrola ravnoteže kablovskih rešetki u referentnom položaju metodom konačnih pomeranja <i>Analiza rezultata</i> 75	74
VI-4	Proračun kablovskih rešetki za projektovana opterećenja metodom konačnih pomeranja <i>Analiza rezultata</i> 78	75
VI-5	Kriterijumi stabilnosti prema prioritetu ispunjenosti	78

VI I Utvrdjivanje nivoa prednaprezanja kablovskih rešetki 80

VII-1	Uvod	80
VII-2	Analiza sopstvene težine kablovske rešetke i krovnog pokrivača	81
VII-3	Dimenzionisanje nosećih elemenata kablovske rešetke <i>Usvajanje kablova na bazi otpornosti materijala</i> 83 <i>Usvajanje kablova na bazi deformacija</i> 84	82
VII-4	Analiza opterećenja od snega	85
VII-5	Analiza opterećenja od vetra	86
VII-6	Geometrijske i fizičke karakteristike usvojenih kablovskih modela	90
VII-7	Faze opterećenja kablovske rešetke <i>Statička opterećenja</i> 91 <i>Dinamička opterećenja</i> 91	91
VII-8	Preostala sila iz prednaprežućih kablova - „sila kontakta“	92
VII-9	Kontrola ravnoteže usvojenih modela kablovskih rešetki u referentnom položaju metodom konačnih pomeranja	93
VII-10	Proračun modela za utvrdjena opterećenja	95

	<i>Statički proračun</i>	95
	<i>Analiza odgovora modela za statička opterećenja</i>	98
	<i>Zaključna analiza odgovora modela za statička opterećenja</i>	100
	<i>Dinamička analiza</i>	101
	<i>Modalna analiza</i>	102
	<i>Harmonijska analiza</i>	105
	<i>Tranzijent analiza</i>	108
	<i>Analiza odgovora na dinamička opterećenja</i>	117
	<i>Zaključna analiza odgovora modela na dinamička opterećenja</i>	119
VII-11	Sveobuhvatna ocena stabilnosti modela na statička i dinamička opterećenja	119
VII	<i>Eksperimentalna analiza dvopojasne lančanice</i>	120
I		
VIII-1	Uvod	120
VIII-2	Analiza zatečenog stanja	120
VIII-3	Način i metod ispitivanja konstrukcije	122
VIII-4	Instrumenti	124
	<i>Instrumenti za statičko ispitivanje</i>	124
	<i>Instrumenti za dinamičko ispitivanje</i>	126
	<i>Dobijeni rezultati</i>	127
	<i>Rezultati statičkog ispitivanja</i>	127
	<i>Rezultati dinamičkog ispitivanja</i>	128
VIII-5	Metod provere kritičnih elemenata	129
IX	<i>Teorijsko - eksperimentalna analiza rezultata</i>	130
IX-1	Dijagnostika statičkih parametara	130
	<i>Uvod</i>	130
	<i>Poredjenje eksperimentalnih rezultata sa teorijskim</i>	131
	<i>Osnovni računski model</i>	131
	<i>Korekcija osnovnog računskog modela</i>	133
	<i>Korigovani računski model I</i>	134
	<i>Analiza korigovanog računskog modela I</i>	134
	<i>Korigovani računski model II</i>	134
	<i>Analiza korigovanog računskog modela II</i>	135
	<i>Korigovani računski model III</i>	135
	<i>Analiza korigovanog računskog modela III</i>	136
	<i>Korigovani računski model IV</i>	136
	<i>Analiza korigovanog računskog modela IV</i>	136
	<i>Korigovani računski model V</i>	137
	<i>Analiza korigovanog računskog modela V</i>	139
IX-2	Dijagnostika dinamičkih parametara	139
	<i>Dešifrovanje akceleroograma</i>	139
	<i>Priprema podataka</i>	140
	<i>Analiza podataka</i>	141
	<i>Poredjenje eksperimentalnih rezultata sa teorijskim</i>	141

	IX-3	Analiza pouzdanosti primenjene metode proračuna	144
X		<i>Zaključci</i>	146
	X-1	Analitičko-numerički model statičkog proračuna	146
	X-2	Predlog kriterijuma dinamičke stabilnosti	147
	X-3	Analiza definisanih modela po kriterijumima za dinamičku stabilnost	148
	X-4	Metodologija najracionalnijeg proračuna kablovskih rešetki	148
	X-5	Vetar kao harmonijsko i udarno dejstvo	149
	X-6	Poredjenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata	149
		 <i>Literatura</i>	 150
		 <i>Prilog</i>	 156

Poglavlje *I*

Uvod

I-1 Opšte

Poznati postojeći konstruktivni sistemi (linijski i površinski) nisu mogli zadovoljiti konstruktore, arhitekte i urbaniste u smislu stvaranja atraktivnijih, lepših, funkcionalnijih, ekonomičnijih objekata srednjih i velikih raspona. Savremeni pristup rešavanju konstruktivnog sklopa postavio je uslov optimizacije konstrukcije - njihova izrada sa minimumom materijala, smanjenje vremena gradnje i cene koštanja. Inženjeri su u svom nastojanju uspeali da osmisle konstruktivni sistem koji će biti sposoban da zadovolji pomenute uslove. Tako su stvoreni viseći krovni sistemi. Zahvaljujući njima nenametljivo se pokrivaju veći rasponi bez upotrebe unutrašnjih oslonaca. Karakteristično za viseće sisteme je da su to zategnute strukture za čiju se realizaciju koriste materijali velikih zateznih čvrstoća. Time je eliminisan problem stabilnosti osnovnih konstruktivnih nosača - užadi i kablova, a do maksimuma iskorišćen upotrebljeni materijal, nasuprot elementima koji rade na savijanje ili pritisak.

Arhitektura je kasno počela sa primenom visećih sistema, krajem XIX veka, dok su u mostogradnji već uveliko korišćeni. Ali, iako sa zakašnjenjem, ona je, svojim smelim koncepcijama, ostvarila mnogo više varijantnih rešenja nego što je to bio slučaj kod mostova. Neosporno je da je ideja primene visećih sistema u zgradarstvu došla posle uspešne primene na mostovima i da su takvi primeri u početku kopirani, ali se potom ova ideja razvila do neslučenih mogućnosti.

Zbog raznovrsnosti takvih sistema, viseći sistemi mogu se podeliti na dve velike grupe. Jedna bi obuhvatila sve one viseće sisteme kod kojih se krov veša preko vertikalnih ili kosih zatega pa ih nazivamo vešani sistemi, dok druga grupa obuhvata sisteme koji koriste lančanice kao krovne nosače pa se takvi primeri svrstavaju u lančanične sisteme.

Karakteristično za viseće sisteme je da se, u konstruktivne svrhe, za izradu krovnih površina koriste materijali velikih zateznih čvrstoća. U savremenoj građevinskoj praksi u upotrebi su čelične zatege u obliku žica, užadi i snopova. Materijal koji će biti ugrađen u konstrukciju mora biti izradjen po tehnologiji za izradu visokovrednih čelika i ispitane njegove karakteristike pre ugradnje.

Kablovi koji se primenjuju za izradu visećih sistema smatraju se idealno elastičnim pa se njihovo ponašanje može predstaviti tzv. Hukovim reološkim modelom .

Poslednjih decenija XX veka značajna istraživanja dovela su do efektivnijih rešenja izgrađenih objekata. To nas obavezuje da i dalje radimo na iznalaženju još boljih mogućnosti. Širenje ideja o visećim krovnim sistemima zauzelo je više mesta zahvaljujući saopštenjima sa simpozijuma i konferencija koje su održavane u organizaciji IASS¹, IABSE² i kroz časopise.

I-2 Istorijat

Paukova mreža³, gnezda nekih ptica⁴, ili prisustvo raznovrsnih struktura u prirodi morali su, u svim mogućim oblicima, podstaći čoveka da razvije i usavrši, za svoju upotrebu, zategnute sisteme. Priroda uvek teži da upotrebi minimum energije da bi postigla maksimalne rezultate. Prva krovna rešenja u obliku zategnutih sistema svakako su zategnute životinjske kože u obliku šatora (SI-3).



SLIKA I-1 Paukova mreža



SLIKA I-2 Gnezda jedne vrste vrapca u Južnoj Africi

- 1 International Association of Shell and Spatial Structures - *Medjunarodno asocijacija za ljuske i prostorne konstrukcije*
- 2 International Association for Bridge and Structural Engineering – *Medjunarodna asocijacija za mostove i konstruktivno inženjerstvo*
- 3 Postoje mnoge vrste paukova koje izrađuju divne i izazovne strukture zakačene između naspramnih udaljenih tačaka (SI-1). Te su strukture sposobne da premoste velike raspone, da dodirne tačke na osloncima budu iznenađujuće elastične, da dožive lokalni lom sa trenutnom preraspodelom sila na okolne niti [54], [92].
- 4 *Philatarius socius*, vrsta vrapca, uobičajena je ptica u južnoj Africi, gradi veliko porodično gnezdo, koje zbog zaštite, ima loptast izgled i obešeno je o naspramne grančice, a sadrži male napregnute štapiće upletene duž generatrisa i koncentrično (SI-2) [92].

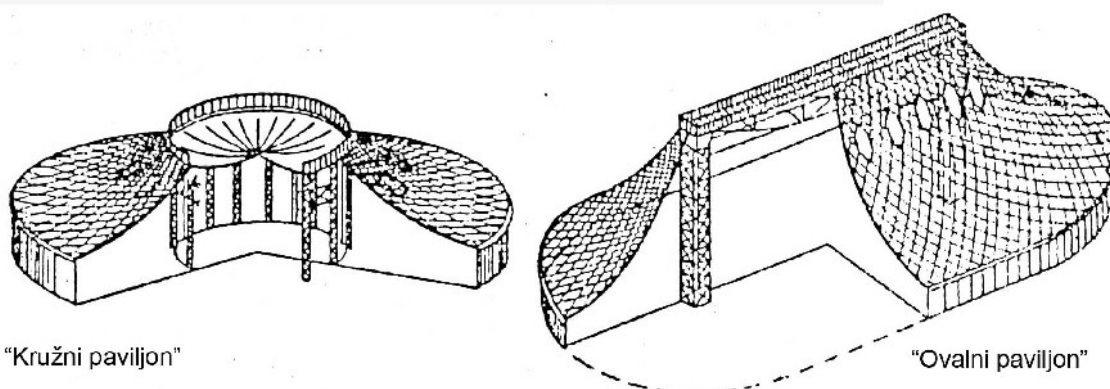


SLIKA 1-3 Indijanski šator-Teepee

Ideja o korišćenju obešenih kablova potiče iz prirodnih oblika u tropskim zemljama jugoistočne Azije i Afrike gde postoji obilje lijana, loza i puzavica. Raspoloživa istorijska otkrića ukazuju da su prirodna užad (lijane) jedan od prvih materijala korišćenih za izradu malih visećih mostova. Ti mostovi imali su platformu od drveta po kojoj se hodalo. Pronalaskom čelika, kao konstrukcionog materijala, prvobitne forme visećih mostova usavršavane su, tako da su postepeno počele da dobijaju današnji oblik. Analiza, oblikovanje i konstruisanje visećih mostova razvijeno je do fine, uzbudjujuće umetnosti. Danas u svetu postoji mnoštvo poznatih mostova ovog tipa.

Mreže izradjene od prirodnih organskih i metalnih materijala visokog kvaliteta kao što su kanapi, konopci, strune ili čelična užad, mogu biti korišćene na mnogo načina: ribarenje, lov, maskiranje, kao oslonac membrane u balonima, krovove, jedra za brod, podupiranje dimnjaka i sl.

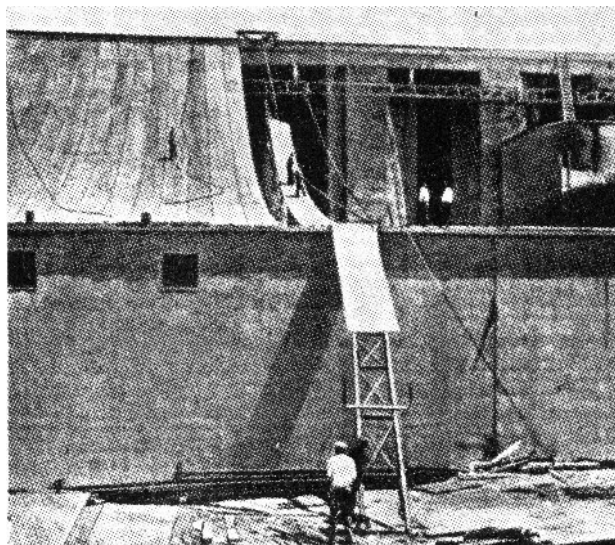
Upotreba kablova, kao konstrukcijskih elemenata visećih krovova, počela je krajem XIX veka. Istorijski pregled visećih krovova ukazuje da je najranija verzija zategnutog krova - šator. Prvi objekti projektovani i izgradjeni u duhu visećih krovnih konstrukcija su četiri paviljona Sveruske izložbe [21], [85] u Nižnjem Novgorodu 1896. godine. Projektovao ih je i izgradio mladi ruski inženjer Vladimir Grigorijevič Šuhov. Dva objekta su raspona 2x15,00m i dužine 68m sa cilindričnim visećim krovom, dok je "Kružni paviljon" spoljašnjeg prečnika 68m, a unutrašnjeg 25m. Dimenzije "Ovalnog paviljona" u osnovi su 51x98m (Sl.I-4).



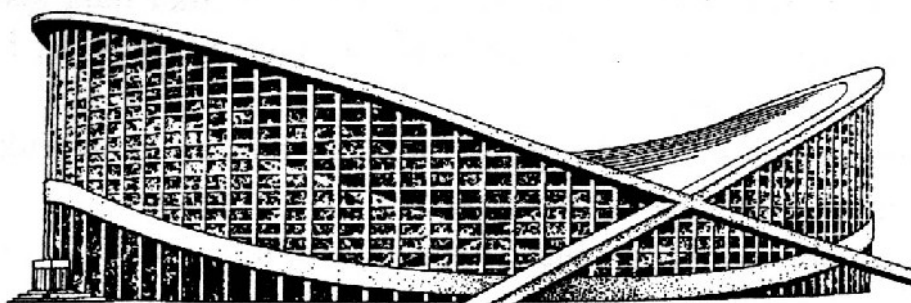
SLIKA I-4 Paviljoni Sveruske izložbe u Nižnjem Novgorodu, 1896.

SLIKA I-5 *Albani silos (SAD, 1933.)*

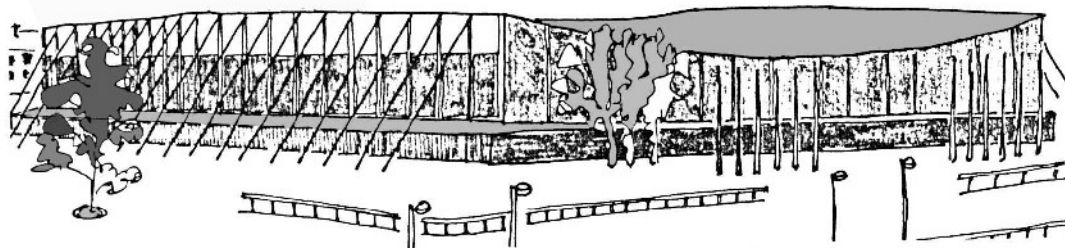
Sledeći pokušaj bio je viseći krov objekta Albani silosa (SAD, u državi Njujork) 1933. [93], [100]. Objekat je dimenzija 32x82m. Krov je cilindričnog oblika sa pokrivačem od tabli čeličnog lima debljine 2,7mm preko kablova na rastojanju od 1,22m. Table lima su međusobno zavarene.



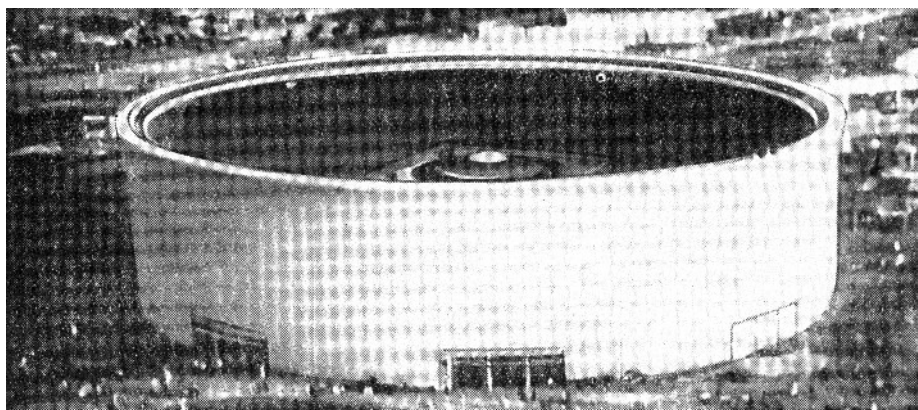
Pravu revoluciju u projektovanju i gradnji visećih krovnih konstrukcija izazvali su objekti Rejli arena 1953.godine (92x97m, *SLI-6*) [19], [21], [53], [93], zatim klizalište u Johaneshovu kod Štokholma 1956.godine (83x118m, *SLI-7*) [19], [84], [88], [93] i Gradska dvorana u Montevideu 1957. godine (prečnika 94m, *SLI-8*) [19], [84]. Na Svetskoj izložbi 1958.godine u Briselu dodeljena je zlatna medalja inženjeru Dejvidu Žavertu za tzv. "Žavertov sistem" kablovskih rešetki.



SLIKA I-6 *Rejli arena (SAD, Severna Karolina, 1953)*



SLIKA I-7 *Klizalište u Johaneshovu kod Štokholma (Švedska, 1956)*

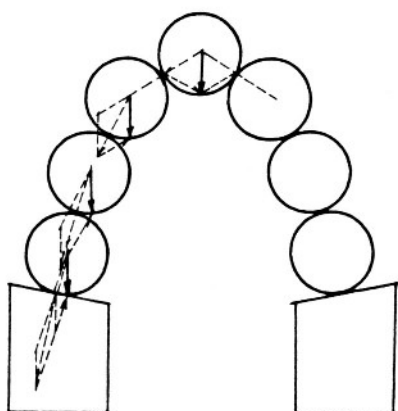


SLIKA I-8 *Gradska dvorana u Montevideu (Urugvaj, 1957)*

Kasnije na svetskim izložbama EXPO u Briselu 1958, Montrealu 1966, Osaki 1970. kao i za potrebe održavanja sportskih takmičenja na Olimpijskim igrama i drugim velikim manifestacijama gradjeni su objekti pokriveni visećim krovnim sistemima [3], [36], [53], [56], [77], [84], [85], [102].

Prvi viseći krov na bivšim jugoslovenskim prostorima podignut je na Zagrebačkom velesajmu (100x40m) odmah posle oslobodjenja od Nemaca 1945.godine [5]. Kasnije, 1959.godine, po uzoru na Rejli arenu izgradjena je Velika izložbena hala sajma tekstila u Leskovcu [5], [8], potom 1972.godine Sportska hala u Novom Beogradu [111] po uzoru na Gradsku dvoranu u Montevideu, 1957. Velika hala sportskog centra "Morača" u Podgorici [112] podignuta je po uzoru na bazen u Tokiju, a 1979. godine originalni objekat kompleksa bazena u Splitu za potrebe Mediteranskih igara.

U konstruktivnom smislu, gipke niti, kao element konstrukcije, privukle su davno pažnju inženjera i naučnika. Teorija "verižnog poligona" primenjivana je kao osnova za izučavanje ponašanja gipkih niti. Ovu teoriju koristili su za proračun visećih mostova Varinjon, Lame, Klapejron, Navije i dr.



Svojstva gipkih niti, kao elementa konstrukcije, istraživali su Lagranž, Ojler i drugi naučnici [85], [86]. Istorijski gledano, pitanje oblika svoda postavljeno je i rešeno već krajem 17.veka. Svod je inverzna lančanica, u kome nema drugih presečnih sila osim sila aksijalnih pritisaka.

Godine 1690. braća Bernuli, a potom Lajbnic i Hajgens odredili su jednačinu lančanice.

Filip d'la Ir (1640-1718) i Parent (1666-1716) bili su prvi fizičari koji su uslov ravnoteže svoda posmatrali kao statički problem matematičke analize (*Sl. I-9*).

SLIKA I-9 *Svod bez trenja – potporna linija*

U raspravi "Traite de mecanique" iz 1695.godine Filip d'la Ir postavlja uslov oblika svoda tako da svaki kamen mora preneti sopstvenu težinu i težinu kamena iznad, na kamen ispod sebe vertikalno. Stabilnost svoda biće zagarantovana ako kamen naleže bez trenja.

Dejvid Gregori, škotski matematičar, u svom delu "Properties of the Catenaria", uvodi princip teorijski pravilne osovine luka u obliku obrnute lančanice. Hipotezu svoda bez trenja izmedju elemenata najbolje ilustruje svod od lopti čija težišta leže na zamišljenoj liniji lančanice (*Sl. I-9*). Mehaničku prirodu ovako shvaćenog svoda u obliku obrnute lančanice, ilustrovao je italijanski matematičar i inženjer Poleni, u svojoj publikaciji o kupoli crkve Sv.Petra u Rimu (1748).

Prvi teorijski radovi [85], [86] u oblasti visećih krovnih sistema potiču od I.M.Rabinoviča još iz 1924.godine. U kasnijem periodu veliki doprinos teoriji visećih konstrukcija dali su N.S.Strelicki, zatim Krilcov, Kačurin, Sobotka, a u novije vreme (posle 1965) Dmitriev, Kasilov, Moskalev i dr. [21], [65], [93].

Pravi razvoj analize, projektovanja, proračuna i konstrukcijskih detalja visećih krovnih sistema nastao je posle Rejli arene, čiji je tvorac Novitski (1953., SAD). Teorijski radovi koji su usledili dali su veliki doprinos rešenjima u zatvorenom obliku. Njihovi autori su R.Heilig (1954), Kornelius (Paviljon SAD u Briselu, 1958), D.Žavert (Klizalište u Johaneshovu kod Štokholma, 1956), Siev, Eidelman, Peterson [85], [86]. U poslednjih četrdesetak godina Argiris, Buhold, Jensen, Leonhard, Šlaih, Andra, Melman i Krišna tretirali su probleme visećih prethodno napregnutih sistema na savremenim principima primene elektronskih računara i odgovarajućih numeričkih postupaka (metod konačnih pomeranja) [4], [27], [49], [53], [56], [57], [64], [66], [103].

Doprinos unapredjenju rešenja visećih konstrukcija iterativnim postupcima na našim prostorima dali su Milorad Ivković, Mirko Ačić, Živorad Praščević, Nikola Klem [28]-[45], Milorad Ristić [85], [86] i drugi, a Edmund Balgač [5]-[10], Djordje Zloković [111]-[114] i Simeon Tanev [98], [99] radili su na rešenjima u zatvorenom obliku. U oblikovnom smislu veliki doprinos primeni visećih krovnih sistema dali su Iva Antić [3], Miroslav Conić [18], Ljupka Kovačević [111], Duško Dropulić [47] i drugi.

Ilustrativan je podatak da su ove konstrukcije, u teorijskom pogledu, relativno mlade i da faktički pripadaju pretežno drugoj polovini XX veka, a da su puni zamah dobile tek erom masovne primene računara i metode konačnih elemenata. Glavna smetnja pre primene kompjutera bio je glomazan i nepodesan matematički aparat koji nije omogućio nalaženje praktičnih rešenja primenljivih u projektantskoj i izvodjačkoj praksi.

Poglavlje *II*

Savremeni dvopojasni lančanični sistemi u vertikalnoj ravni

II-1 Uvod

Primena visećih krovnih sistema, za pokrivanje objekata velikih raspona, daje atraktivna, smela i ekonomična rešenja. Viseći krovni sistemi predstavljaju, po definiciji, integralno zategnute strukture kao posledica geometrijskih karakteristika nosećih krovnih elemenata - kablova. Kablovi ne primaju sile pritisaka, samo sile zatezanja, velike su dužine, a malih poprečnih preseka, te im je krutost na savijanje jednaka nuli. Kod visećih sistema maksimalno je iskorišćena njihova nosivost, što ih svrstava u grupu ekonomičnih konstruktivnih sistema. Mogućnost brze pripreme primenom CAD (Computer Aided Design) i CAM (Computer Aided Manufacture) tehnologije, jeftin transport do mesta ugradnje, jednostavno povezivanje elemenata, uz pomoć radne snage niže kvalifikacione strukture, daje prednost visećim sistemima za pokrivanje velikih i srednjih raspona u odnosu na druge konstruktivne sisteme. Izvori informacija na osnovu kojih je sistematizovano ovo poglavlje navedeni su u spisku literature [1], [3], [5]-[10], [18], [19], [21], [29]-[47], [53], [56], [57], [63], [77], [79]-[81], [84], [93], [94], [98]-[101], [111]-[114], [116] i [117].

II-2 Stabilizacija visećih krovnih sistema

Viseći krovovi su fleksibilne strukture velikih raspona vrlo sklone značajnoj aerodinamičkoj pobudi usled opterećenja kojima su izložene (sopstvena težina, sneg i dinamički uticaji usled vetra, potresa, zvuka, i drugih mehaničkih vibracija). Krovovi ovog tipa zbog toga pokazuju "uznemirenost"-ljudanje pa je prvenstveni zadatak obezbedjenje stabilnosti konstrukcije. Iz tih razloga lančanični nosači moraju biti u svakom trenutku napregnuti do te mere da bi se sprečili negativni efekti labilnosti visećih krovnih sistema, tzv. aerodinamički fenomen: ljudanje krova, pucanje plafona, oštećenja instalacija i sl.

Metode za stabilizaciju visećih krovnih sistema su:

- opterećenje težinom,
- prednaprežanjem i
- kombinovanjem sa elementima koji rade na savijanje (hibridne konstrukcije).

Savremeni pristup stabilizacije lakih visećih krovnih konstrukcija podrazumeva prednaprežanje. Prethodno napregnutu konstrukciju karakterišu njeni specifični naponi koji postoje i bez ikakvog spoljašnjeg opterećenja. U procesu gradnje ovih krovova u krovne kablove unose se sile zatezanja koje ih izdužuju. Ankerisani krajevi prethodno zategnutih kablova teže da se vrate na prvobitnu dužinu i deluju na elemente konstrukcije koji im to ne dozvoljavaju:

- (1) Elementi velike čvrstoće na pritisak-linijskog tipa (beton, drvo, epoksidni betoni i sl.) - jednostruke lančanice;
- (2) Kablovi suprotne zakrivljenosti, čiji raspored u prostoru može biti:
 - u ravni, pa je njihova međusobna veza posredna (vertikalne ili kose zatege i/ili razupirači) - kablovske rešetke,
 - u prostoru, pa je njihova međusobna veza direktna - mreže.

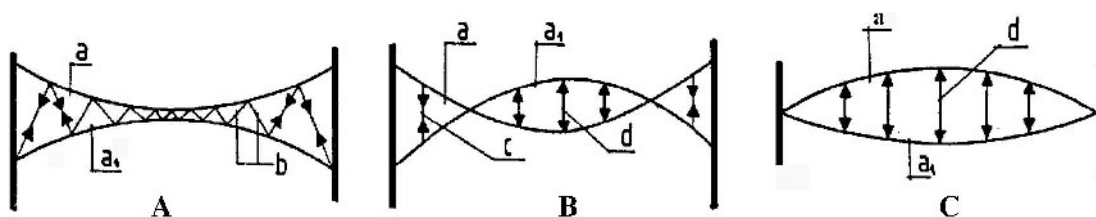
II-3 Savremeni dvopojasni lančanični krovni sistemi

Jedan od načina da se krovna površ, zasnovana na savitljivim glavnim nosačima, učini stabilnom je upotreba fleksibilnih elemenata. Ovakvi sistemi predstavljaju gipke-elastične konstrukcije. Kod prethodno napregnutih kablovskih struktura u sadejstvu sa drugim kablovima, koje se uslovno nazivaju **dvostруким lančanicama**, razlikuju se dve osnovne grupe konstruktivnih elemenata (lančanica) istog tipa:

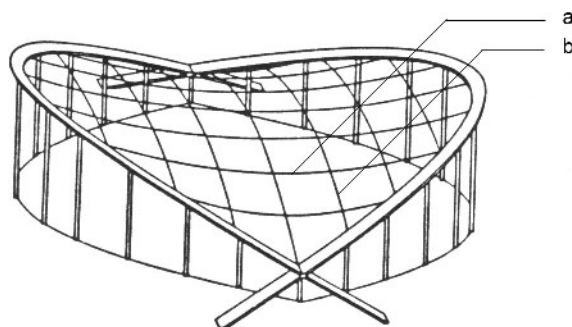
- **Primarne** ili noseće lančanice čiji je zadatak da prihvate sopstvenu težinu kablova, krovnog pokrivača, povremeni teret, vetar i dinamičke uticaje;
- **Sekundarne** (stabilizujuće, prednaprežujuće ili pomoćne) lančanice čiji je zadatak da stabilizuju savitljive primarne lančanice, tj. da obezbede sile zatezanja u svim elementima konstrukcije za koje je $EI=0$ u svim fazama opterećenja.

Opšta podela dvostrukih lančaničnih sistema može se izvršiti na dva različita tipa u zavisnosti od prostornih mogućnosti koje dozvoljavaju veze izmedju primarnih i sekundarnih kablova (Sl. II-1 i Sl. II-2):

1. **Dvopojasni lančanični sistemi u vertikalnoj ravni**, tzv. "kablovske rešetke" (Sl. II-1), kod kojih je veza izmedju primarnih (a) i sekundarnih lančanica (a_1) ostvarena posrednim elementima (b, c, d). Ti elementi mogu biti nagnuti (zategnute dijagonale b), ili vertikalni (zategnute vertikale c i pritisnute vertikale-razupirači d). Kablovske rešetke su najtipičnije dvodimenzionalne (ravanske) prethodno napregnute kablovske konstrukcije.
2. **Prostorne strukture**, tzv. "prethodno napregnute mreže" (Sl. II-2) kod kojih je veza izmedju primarnih (a) i sekundarnih kablova (b) neposredna (kablovi su u direktnom kontaktu).



SLIKA II-1 Konstruktivne šeme “kablovskih rešetki”



SLIKA II-2 Konstruktivna šema “prethodno napregnute mreže”

II-4 Osnovni konstruktivni elementi “kablovskih rešetki”

Švedski arhitekta Dejvid Žavert, koji je konstruisao sistem koji se po njemu često naziva, savladao je neprijatnu pojavu ljuljanja (nepredvidjenih deformacija) upotrebom veza pod nagibom koje efikasno redukuju deformacije, posebno u horizontalnom smeru, dajući celoj konstrukciji značajnu krutost i za slučajeve nesimetričnog tereta (Sl.II-1).

Kablovske rešetke sastoje se iz delova:

- **Rešetka** ili **greda** sačinjena je iz dva kabla: noseći a i stabilišući a_1 , koji imaju suprotnu krivinu, zategnuti su, povezani međusobno serijom dijagonalnih ili vertikalnih zategnutih elemenata (Sl.II-1.A i II-1.B), ili vertikalnih pritisnutih elemenata (Sl.II-1.C). Dijagonale se zatežu preko specijalnih spojnika koje obezbeđuju položaj kablova kojima se vrši prednaprežanje. Prednaprežujući kabl mora uvek biti zategnut, čak i pod uticajem najvećeg gravitacionog opterećenja. Svi čelični elementi izrađuju se od visokovrednog čelika sa obaveznom zaštitom od korozije. Ovakvi okviri mogu biti korišćeni za raspone 25-60 i više metara.
- **Ankerna konstrukcija** nosi kablovsku rešetku. Sastavljena je iz vertikalnog stuba i elemenata za uravnoteženje velikih horizontalnih sila iz kablova koji sprečavaju labavljenje i opuštanje kablova. Najčešće primenjivani elementi za uravnoteženje su kose ili vertikalne zatege (Sl.II-4), armiranobetonska konstrukcija sa kosim stubovima (Sl.II-7) i armiranobetonske dijafragme (Sl.II-6). Uzemljeni elementi posebnog temeljnog dela svojom površinom i

dubinom ukopavanja obezbeđuju dovoljno kontratereta sopstvenom težinom ili trenjem sa tlom.

Osnovna karakteristika visećih konstrukcija u vertikalnoj ravni je prilagodjavanje modulima što vodi standardizaciji. Standardni rasponi su 25, 30, 35, 40, 45, 60 i više metara.

II-5 Proizvodnja, transport i montaža

Proizvodnja elemenata, od kojih se formiraju kablovske rešetke, izvodi se u fabričkim uslovima. Sam proces obuhvata izradu čeličnih užadi od pocinkovanih žica, njihovo sečenje na projektovanu dužinu, izradu ankernih završetaka, spajanje ankera i kraja užeta hladnim utiskivanjem ili zalivanjem rastopljenim cinkom, kontrolu spojeva, prethodne probe rastezanja na fabričkoj stazi, kao i ciklično zatezanje zbog smanjenja relaksacije užeta. Tako pripremljeni kablovi namotavaju se u koturove i tako zauzimaju vrlo malo prostora, a obeležavaju se oznakama koje odgovaraju projektnoj dokumentaciji.

Konvencionalne strukture velikih raspona moraju se graditi na licu mesta skupom opremom. Ako ih treba transportovati javiče se veliki transportni troškovi jer se koriste sredstva velike nosivosti. Nasuprot njima, viseće konstrukcije su vrlo pogodne za transport jer se kablovi namotavaju na koturove koji su male težine (4-6daN/m² krovne konstrukcije bez pokrivača), laki su za manipulaciju tako da se mogu transportovati jednim kamionom srednje nosivosti do mesta ugradnje.

Montaža kablovskih rešetki izvodi se brzo i efikasno sa malim utroškom radnog vremena (0,15 do 0,20 h/m² krova). Sastavljanje strukture izvodi se na tlu povezivanjem glavnih lančanica dijagonalnim štapovima. Posle povezivanja na zemlji i "doterivanja na meru", sistem kablova se podiže i ankeruje u prethodno pripremljene ankerne glave. Zavijanjem zavrtnjeva za zatezanje prednaprežućeg kabla konstrukcija se prethodno napreže. Retko se koriste hidraulične prese za



zatezanje.

SLIKA II-3 Šema kabl-kрана sa radnom platformom za montažu, kontrolu i merenja na kablovskim rešetkama (primenjeno na Klizalištu u Johaneshovu u Švedskoj)

U toku zatezanja konstrukcije vrše se neophodna merenja izduženja stabilizujućih kablova, sila u krajnjim štapovima stabilizujućih kablova i vertikalna pomeranja srednje tačke svake kablovske rešetke. Izduženja i pomeranja mere se geodetskim instrumentima, dok se sile mere specijalnim instrumentom za registrovanje sila u kablovima. Prednost visećih sistema u odnosu na klasične krute konstrukcije je i u tome što za montažu nije potrebna skela, osim lakih korpi koje se vešaju o kabl-kran, i uz pomoć vitla dozvoljavaju pristup čvornim elementima konstrukcije (Sl.II-3). Sve radne operacije oko finalnog podešavanja sistema kao i merenja mogu se obaviti iz obešene viseće korpe sa radnom platformom.

II-6 Primeri izgradjenih objekata

II-6.1 Pokriveno klizalište u Johaneshovu kod Štokholma

Projekat: Žavert, inž. i Hedkvist, inž.

Dimenzije: 83,0m x 118,0m

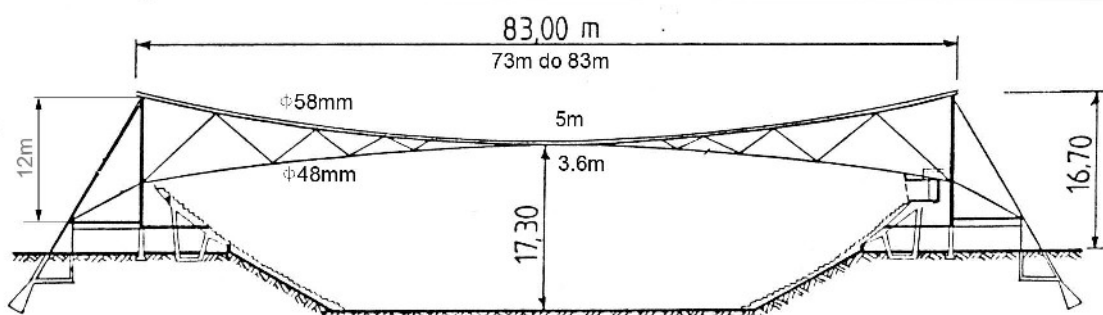
Klasifikacija: Dvostruka lančanica, kablovska rešetka, stabilisana prednaprezanjem, jednosmerno kriva krovna površ, pravougaona osnova

Prvi izgradjeni objekat pokriven sistemom kablovskih rešetki je Klizališna dvorana u Johaneshovu, Švedska (Sl.I-7 i Sl.II-4). Gradjena je 1956. godine za 16.000 gledalaca [46], [53], [63], [65], [93].

Klizalište je pokriveno konstrukcijom kablovskih rešetki raspona 73m do 83m, sa kosim štapovima ispune. Za kablovske rešetke korišćena su prethodno vučena, zatvorena užad od patentiranih, hladno vučenih žica, prečnika $\phi 58\text{mm}$ za noseći kabl i $\phi 48\text{mm}$ za stabilizujući kabl. Strela nosećeg kabla je 5m, dok je strela stabilizujućeg kabla 3,6m. Kablovske rešetke su na međusobnom rastojanju od 5,28m. Za prijem horizontalnih sila iz kablovskih vezača za sidrenje su korišćeni snopovi. Svaki snop sastoji se od po 12 okruglih šipki $\phi 26\text{mm}$ snabdevenih navojem utisnutim u šipku u hladnom stanju. Kotva u tlu sastoji se od prefabrikovanih blokova od armiranog betona koji silu, iz kosih čeličnih zatega, prihvataju težinom. Oslonačka konstrukcija je od čeličnih profila, visina stubova je 12m, a deo dvorane je ukopan sa armirano betonskom konstrukcijom.

Pri formiranju krova morali su se imati u vidu posebni klimatski uslovi hale čija je namena raznovrsna. Kasete u vidu ramova od hladno oblikovanih čeličnih limova pružaju se između vezača. Na ove kasete zakivcima je pričvršćen talasasti lim, preko koga su asfaltom nalepljene impregnisane ploče od drvenih vlakana i tri sloja krovne hartije. Ovako formirana krovna konstrukcija projektovana je za sopstvenu težinu konstrukcije i pokrivača od $0,42\text{ kN/m}^2$, sneg od $1,00\text{ kN/m}^2$ i vetar koji podiže krov $-0,40\text{ kN/m}^2$, sa temperaturnim promenama od -20°C do $+20^\circ\text{C}$.

Prema podacima koji potiču od Dejvida Žaverta [53], sama krovna konstrukcija (prethodno napregnuta kablovska rešetka sa svim spojnim elementima) koštala je 50 SKr/m^2 , dok je krovni pokrivač koštao oko 100 SKr/m^2 .



SLIKA II-4 Klizalište u Johaneshovu: Poprečni presek

II-6.2 Radionica za popravku autobusa, Berlin-Vajsenze

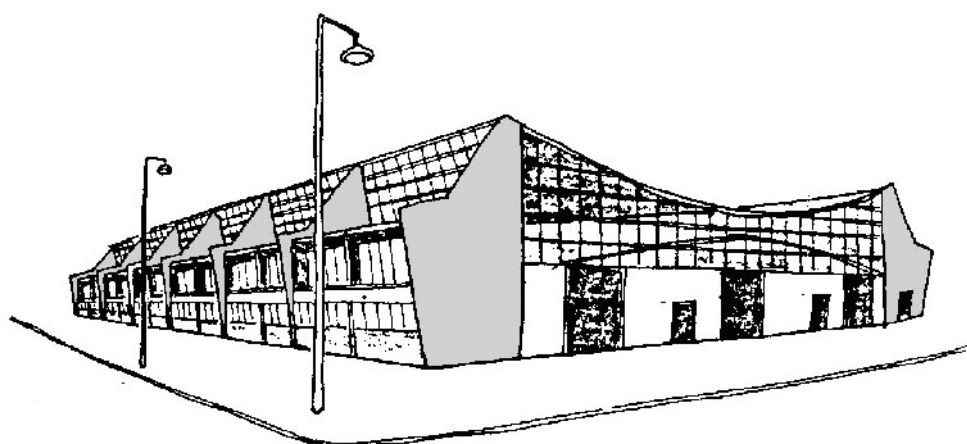
Projekat: Kisig, inž., Rajcig, inž. i Vucbaher, inž., Šebel, arh. i Altenkirč, arh.

Dimenzije: 67,6m x 129,0m

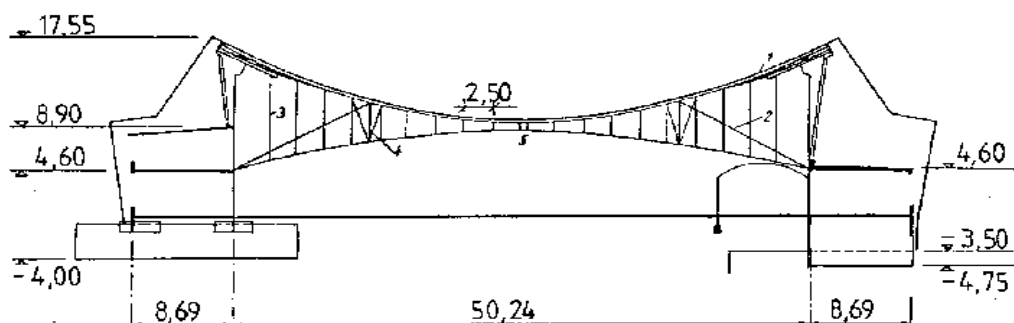
Klasifikacija: Dvostruka lančanica, kablovska rešetka, stabilisana prednaprežanjem, jednosmerno kriva krovna površ, pravougaona osnova

Radionicu za popravku autobusa u Berlinu (Sl.II-5 i II-6), karakterišu masivne dijafragme čiji je zadatak da velike horizontalne sile, koje deluju u kablovima krovne konstrukcije, prihvate i prenesu na temeljnu konstrukciju [21], [53], [63], [93], [101].

Kablovska rešetka izradjena je od spiralnih užadi (noseći i prednaprežujući kabl izradjeni su od $\phi 26\text{mm}$) na čijim je krajevima hladnim postupkom utisnut navoj za podešavanje. Za smanjenje deformacija izazvanih neravnomerno raspoređenim opterećenjem ugradjene su dve kose šipke $\phi 30\text{mm}$ koje polaze od oslonaca sprežućeg kabla i dosežu do četvrtine raspona nosećeg kabla.



SLIKA II-5 Aksonometrijski prikaz radionice za popravku autobusa u Berlinu



SLIKA II-6 *Poprečni presek radionice za popravku autobusa u Berlinu*

Nosač kranske staze (Sl.II-6, oznaka 4), koja se pruža dužinom hale, obešen je o kablovske vezače. Nosivost kрана je 1,5t, tj. koncentrisani teret u četvrtini raspona od 15kN. Kablovske rešetke postavljene su na rastojanju od 5,40m i prihvataju se horizontalnim nosačem - ivičnom gredom. Ivična greda predaje horizontalne sile masivnim AB dijafragmama koje su na rastojanju 21,40m. Medjusobno rastojanje kablova u sredini raspona je 1,3m. Preko kablovskih rešetki formira se krovna površina od ploča koje se sastoje od hladno valjanih čeličnih U-profila sklopljenih u okvir i od ravnih azbestcementnih ploča debljine 6mm sa toplotnom izolacijom između ploča i hidroizolacijom. Dimenzije krovnih panela su 2,50x5,40m. Sopstvena težina krova iznosi 0,45kN/m².

II-6.3 Sportski kompleks "Zdravlje" u Leskovcu

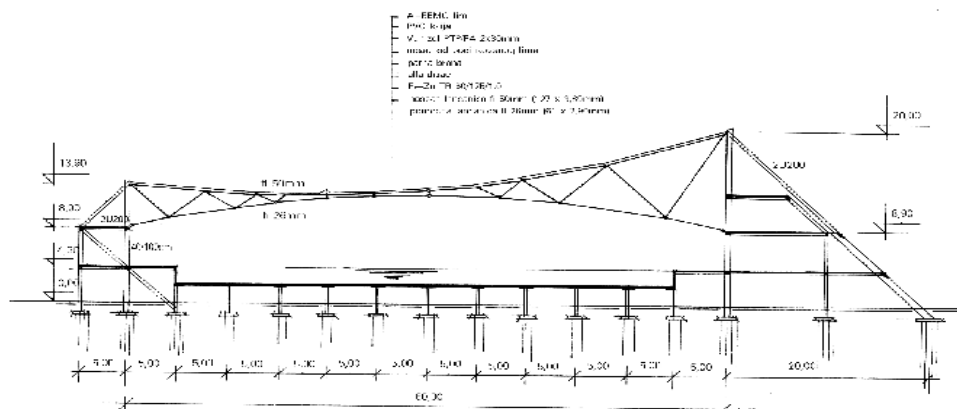
Projekat: "Tensoteci"-Milano, "Krivaja"-Zavidovići

Dimenzije: 2 x (5m+60m+20m)x45m

Klasifikacija: Dvostruka lančanica, kablovska rešetka, stabilisana prednaprezanjem, jednosmerno kriva površ, pravougaona osnova

Sportski kompleks "Zdravlje" u Leskovcu (Sl.II-7 i Sl.II-8) obuhvata dvorane za male sportove i dvoranu za plivanje i vaterpolo. Dimenzije objekta su 2 x (85mx45m). Deo Sportskog kompleksa za male sportove završen je 1985. godine, a pokrivanje bazenskog dela dvorane započeto je 1992. godine, a završeno 1999.godine. Dvorane sportkog kompleksa "Zdravlje" su jedini objekti na tlu bivše Jugoslavije pokriveni Žavertovim sistemom kablovskih rešetki [1], [43], [72].

Krovnu konstrukciju Sportskog kompleksa i bazena čini dvopojasna lančanica tipa kablovske rešetke, raspona 60m. Kablovi koji formiraju kablovsku rešetku su: gornji-noseći kabl $\phi 50\text{mm}$ ($127\phi 3,89\text{mm}$) i donji-stabilizujući kabl $\phi 26\text{mm}$ ($61\phi 2,9\text{mm}$). Noseći i stabilizujući kabl povezani su dijagonalama $\phi 18\text{mm}$. Spojnice kojima se povezuju dijagonale (štapovi ispune) i noseći, odnosno stabilizujući kabl, izradjene su od legiranog aluminijuma. Kablovi su zaštićeni od korozije omotačem od cinka (200 gr/m²). Kablovske rešetke su na rastojanju 5,0m, i njihova konfiguracija medjusobno se razlikuje da bi se postiglo odvodnjavanje krovne površi (uvećanjem strele nosećeg kablova od sredine prema zabatima dvorane dobijena je razdelnica na krovu).

**SLIKA II-7**

Poprečni presjek dvorane sa bazenima Sportskog kompleksa “Zdravlje” u Leskovcu

**SLIKA II-8** *Severni – ulazni izgled Sportskog kompleksa “Zdravlje” u Leskovcu*

Veza nosećih kablova i AB stubova kao i stabilizujućih kablova i AB stubova ostvarena je preko blokova izradjenih od zavarenih čeličnih limova. Nakon montaže, zatezanja i rektifikacije kablova, blokovi su zaliveni sitnozrnim betonom.

Sopstvena težina krova sa krovnim pokrivačem je mala ($0,35\text{kN/m}^2$).

II-7 *Savremeni pristup razvoju i primeni kablovskih rešetki*

Jednostavna cilindrična forma krova, konveksnog ili konkavnog oblika, primenjivana je za pokrivanje sportskih objekata, izložbenih paviljona, industrijskih hala i tržnica od prve pojave Žavertovih kablovskih rešetki 1956.godine. Vrlo ekonomična, jednostavna konstrukcija, za kratko vreme postala je vrlo popularna za pokrivanje

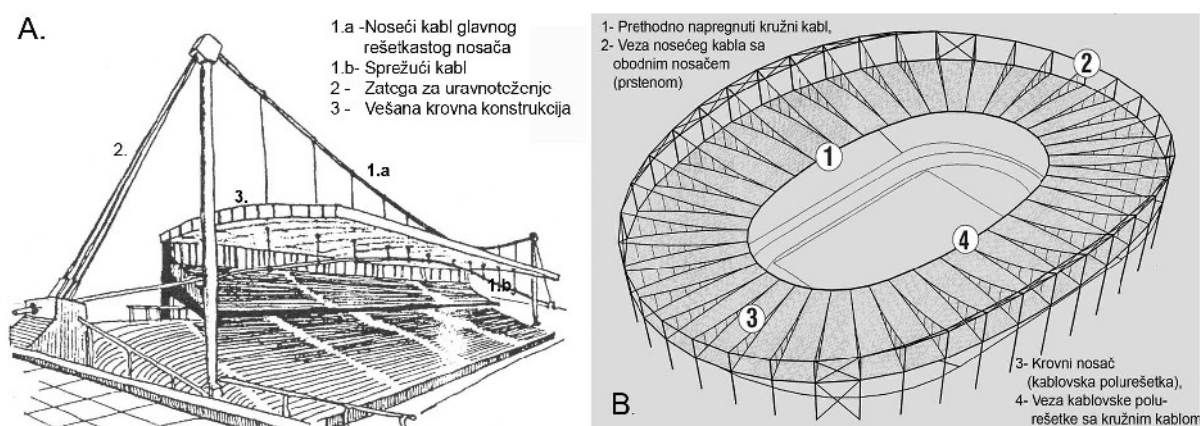
srednjih i velikih raspona. Međutim, zbog svog ograničenog arhitektonsko-estetskog kvaliteta, već krajem šezdesetih godina XX veka počinju da se primenjuju drugi tipovi visećih konstruktivnih sistema za pokrivanje velikih raspona.

Razvoj novih ideja u primeni kablovskih rešetki započeo je krajem sedamdesetih godina prošlog veka. Široko interesovanje za ovu vrstu konstrukcija usmerilo je pažnju arhitekata i konstruktora na razvoj kablovskih rešetki u dva pravca:

- glavni nosač kod vešanih sistema (*Sl.II-9.A*),
- primarni krovni polurešetkasti nosači (*Sl.II-9.B*).

Primena kablovske rešetke, kao glavnog nosača o koje se vešaju krovni nosači, stvorila je uslove za formiranje krovne površi koju ne treba dodatno osiguravati za podižuće uticaje od vetra. Do tada primenjivani glavni nosači kod vešanih sistema su bili kose zatege u kombinaciji sa pilonima i vertikalne zatege u kombinaciji sa jednostrukom lančanicom koji imaju manju krutost od kablovskih rešetki.


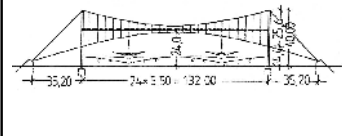
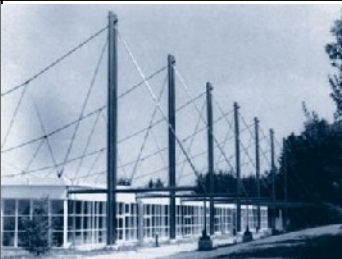




Pokrivanje kružnih i ovalnih osnova primenom polurešetki radijalno raspoređenih dala je novu mogućnost pokrivanja tribina stadiona. Presecanjem kablovskog nosača na dva dela i korišćenjem jedne njegove polovine, sile zatezanja u nosećem i stabilizujućem kablju predaju se kružnom ili lučnom ivičnom kablju koji povezuje sve polurešetke i uspostavlja ravnotežu u sistemu.



SLIKA II-9 *A: glavni nosač kod vešanih sistema, B: primarni krovni polurešetkasti nosači*

U svetskoj graditeljskoj praksi ovi načini pokrivanja primenjivani su već na brojnim sportskim objektima velikih raspona, gradjenim za reprezentativne sportske događaje. Po mišljenju stručnjaka, svakako su najreprezentativniji, kako po rasponu, tako po gracioznosti, konstruktivno-estetskim karakteristikama, značaju takmičenja i investicionim ulaganjima objekti prikazni u Tabeli II-1.

Tabela II-1 Savremeni objekti pokriveni primenom kablovskih rešetki: tip A i tip B

Naziv objekta	God.	Konstruktivni sistem	Raspon	Pokrivač, površina	Izgled
1. Krov stadiona u M'gladbahu, Nemačka	1978	Vešani-elastično oslonjeni krovni lamelirani nosači o vertikalne kablovske rešetke	128,45m kabl.reš. 21+9,5m krovni nosač	TR lim, 3920 m ²	
2. Hangar za avione		Vešani-elastično oslonjeni krovni lamelirani nosači o vertikalne kablovske rešetke	132m kabl.reš. 3*25m krovni nosač	Lim, 9900m ²	
3. Klizalište u Memingenu, Nemačka	1988	Vešani-elastično oslonjeni drveni krovni nosači o vertikalne kablovske rešetke	56*72m	7032m ²	
4. "Ribok" stadion u Boltonu, Engleska	1997	Vešani-elastično oslonjeni krovni čelični nosači 25m do 35m raspona, o nagnute rešetke raspona 70m i 120m	70m i 120m	Lim	 <small>Ribok stadion, Bolton, Vel.Britanija (1997.)</small>
5. Stadion u Rijadu, Saudijska Arabija	1984	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. sa pokrivačem od PTFE tkanine, sa unutrašnjim zategnutim kablom i obodnim pilonima sa zategama	D=147m	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE	
6. Krov arene za borbu bikova u Šaragosi, Španija	1989	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. kablovska 1/2 rešetka sa vertikalnim razupiračima i sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablovima (gornji i donji). Tkanina na donjem pojasu kabl.rešetki	5400 m ² pokriveno tkaninom	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE (poli tetra fluoro etilen)	
7. Stadion "Dele Alpi" u Torinu, Italija	1990	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. kablovska 1/2 rešetka sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablovima. Tkanina na donjem pojasu kabl.rešetki. Obodni piloni sa zategama za uravnoteženje.	67200 mesta Za sedenje	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih sekund. nosača	

8. Stadion "Gotlib-Dajmler" u Štutgartu, Nemačka	1993	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. kablovska $\frac{1}{2}$ rešetka sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablom. Tkanina na donjem pojasu kabl.rešetki. Obodni prsten čelični, pritisnut.	34000m ² pokriveno tkaninom, 55000 Mesta za sedenje, 48m raspon $\frac{1}{2}$ rešetke	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih sekund. nosača	
9. "Nacionalni Sportski Kompleks" stadion u Kuala Lumpuru, Malezija	1998	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. kablovska $\frac{1}{2}$ rešetka sa vertikalnim razupiračima i sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablovima (gornji i donji). Tkanina na gornjem pojasu kabl.rešetki. Obodni prsten pritisnut.	76000m ² korisnog prostora, 100200 mesta za sedenje	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih sekund. nosača	
10. Stadion "Olimpiko" u Sevilji, Španija	1999	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. sa pokrivačem od PTFE tkanine izmedju 44 gornjih i isto toliko donjih kablova, sa unutrašnjim zategnutim kablom i obodnim prstenom pritisnutim	25000m ² pokriveno u osnovi, 27500m ² utrošene tkanine	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE (poli tetra fluoro etilen)	
11. Krov arene za borbu bikova "Vista Alegre" u Madridu, Španija	2000	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. sa pokrivačem od PTFE tkanine, sa unutrašnjim zategnutim kablom i obodnim prstenom pritisnutim. Središnji deo pokretan po visini 10m.	D=100m prečnik unutra. pokretnog jastuka 50m	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE (poli tetra fluoro etilen)	
12. Arena "AOL" u Hamburgu, Nemačka	2000	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. 40 kablovskih $\frac{1}{2}$ rešetki sa unutrašnjim zategn. kružnim kablom. Tkanina na donjem pojasu kabl.rešetki. Obodni prsten čelični, pritisnut sa pilonima i zategama.	55000 mesta za sedenje	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih sekund. nosača	
13. Kupola u Pusanu, Južna Koreja	2001	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. 48 kablovskih $\frac{1}{2}$ rešetki sa vert. razupiračima i sa unutrašnjim zategn. kružnim kablovima (gornji i donji). Tkanina na gornjem pojasu kabl.rešetki. Obodni prsten pritisnut.	Spoljna membrana 34000 m ²	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih sekund. nosača	
14. Stadion "Inčon Munhak" u Inčonu, Južna Koreja	2002	Preth.napregnuta kablovska konstrukc. sa pokrivačem od PTFE tkanine, sa unutrašnjim zategnutim kablom i obodnim pilonima sa zategama i spoljnim prstenom pritisnutim	52200 mesta za sedenje	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE (poli tetra fluoro etilen)	

15. Folksvagen arena u Vofsburgu, Nemačka	2002	Kablovska konstr. ½ rešetka sa gornjim pojasom od R. nosača sa vertikalnim razupiračima i sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablom (donji). Tkanina na gornjem pojasu ½ rešetki. Obodni prsten pritisnut.	Pokriveno tkaninom 15000m ² Pokriveno limom 10000m ² 192m* 196m	Kompozit fiberglas tkanine i PTFE i metalni lim	
16. Krov "AWD" arena u Hanoveru, Nemačka	2005	Preth. napregnuta kablovska konstrukcija kablovske ½ rešetke sa unutrašnjim zategnutim kružnim kablom, vertikalno zategnuta. Tkanina na donjem pojasu kablovske rešetke. Obodni prsten čelični, pritisnut sa kosim stubovima.	215m* 185m, 49000 mesta za sedenje	Kompozit fiberglas i PTFE	
17. Krov "Vald" stadiona – Commerzbank arena u Frankfurtu, Nemačka	1925 1974 2005	Preth. napregnuta kablovska konstrukcija. 44 kablovske ½ rešetke sa dva unutrašnjim zategnutim kružnim kablom, vertikalno zategnuta razupiračima i centralnom platformom za membranu kojom se po potrebi pokriva ceo teren. Obodni prsten pritisnut.	29000 m ² stalno pokriveno, 8000m ² pokretna membrana	Kompozit fiberglas i PTFE preko lučnih nosača	

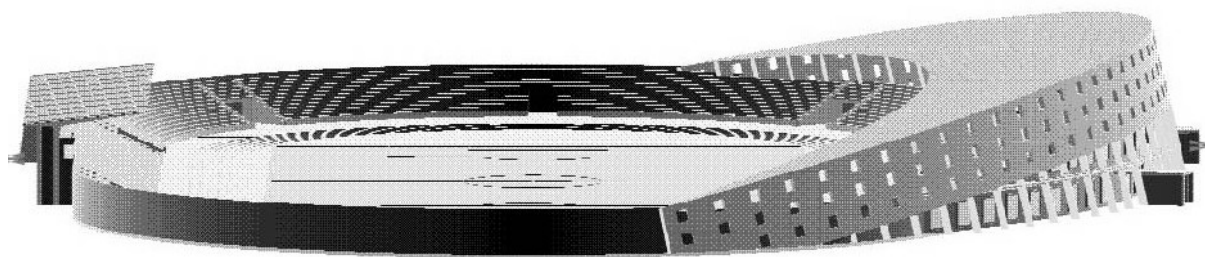
Osim izgrađenih objekata savremen pristup primene kablovskih rešetki u modernim konstrukcionim razmišljanjima susreće se i u idejnim rešenjima i projektima. Jedno od takvih je i **drugonagrađeno idejno rešenje** na konkursu za rekonstrukciju, dogradnju i natkrivanje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu, autora Ćirić Branimira, d.i.a., dr Ljiljane Vasilevske, d.i.a. i mr Dragana Kostića, d.i.g.

II-7.1 Idejno rešenje rekonstrukcije i dogradnje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu

Rekonstrukcijom i dogradnjom, prema konkursnim uslovima, istočna tribina Gradskog stadiona u Nišu trebalo bi da dobije 4500 mesta za sedenje i višenamenske prostore ispod samih tribina.

Arhitektonska interesantnost i neobičnost objekta u funkciji estetike ogleda se u pokrenutom kubusu prema terenu, koji sa alternativom izgradnje zapadne tribine čini arhitektonsku formu otvorene školjke ili posebno gledano deo bureta – BAREL-a.

Armirano betonska okvirna konstrukcija iskorišćena je kao nosač tribina i kao oslonačka konstrukcija krovnim nosačima. AB okviri sastoje se od stubova, kosih i horizontalnih greda koje su međusobno kruto povezane. Prostorni raspored okvira je radijalan na međusobnom rastojanju od 6,0m.



SLIKA II-10 *Idejno rešenje rekonstrukcije i dogradnje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu, južni izgled objekta*

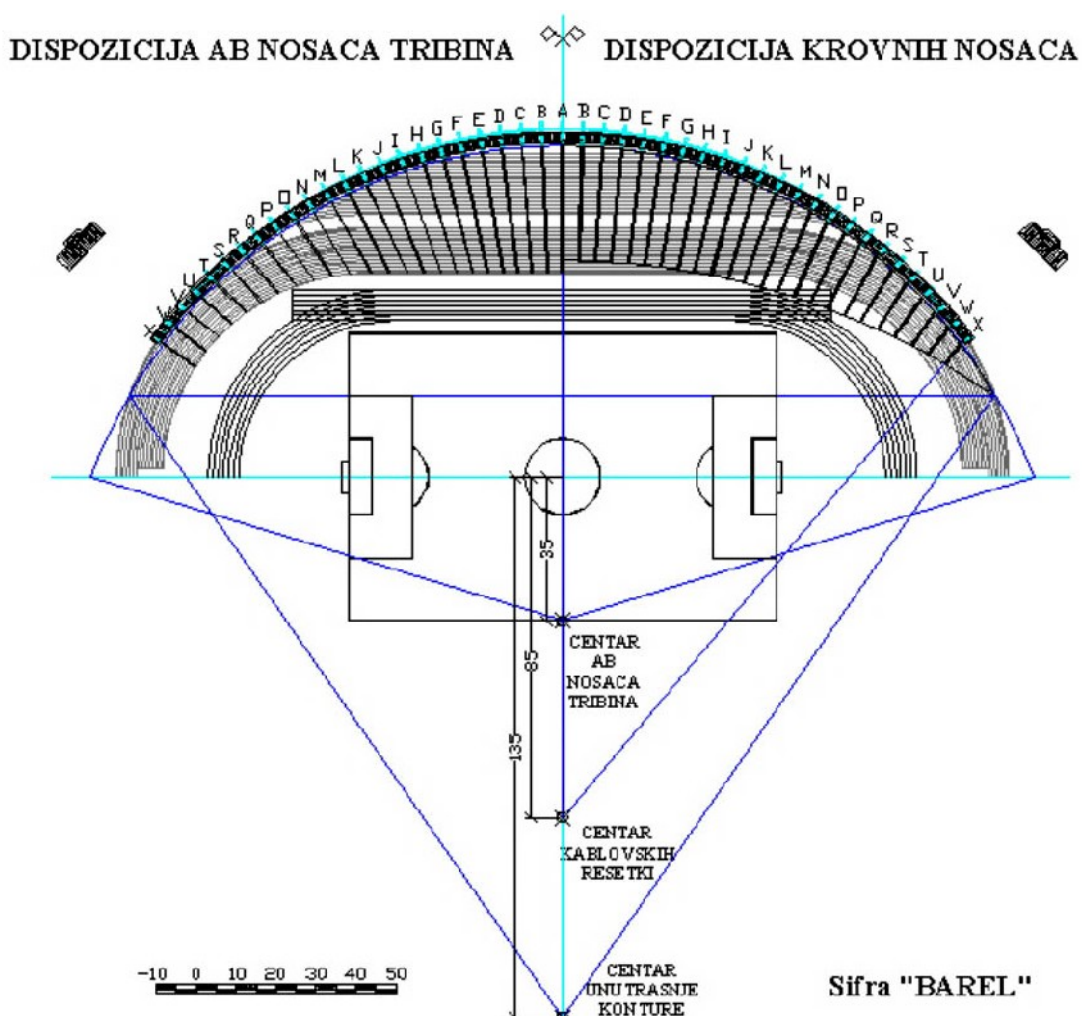
Krovna konstrukcija je sistem čeličnih prethodno napregnutih kablovskih polurešetki. Kablovska rešetka sastavljena je od nosećeg kabla, stabilizujućeg kabla i štapova ispune. Kablovi su medjusobno povezani specijalnim spojnicama tako da formiraju nosač u vertikalnoj ravni. Stinjenost $f/l = 1/17,5$, tj. nosač je plitak. Srednje linije kablovskih rešetki formiraju kosu ravan čiji je trag na koti 6,60m. U toj ravni nalazi se glavni zatežući kabl koji ima ulogu da ceo sistem kablova održava u zategnutom stanju. Na taj način konstrukcija dobija krutost za sva gravitaciona i nesimetrična opterećenja. Glavni konturni kabl usidren je u AB dijafragme na obodu severne i južne tribine na koti 6,60m. Pogodnim oblikovanjem masivne dijafragme su uklopljene u postojeće tribine na severnom, odnosno južnom delu stadiona.

Velike horizontalne sile u osloncima kablovske rešetke zbog njene plitkosti, savladane su pogodnim oblikovanjem osloničke konstrukcije pod uglom (nagibni ugao konturnih stubova je 13°) kao i kosim krutim štapom koji veći deo sila "zatvara" u AB konstrukciju koja nosi tribine. Gornji oslonci kablovskih rešetki medjusobno su povezani ivičnim nosačem (gredom) koji je pritisnut i u prostorno-statičkom pogledu sile predaje AB dijafragmama, tako da je sistem "zatvoren" i u horizontalnom smislu. Sekundarni nosači su izradjeni od hladno valjanih lakih "C" profila na rastojanju od 1,5m.

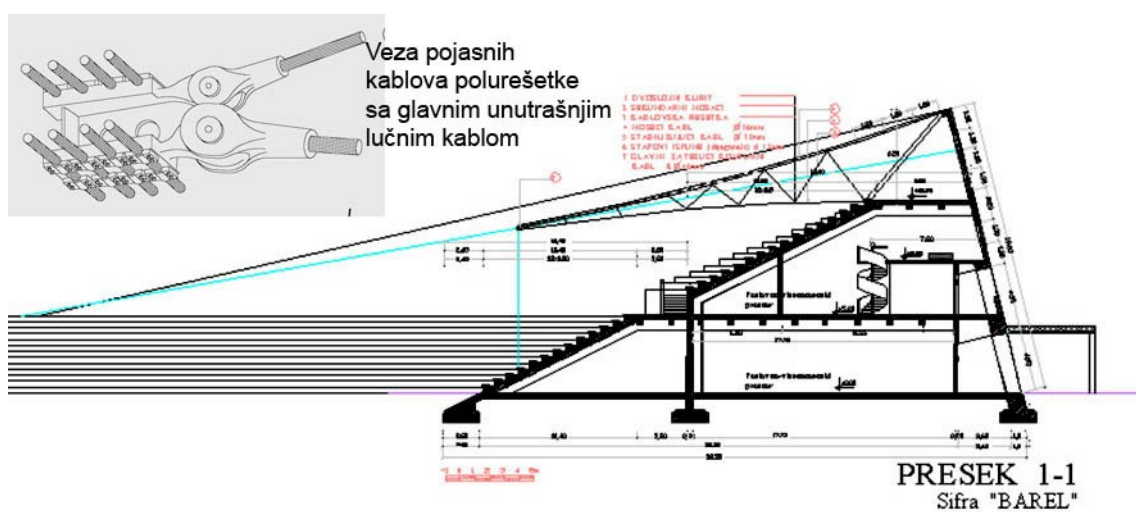
Pokrivanje je izvedeno dvoslojnim polikarbonatom koji je sa donje strane prekriven fotoosetljivom emulzijom, tako da se u periodima dana sa jakim osunčanjem dobija zasenčenje prostora ispod krova (istočna tribina i delovi južne i severne tribine).

Prednosti ovako izradjenog krova sistemom zategnutih kablovskih polurešetki su:

- arhitektonska originalnost i konstrukcijska jednostavnost,
- vrlo mala težina oko $0,30 \text{ kN/m}^2$ krova,
- brzo izvodjenje oko $0,20$ norma h/m^2 krova,
- mala cena izgradnje oko 30 €/m^2 krova.



SLIKA II-11 Idejno rešenje rekonstrukcije i dogradnje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu, dispozicija konstruktivnih elemenata istočne tribine



SLIKA II-12 Idejno rešenje rekonstrukcije i dogradnje istočne tribine Gradskog stadiona u Nišu, presek kroz objekat



SLIKA II-13 *Idejno rešenje kompletne rekonstrukcije i dogradnje Gradskog stadiona u Nišu*

II-8 *Osvrt na moguće probleme koji se javljaju pri izgradnji i eksploataciji krovova pokrivenih kablovskim rešetkama*

Opšti problemi o kojima treba voditi računa pri analizi visećih krovnih sistema - kablovskih rešetki, poznati su kao nelinearno ponašanje sistema, visoki stepen statičke neodređenosti, stabilizacija konstrukcije i velike sile u osloncima lančanica.

Ovde se treba osvrnuti na pojedine specifične probleme koji se mogu javiti u procesu izgradnje i eksploatacije objekata pokrivenih visećim krovnim sistemima. Da bi se problemi izbegli treba obezbediti:

- (1) Ugradnju materijala čiji je kvalitet dokazan odgovarajućim atestima;
- (2) Kvalifikovanost, referentnost i opremljenost izvođača koji montira i zateže konstrukciju;
- (3) Dosledno poštovanje tehnologije montaže, prethodnog naprezanja i organizacije gradnje;
- (4) Visoko stručan i kvalifikovan nadzor prilikom gradnje;
- (5) Osmatranje i ispitivanje delova konstrukcije i konstrukcije u celini:
 - geodetskim instrumentima,
 - inženjerskim instrumentima za kontrolu napona i deformacija,
 - vizuelno.

Osnovna pretpostavka za pravilan rad visećih krovnih sistema je nepomerljivost oslonaca lančanica. Problem koji se javlja ako ovaj uslov nije ispunjen je **labavljenje**

lančanica, tj. pad napona u njima i nestabilnost celokupne krovne konstrukcije koja postaje vrlo osetljiva na nesimetrična opterećenja.

Ovaj problem javio se kod krova bazena u Leskovcu. Ugradnjom materijala slabijeg kvaliteta i nepravilnim povezivanjem vitalnih konstruktivnih elemenata sa oslonačkom konstrukcijom, došlo je do promene strukture materijala čeličnih vretena za zatezanje lančanica i njihovog "tečenja", što je izazvalo pad sila u užadima kablovskih rešetki. Ovaj nedostatak izazvao je labavljenje kablova i nestabilnost krova.

Nepravilno unete sile prethodnog naprezanja u kablove visećeg krova mogu izazvati nestabilnost krovne konstrukcije. Krovne lančanice prethodno naprezane pojedinačno, sa jednog njenog kraja i samo u jednom ciklusu bez naknadne provere unetih sila posle utezanja svih kablova sistema, neminovno dovodi do preraspodele sila u sistemu lančanica i do nestabilnosti krova. Tehnologija montaže i prethodnog naprezanja ovaj problem mogu potpuno eliminisati primenom odgovarajućih postupaka prilikom utezanja. Ovo posebno treba predvideti posebnim **projektom zatezanja lančanica**, a naročito se to odnosi na definisanje svakog pojedinačnog koraka u postupku prednaprezanja kod prostornog sistema kablovskih polurešetki medjusobno povezanih unutrašnjim kružnim ili lučnim kablovima.

Nepravilno određene koordinate oslonaca lančanica dovode do preraspodele sila i mogućeg vitoperenja krovne površi. Posebno je značajno na krutim obodnim nosačima precizno obeležiti tačke ulaska i izlaska lančanica iz njih. Ova obeležavanja moraju se izvršiti na oplati pre betoniranja obodnih nosača. Uobičajeno je da se operacija obeležavanja oslonačkih tačaka lančanica izvodi uz pomoć geodetskih instrumenata. Na taj način greške pri obeležavanju svode se na red veličine $\approx 1\text{mm}$.

Osmatranje i ispitivanje izgradjene konstrukcije važan je element kontrole u funkciji njene trajnosti.

Problemi o kojima treba voditi računa pri projektovanju vezani su za postizanje stabilnosti krovne konstrukcije, ograničavanja maksimalnog pomeranja i ugiba krova usled opterećenja, zamor materijala, kontrolu maksimalnog ubrzanja karakterističnih tačaka krova usled dinamičkih uticaja vetra i seizmike, a sve u skladu sa tehničkim normativima koji važe za kablovske konstrukcije ili se mogu primeniti na njih. Treba reći da ne postoje pravilnici koji regulišu kriterijume stabilnosti visećih konstrukcija na osnovu kojih se mogu projektovati ovakve konstrukcije.

Preporuke konstruktora izgradjenih objekata, opisanih u ovom poglavlju, odnose se na kontrolu sračunatih sila i deformacija na modelima u pogodnoj razmeri, uz upotrebu odgovarajućih instrumenata za statička i dinamička merenja.

Kriterijumi stabilnosti

III-1 Uvod

Viseće konstrukcije u primeni su od davnina u obliku visećih mostova, šatora, mreža za lov i ribolov. Prvobitne konstrukcije izrađivane su od prirodnih materijala biljnog porekla. Na tadašnjem nivou razvoja društva u celini, način izrade samih struktura, priprema materijala, kao i uslovi kvaliteta visećih konstrukcija formirali su se prema iskustvu graditelja, koji je svoje znanje prenosio putem predanja mladim svojim učenicima.

Mnogo, mnogo vekova kasnije, pronalaskom čelika, a zatim i čeličnih užadi 1834. godine, prvobitne zategnute konstrukcije doživljavaju svoj procvat. Industrijska revolucija, savremen pristup materijalima, kao i teorijski doprinos proučavanju otpornosti materijala umnogome su doprineli razvoju čeličnih konstruktivnih elemenata koji su sa uspehom primenjivani na visećim konstrukcijama.

Naravno, teorijska i praktična dostignuća primenjivana su u procesu izrade čeličnih delova konstrukcije i njihovog povezivanja u složenije konstruktivne forme. Međutim, havarije na pojedinim čeličnim konstrukcijama sredinom XX-og veka, dovele su do formiranja standarda, pravilnika i normativa za projektovanje, proračun, montažu i kontrolu konstrukcija od čelika uopšte [2], [12], [13], [21], [23]- [25], [48], [53], [59], [60], [63], [65], [67]-[69], [71], [73]-[76], [87], [93], [100], [105], [108].

III-2 Osvrt na propise za proizvodnju kablova

Današnja regulativa, koja se odnosi na konstrukcije od metalnih užadi, vrlo je obimna i detaljna sa aspekta proizvodnje i isporuke čeličnih žica od kojih se izrađuju čelična užad, proizvodnje i isporuke žičanih užadi, provere kvaliteta žica za užad, provere kvaliteta žičanih užadi, primene žičanih užadi u konstrukciji zgrada,

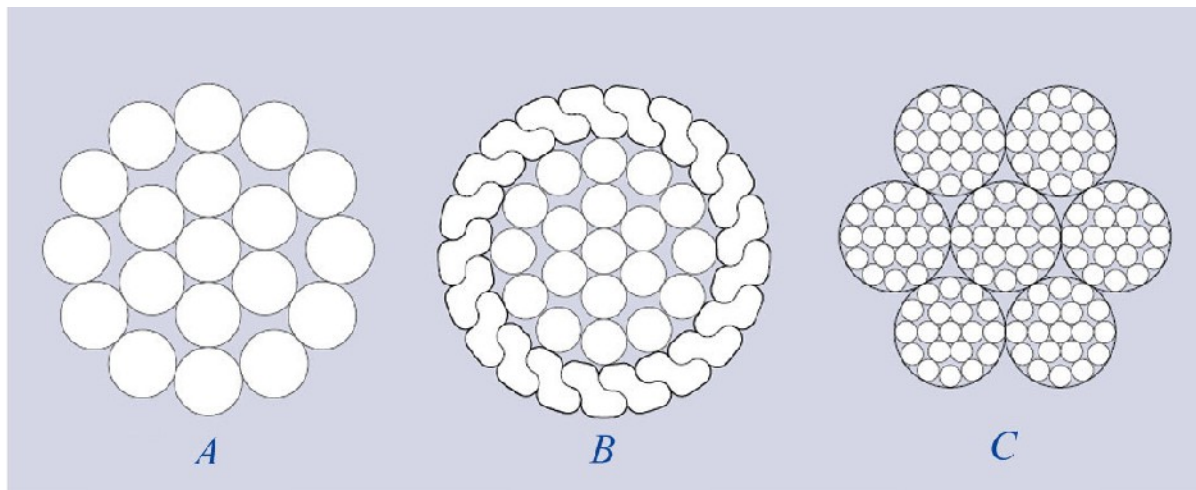
proizvodnje i isporuke delova za povezivanje, provere kvaliteta delova za povezivanje kablova i zaštite od korozije žica i kablova.

Kablove rešetke, kao prethodno napregnuti nosači srednjih i velikih raspona, izrađuju se od žičanih užadi koja su fleksibilnija i lakša za rukovanje i transport u odnosu na snopove i užad od žica za prednaprežanje.

Standardi⁵, propisi i pravilnici u velikoj meri su slični u pojedinim odredbama koje se odnose na kvalitativne osobine metalnih žičanih užadi.

III-2.1 Kablovi

Osnovna komponenta kabla je hladno vučena žica od visokovredne šipke⁶. Nekoliko takvih žica upreda se u obliku spiralnog snopa. Žičana užad izrađuju se od nekoliko spiralnih snopova. Slika III-1 prikazuje neke od brojnih mogućih rešenja žičanih kablova prema katalogima proizvođača.



SLIKA III-1 Primeri žičanih kablova u poprečnom preseku:

A) spiralni snop, B) z-zatvoreno upreden snop, C) žičano uže

III-2.1.a Klasifikacija žičanih kablova

Tipovi žičanih kablova koji se koriste kod "kablovskih rešetki" definisani su kao:

- A Otvoreni spiralni snop sadrži puno okolnih spiralno upredenih žica kružnog poprečnog preseka. Primenuju se kao noseći i prednaprežujući kablovi kod kablovskih rešetki, a mogu se koristiti i kao zatege kod stabilisanja antenskih stubova i dimnjaka ili kao vertikalni nosači kod visećih mostova i sl.
- B Zatvoreno upreden snop. Kod ovog tipa jedan ili više spoljašnjih slojeva sadrži profilisane žice. Vrlo uobičajeno oblikovana žica je u obliku slova "Z". Ove žice, koje zatvaraju jezgro, čine venac koji štiti unutrašnje slojeve od vlage. "Z" žice ne mogu biti iste jačine kao kružne žice, zato otvoreni spiralni snopovi imaju veći

⁵ JUS, DIN, ASTM i EC

⁶ žica $\varphi \leq 12\text{mm}$, šipka $\varphi > 12\text{mm}$

odnos jačina/težina, u odnosu na zatvoreno upredene snopove. Prednost ovakvih kablova je u dugotrajnijoj zaštiti u obliku venca od profilisanih žica, veći moduo elastičnosti i veća površinska otpornost na gnječenje. Slična zaštita može se postići i kod spiralnih snopova kroz zaštitni omotač. Ovi kablovi gube mnogo od jačine na mestu pritiska usled poprečnih spojeva i promena zakrivljenosti. Primenjuju se kao noseći i prednaprežujući kablovi kod kablovskih rešetki, a mogu se koristiti kao spoljašnji kod vešanih mostova ili kao zatege za uravnoteženje i vešanje elastično oslonjenih mostovskih greda.

- C Žičana užad. Izradjuju se upredanjem istog ili različitih tipova snopova, oko jezgra. Ne primenjuju se kod kablovskih rešetki, a koriste se kao ivični kablovi kod tekstilnih membrana i kod konstrukcija za potrebe železnice.

III-2.1.b Zaštitni omotač žičanih kablova

Zaštita od korozije je od presudne važnosti za sigurnost i stabilnost konstrukcije. Materijali upotrebljeni za zaštitu moraju biti ekološki i garantovati dugovečnost konstrukcije.

Zaštita od korozije može se podeliti u tri grupe:

- zaštita od korozije svake žice pojedinačno,
- zaštita od korozije u unutrašnjosti užeta,
- zaštita od korozije spoljašnjeg omotača užeta.

Zaštita od korozije svake žice pojedinačno sprovodi se cinkom, cink-aluminijumom (Galfan proces), aluminijumom ili izradom žica od nerdjajućeg čelika (stainless).

Nanošenje zaštitnog omotača radi se: - galvaniziranjem žica elektrolitički;
- potapanjem žica u rastopljeni metal.

Pasivni efekt aluminijuma u kombinaciji sa cinkom omogućava poboljšanu zaštitu od korozije u odnosu na jako pocinkovane kablove iste debljine i za spoljašne kablove izložene agresivnim atmosferskim uticajima.

Aluminijumski omotač nanosi se u rastopljenom stanju sa čistoćom nanetog metala od 99,5%. Debljina omotača je u funkciji prečnika žice (5%).

Trajnost omotača direktno je proporcionalna njegovoj težini/metru, tj. njegovoj debljini.

TABELA III-1 Zaštita žica u žičanim kablovima

JUS zaštita žica cinkom	Klase zaštite kablova		
	G (gole)	CV (pocinkovane)	JC (jako pocinkovane)
zaštita žica cinkom DIN		Galvanizovane 15gr/m ² – 180gr/m ²	Jako galvanizovane 75gr/m ² – 300gr/m ²
zaštita žica cink-aluminijumom (Galfan proces) DIN			okruglih žica i Z-žica, oko 300gr/m ²
zaštita žica aluminijumom DIN			debljina omotača 5% od prečnika žice
zaštita žica cinkom ASTM	A	B ili B spolja A unutra	C

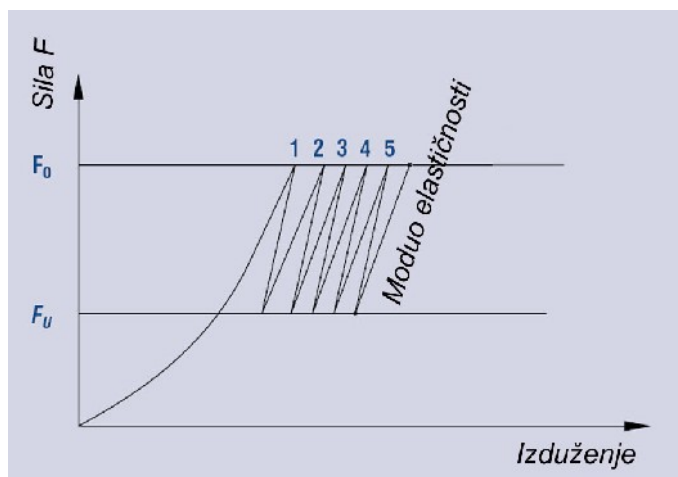
Zaštita od korozije u unutrašnjosti užeta (tzv. unutrašnje punjenje) je popunjavanje svih praznina između žica i to aktivnim ili pasivnim puniocima.

Aktivni punioci su na bazi tankih slojeva poliuretanskih ulja sa cinkovom prašinom ili oksidom olova, dok su pasivni punioci na bazi trajno elasto-plastičnih voskova. I aktivna i pasivna unutrašnja zaštita nanosi se u postupku pouzavanja žica u kablove [2], [53], [63], [65], [71], [93].

Zaštita od korozije spoljašnjeg omotača užeta ostvaruje se potapanjem u rastopljeni cink. Ovakva zaštita zahteva se kod kablova primenjenih na mostovske konstrukcije, sa debljinom zaštitnog omotača od 50 μ m ili 125 μ m.

III-2.1.c Mehanička svojstva i jačina žičanih kablova

Mehanička svojstva osnovnog konstruktivnog čelika koji se koriste pri izradi snopova i užadi za viseće krovne sisteme dat je na *Sl.III-2*. Materijal koji se primenjuje je visokovredni patentirani čelik (oznaka 4, 5 i 6 na slici *III-2*).



SLIKA III-2

Dijagram σ/ϵ za užad koja se prethodno naprežu da bi se kabl ponašao elastično (ciklično zatezanje)

Mehanička svojstva za snopove, užad i kablove i minimalne jačine kidanja date su u Tabeli III-2, sa napomenom da su prikazane vrednosti izvučene iz kataloga proizvođača za minimalne i maksimalne dijemetre elemenata.

Takodje, kada se od kabla zahteva da prejaše preko nekog prevoja, u kabl u će se u većoj ili manjoj meri javiti savijanje i gnječenje, zavisno od odnosa radijus prevoja/dijametar kabla. Ako je ovaj odnos ≥ 20 , karakteristična prekidna sila (F_k) je neumanjena, dok je za odnos prevoj/dijametar kabla ≤ 15 , sila kidanja $0,75F_k$.

III-2.1.d Prednaprezanje i dužina kablova

Posle izrade kablovi nisu stvarno elastični i nikada neće biti potpuno elastični. Prilikom zatezanja u užetu se javlja neelastično i elastično izduženje.

Neelastično izduženje proizlazi manjim delom od tečenja čelika, a većim delom je posledica, tzv. istezanja užeta. Prilikom zatezanja užeta javljaju se poprečna sužavanja koja zajedno sa ispružanjem žica daju neelastičan iznos deformacije. Ovo trajno

izduženje, označeno kao istežanje ili rastežanje, iznosi prema veličini tereta 0,2-0,8%. Deo ovog neelastičnog izduženja javlja se odmah po opterećenju, a ostatak zavisi od trajanja opterećenja. Da bi se ovo neprijatno svojstvo čeličnih užadi i kablova neutralisalo, užad se pre ugradjivanja više puta uzastopno zatežu prethodnom silom 1,2 puta većom od sile kojoj će uže biti izloženo u konstrukciji [93] ili 0,5 od granice kidanja kabla u 3 do 4 ciklusa [2], ili 20% do 42% od minimalne prekidne sile u pet ciklusa [71].

Zategnuti kablovi u konstrukciji i posle izvesnog vremena ponašaće se blisko elastičnom. Ovo će omogućiti žicama kabla da se "preurede" u konačan položaj, što će kabl predstaviti kao elastični materijal. Na ovaj način odstranjuju se neelastične konstruktivne dilatacije.

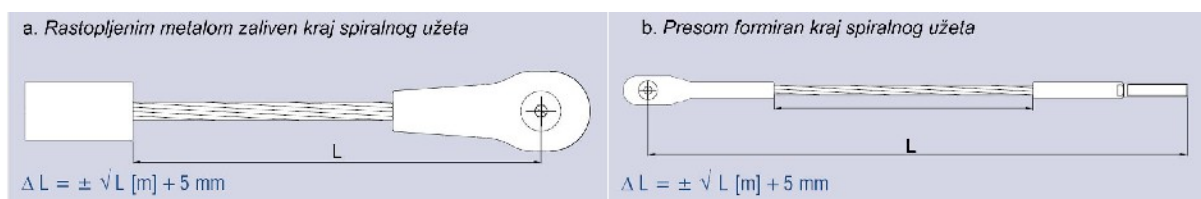
Za primenu u visećim krovnim sistemima važna je linearna zavisnost σ/ϵ za kablove iz sledećih razloga:

- (1) omogućuje pouzdano postavljanje markera za montažu;
- (2) omogućuje proračun tačnih dužina kablova koje zavise od sila u njima;
- (3) dopušta tačan proračun pomeranja.

Viseći krovni sistemi tipa kablovske rešetke veoma su osetljivi na greške u dužinama kablova i mogu izazvati velike razlike u naprežanjima koje su iznad ili ispod računskih. Nosač u tom slučaju može da se izvitoperi kao rezultat netačnosti pri sečenju.

Zahtevana tačnost pri sečenju kablova na određenu dužinu zavisi od temperature na kojoj se "kroje" kablovi, izduženja spona na krajevima užadi, skraćanja koja su uzrok hladjenja posle zalivanja konusnih spojeva na krajevima užadi, procedure podizanja i načina zatezanja konstrukcije.

Nosač se sastavlja u potpunosti na zemlji, podiže na svoju poziciju i zatežu se elementi koji su predviđeni za stabilisanje celog sistema (uglavnom navijanjem navrtki na vretenaste zavrtnjeve prednaprežućih kablova). Zahtevana tačnost sečenja u ovakvim slučajevima je vrlo stroga 1‰ - 2‰ od dužine kabla (AISI [2]) ili $\Delta L = \pm \sqrt{L} \text{ [m]} + 5 \text{ mm}$ (DIN [71]).



SLIKA III-3

Dužina prethodno napregnute užadi u zavisnosti od tipa završne spojnice:

- a. $L \leq 20 \text{ m} \pm 2 \text{ mm}$ ili $L > 20 \text{ m} \pm 1\text{‰}$ b. $L \leq 15 \text{ m} \pm 3 \text{ mm}$ ili $L > 15 \text{ m} \pm 2\text{‰}$

TABELA III-2 *Mehanička svojstva i jačina užadi, snopova i kablova*

	Jed. mere	ASTM		DIN			JUS		
		Otvoreni spiralni snopovi	Žičana užad	Otvoreni spiralni snopovi	Z-zatvoreni spiralni snopovi	Žičana užad	Otvoreni spiralni snopovi	Z-zatvoreni spiralni snopovi	Žičana užad
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Prečnik	mm	12,7-101,6	9,53-101,6	6-66	20-156	6-40	5-60	20-110	4.8-26
Nazivna čvrstoća	N/mm ²	1200-1800	1200-1800	1770	1570	1770	1570 i 1770	1570 i 1770	1570 i 1770
Površina preseka	mm ²	96,8-6193,6	41,9-4897,1	21-2530	254-16819	12.9-728.8	15-2110	254.4-9220	8.24-262
Karakt.prekidna sila	kN	126,5-8229	52,9-6491	33.5-4478	399-26407	22.8-1290	18-2532	254-8220	11.5-386
Moduo elastičnosti za prethodno zatez.kablove	kN/m m ²	158-165	115-140	*	*	*	*	*	*
Moduo elast. za preth. nezatezane kablove	kN/m m ²	115-148	98-125	150	160	90-110	140	160-170	120

- Nema podataka

III-3 *Osvrt na propise za konstruisanje zgrada od kablova*

Problemi o kojima treba voditi računa pri projektovanju vezani su za postizanje stabilnosti krovne konstrukcije, ograničavanja maksimalnog pomeranja i ugiba krova usled opterećenja, kontrolu maksimalnog ubrzanja karakterističnih tačaka krova usled dinamičkih uticaja vetra, zamor materijala, a sve u skladu sa tehničkim normativima koji važe za kablovske konstrukcije ili se mogu primeniti na njih. Treba reći da ne postoje pravilnici koji regulišu kriterijume stabilnosti visećih konstrukcija na osnovu kojih se mogu projektovati ovakve konstrukcije, osim odredaba AISI Manual for Structural Applications of Steel Cables for Buildings, 1996 [2].

III-3.1 *Granična stanja nosivosti - sile u kablovima*

Projektovanje kablovskih rešetki i drugih visećih prethodnonapregnutih konstrukcija, zahteva kontrolu sila i otpornosti konstrukcije na uticaje svih mogućih kombinacija opterećenja. Poprečni presek kabla se usvaja na bazi zatezne prekidne čvrstoće, i obavezno mora zadovoljiti maksimalno propisane sile multiplikovane odgovarajućom konstantom koja zavisi od kombinacije opterećenja [2], [53], [72].

Efektivna projektna jačina kabla mora biti jednaka ili veća od najveće vrednosti sila u kablovima koje nastaju pod uticajem različitih kombinacija opterećenja i iznosi:

- | | | |
|-----|---------------------|--|
| (a) | $2,2 T_1$ | T_1 je sila u kablu usled prednaprezanja i gravitacionog opterećenja; |
| (b) | $1,6 T_1 + 2,7 T_2$ | T_2 je promena zatežuće sile u kablu usled promenljivog opterećenja; |
| (c) | $2,2 T_3$ | T_3 je sila u kablu usled prednaprezanja, gravitacionog opterećenja i promenljivog opterećenja; |
| (d) | $2,0 T_4$ | T_4 je sila u kablu usled prednaprezanja, gravitacionog opterećenja, promenljivog opterećenja i vetra ili zemljotresa; |
| (e) | $2,0 T_5$ | T_5 je sila u kablu u toku podizanja konstrukcije; |
| (f) | $2,0 T_6$ | T_6 je sila u kablu usled prednaprezanja, gravitacionog opterećenja i vetra. |

Takodje, efekat smanjenja temperature u kablovima izazvaće povećanje zatezanja u kablovima, što se može podvesti pod T_1 .

III-3.2 *Granična stanja upotrebljivosti - otpornost konstrukcije*

Konstrukcija mora zadovoljiti sledeće kriterijume stabilnosti da bi bila otporna na uticaj mogućih kombinacija spoljašnjeg opterećenja:

- (1) Maksimalna dozvoljena pomeranja konstrukcije nisu ograničena, osim u slučajevima gde pomeranja krova mogu izazvati oštećenja krovnog pokrivača, kao i promene nagiba (prevoji). S obzirom da nema specifičnih propisanih ograničenja koja viseći krovovi treba da zadovolje, logično je da se primene stroža ograničenja od onih koja važe za

konvencionalne krovove. Projektanti mogu biti slobodni da usvoje minimalno potrebne lokalne ili globalne uslove stabilnosti ^{7, 8}.

- (2) Nijedan od kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti. Minimalni intenziteti sila definišće se proračunom ⁹.
- (3) Uslovi za postizanje rezonance ili kvazirezonance koji dovode do velikih deformacija moraju biti izbegnuti u slučaju da viseći krovovi budu izloženi dinamičkim opterećenjima (vetar, eksplozija ili zemljotres).

Da bi se zadovoljio uslov (1) mora se izvršiti proračun za odgovarajuće kombinacije opterećenja (prednaprezanje, sopstvena težina, pokretno opterećenje: sneg, vetar, seizmika). Poznato je da delimično opterećenje ili koncentrisane sile mogu dovesti do prekoračenja postavljenog uslova. Ako nije poznata raspodela opterećenja od vetra, preporučuje se da se opterećenje od vetra kombinuje sa ostalim opterećenjima. Vetar treba u tom slučaju usvojiti kao kontinualno opterećenje koje deluje kao:

- pritisak po celom rasponu,
- pritisak na polovini raspona a kao „sisanje“ na drugoj polovini raspona ⁵.

Relaksacija kablova, iskliznuće iz ležišta, zagrevanje kablova... doprinosi smanjenju sila u kablovima i mogućoj pojavi nenapregnutih štapova, što dovodi do neispunjenja uslova (2). Stabilnost konstrukcije može biti smanjena, pa se čak mogu pojaviti i velike neočekivane deformacije.

Konstrukcije građene u izraženim seizmičkim zonama ili su izložene eksplozijama ili jakim udarima vetra, potrebno je sprovesti dinamičku analizu sa pobudjujućom silom kako bi se dokazala sigurnost konstrukcije.

III-3.3 Kriterijumi komfora usled vetrom izazvanih pomeranja krova

Projektovanje mnogih visokih zgrada i drugih osetljivih konstrukcija može biti vrlo zavisno od potrebe da se pomeranja izazvana vetrom zadrže na prihvatljivom nivou za korisnike i posetioce. Istraživanja u oblasti percepcije pomeranja mogu predvideti merila za projektante konstrukcija [59].

Poznavanje percepcije pomeranja ne daje merila i kriterijume za projektante konstrukcija. Tačnije, za razvoj kriterijuma za projektovanje bitni su nivo i frekvencija neprihvatljivog pomeranja koje je kritično. Ti kriterijumi se nazivaju „nivoi ubrzanja“. Percepcija pomeranja je mnogo kompleksniji fenomen koji uključuje značajna slušna

7 Pravilnik o tehničkim normativima za noseće čelične konstrukcije, Sl.list SFRJ, 61/86, tačka 25:
„Gornje granice deformacija za pojedine čelične konstrukcije određuju se u odnosu na njihov raspon, tj. za nosače u zgradarstvu $v \leq L/300$ “

8 EC3-Proračun čeličnih konstrukcija: Opšta pravila i pravila za zgrade: Maksimalni ugib u krajnjem stanju u odnosu na pravu liniju koja spaja oslonce $\delta_{max} = L/200$ ili $L/250$, gde je $\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$.
Nadvišenje neopterećenog nosača (δ_0), promena ugiba usled stalnog opterećenja neposredno nakon njegovog nanošenja (δ_1) i promena ugiba usled promenljivog opterećenja (δ_2).

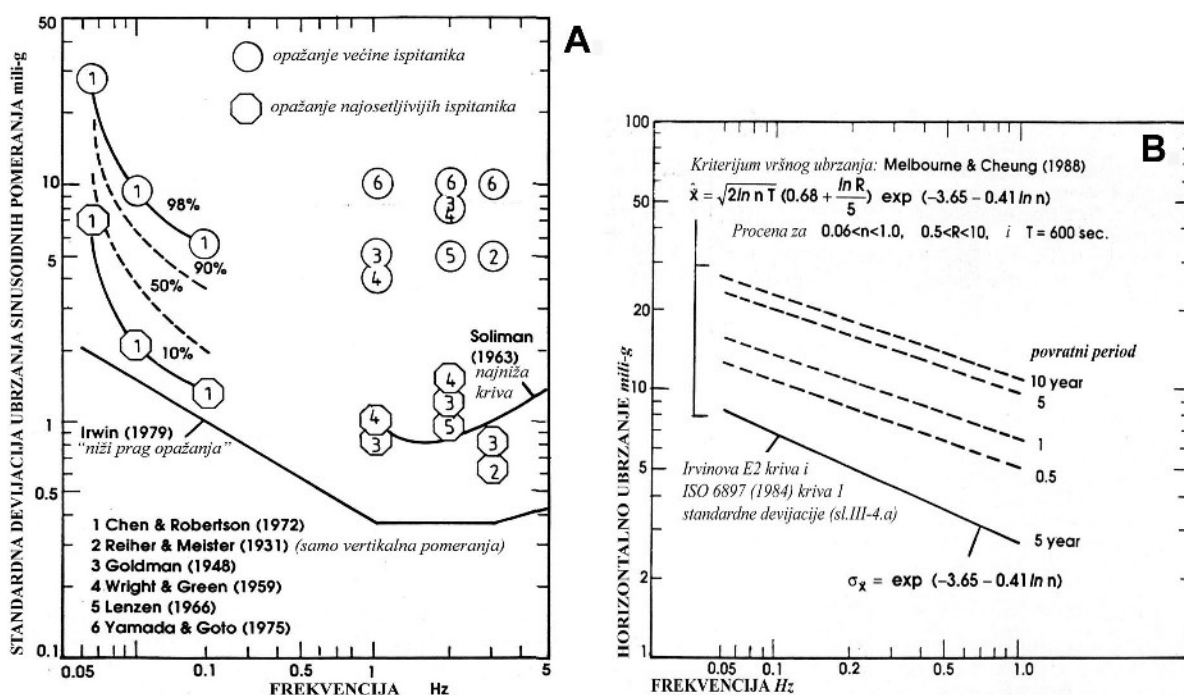
9 Prem Krishna “Cable Suspended Roofs“, p.204

i vizuelna opažanja korisnika. Ubrzanje samo po sebi može imati nekoliko oblika i frekvencija. Može biti translatorno ili rotaciono, a verovatnoća raspodele njegovog odgovora može varirati.

(1) Percepcija pomeranja

Individualna percepcija pomeranja, i stanje raspoloženja, koje to opažanje izazove, zavisi od mnogih psihičkih i psihofizičkih faktora. Izmedju ostalog to je pozicija pojedinca (stajanje, sedenje ili ležanje), zaokupljenost pojedinca nekim poslom (ili besposlenost), slušna iluzija publike (“stenjanje” konstrukcije, “zviždanje” vetra ili “klapanje” liftovskih kablova...) i vizuelne iluzije gledanjem kroz prozor i opažanjem horizonta koji se pomera ili objekata koji se ljiljaju, a stakla u prozorima se uvijaju, kao i reakcija na pomeranja unutrašnjeg uha i drugih organa.

Na slici III-4.A prikazani su uporedni rezultati opažanja horizontalnih sinusoidnih pomeranja. Procena percepcije pomeranja meri se *mili-g* jedinicama standardne devijacije ubrzanja (promenljiva koja varira u funkciji od vremena) i izražava se kao funkcija frekvencije (1 *mili-g* = 0,01 ms^{-2}).



SLIKA III-4

A Prag opažanja horizontalnih pomeranja subjekata koja su izložena sinusoidnim pomeranjima izvedena kao standardna devijacija ubrzanja kao funkcija frekvencije

B Kriterijum horizontalnih ubrzanja za komfor korisnika u zgradama

Predloženi pragovi opažanja pri različitim aktivnostima (stajanje, šetnja, sedenje uza zid, pomeranje unapred i unazad) kao funkcija opažanja korisnika, znače da je moguće reći koja ubrzanja mogu osetiti neki senzitivni ljudi (manje od 10%), polovina populacije do većine ljudi (više od 90%). Ako ovaj opseg primenimo na većinu, postaje važan deo informacija koji nedostaje u mnogim projektima.

Opseg opažanja celokupne populacije kreće se od desetogodišnje percepcije ubrzanja (najneosećljiviji primetiće pomeranja jednom u 10 godina) do godišnje percepcije za one najosećljivije.

Nijedna od studija koje su sprovedene u periodu od 1970. do 1980. nije direktno predložila projektne kriterijume, sve dok kriva E2 (*Sl.III-4.B*) nije proglašena standardom ¹⁰. U svakom slučaju, faktori čujne buke i vizuelnih iluzija ponekad su od izuzetnog značaja, a ne posvećuje im se veća pažnja u fazi projektovanja.

(2) Projektni kriterijumi u funkciji prihvatljivog komfora

Da bi se došlo do ubrzanja, ili nekog drugog kriterijuma koji bi bio osnova za projektovanje, potrebne su dve vrste informacija: definisanje ljudske osetljivosti na pomeranje, tj. definisanje pomeranja koja su prihvatljiva za korisnike prostora, kao i nivo ubrzanja i frekvencija koje su prihvatljive za znatan broj ljudi.

Kriterijumi vršnih ubrzanja dati su izrazom III-1, koji ne smeju biti prekoračeni za postizanje odgovarajućeg korisničkog komfora.

$$\hat{x} = \sqrt{2 \cdot \ln nT} \left(0.68 + \frac{\ln R}{5} \right) \exp(-3.65 - 0.41 \cdot \ln n) \quad \text{III-1}$$

Gde je:

- n* frekvencija oscilacija sa aproksimiranom normalizovanom raspodelom,
- T* trajanje u sekundama,
- R* povratni period u godinama.

Prikaz kriterijuma ubrzanja u funkciji frekvencije dat je na *slici III-4.B* za period od 10 minuta maksimalnog vetra za povratni period od *R* godina. Period od 10 minuta uzet je zato što je to tipičan period maksimalnog odgovora u oblastima dominantnih olujnih aktivnosti i gde srednja projektna brzina teži da bude izvedena iz prividnog pika brzine vetra.

Neke studije predložile su privremeno uputstvo za procenu prihvatljivih pomeranja od vetra kod visokih zgrada i drugih konstrukcija, uključujući i torziona pomeranja zasnovana na vizuelnim iluzijama ovog tipa pomeranja (*Tabela III-3*).

TABELA III-3 *Privremena uputstva za vetrom izazvana pomeranja u visokim zgradama*

		Prihvatljive vrednosti pikova na svaki sat	
		Godišnji događaj	10 god.događaj
1	Rezultante vršnih ubrzanja (sprat na vrhu)	mili-g	
	Stanovanje	5-7	10-15
	Hoteli	7-9	15-20
	Biroi	9-12	20-25
2	Vršna torziona brzina (sprat na vrhu)	mili-rad/s	
	Svi	1.5	3.0

¹⁰ International Standard Organization: Guidelines for the Evaluation of Response of Occupants, Especially Buildings and Off-Shore Structures, to Low Frequency Horizontal Motion (0,063Hz to 1Hz) ISO 6897, Geneva 1984.

Može se reći da nivo ubrzanja kao funkcija povratnog perioda, kako je prikazano u izrazu (III-1), može biti korišćen pri projektovanju da definiše dozvoljene granice prihvatljivog horizontalnog pomeranja za komfor korisnika pri projektovanju zgrada i konstrukcija.

Provera vrednosti najvećeg ubrzanja pod delovanjem vetra na objekat zahteva se i našim standardom JUS U.C7.111-Dinamički koeficijent i aerodinamički pritisak vetra, za objekte takve namene da se ne sme ugroziti udobnost (komfor) korisnika. Maksimalno ubrzanje definisano je izrazom:

$$a_{\max} = 2 \cdot g \cdot I_z \cdot B \cdot \left(\frac{R}{B} \right) \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n_1^2 \cdot \bar{\Delta} \leq a_{\lim} \quad [m/s^2] \quad \text{III-2}$$

Gde su:

- g ubrzanje zemljine teže,
- I_z intenzitet turbulencije po JUS U.C7.110 izračunat za $z=h/2$,
- B faktor prostorne korelacije brzine vetra,
- R rezonantni faktor,
- n_1 frekvencija slobodnih neprigušenih oscilacija konstrukcije u I tonu u Hz ,
- Δ ugib vrha konstrukcije ($z=h$) pod aerodinamičkim pritiskom $q_{m,10,z}$ po JUS U.C7.110 za povratni period vetra od 10godina, u metrima,
- a_{\lim} 2% Zemljinog ubrzanja $\approx 0,20m/s^2$

Kablovske rešetke, kao pokrivna konstrukcija, uvek su iznad korisnika prostora koji su pokriveni, pa se korisnici ne nalaze na samoj konstrukciji već je posmatraju iz „žablje perspektive“. Takodje, po početnim uslovima, konstrukciji su dozvoljena samo dva stepena slobode u vertikalnom Y-pravcu (dominantan) i X-pravcu (zanemarljivo mali). Prosečna sopstvena perioda oscilovanja u I tonu u vertikalnoj ravni kablovskih rešetki raspona 60m do 80m kreće se u granicama od 0,3sec. do 0,5sec., tj. 2Hz do 3.33 Hz .

Jasno je da pomenuti kriterijumi komfora korisnika prostora, koji su pokriveni kablovskim rešetkama, ne mogu biti primenjeni u prikazanom obliku (izrazi III-1, III-2, kao i na slici III-4.A i B) jer se korisnici ne nalaze na konstrukciji, niti su pomeranja horizontalna, a ni frekvencija nije u opsegu manjem od 1 Hz. Medjutim, istraživanja pokrenuta 70-tih godina ukazuju na potrebu da se fenomen „ljuljanja“ krova i njegovog uticaja na korisnike prostora detaljnije proučava. Više razloga ovoj tvrdnji ide u prilog intenziviranja ove vrste uticaja konstrukcije na komfor ljudi ispod krova:

- subjektivni osećaj nesigurnosti,
- širenje opažaja osetljivog dela populacije (2%) na ostale prisutne,
- vremenski period potreban da korisnici opaze „ljuljanje“ sami ili pod uticajem osetljivog dela populacije,
- panika medju prisutnima, posebno publikom na sportskim i grupnim manifestacijama,
- sigurnost same konstrukcije.

III-3.4 *Zamor*

Dobro je poznato da napregnuti štapovi, u kojima prevladjuju sile zatezanja koje se stalno menjaju po intenzitetu, mogu dovesti do oštećenja usled zamora. Vreme zamora zavisi od nivoa apsolutne srednje sile i amplitude sile kolebanja. U obešenim krovovima kablovi su izloženi srednjoj sili zatezanja, koja se menja usled delovanja vetra ili nekog drugog živog (promenljivog) tereta.

Odredjena istraživanja [53], [71], [100] pokazala su da su delovi lančanica, koji se ankeruju u krute ivične nosače, najizloženiji zamoru, pa se zamor može značajno smanjiti upotrebom posebno projektovanih fazonskih elemenata. Jedan od načina da se zamor smanji je tzv. hladno zalivanje ležišta, za koje se koristi tečna smesa čeličnih zrna, cinkovog praha i epoksidne smole. Vek zamora materijala kraći je kod ležišta zalivenih metalom. Jačina ovakvih kablova u funkciji je zagrejanosti žica za vreme zalivanja. Takodje, kablovi, koji imaju veći broj žica istog prečnika, imaju bolju izdržljivost na zamor.

Primenom posebno projektovanih ankernih elemenata koji dozvoljavaju isvesnu slobodu rotacije u osloncu i hladno zalivenim ležištima, problem zamora kod kablovskih rešetki nije primaran problem za postizanje stabilnosti konstrukcije, već može uticati na njenu trajnost.

III-4 *Projektne preporuke u upotrebi*

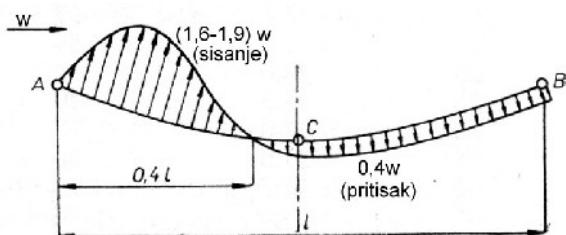
Praktična primena teorijskih računskih modela, standardizovanih kablova i spojnica, graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti u procesu projektovanja i gradnje visećih krovova, ukazala je na najbitniji problem visećih krovnih konstrukcija, a to je **postizanje stabilne krovne površi**. Postizanje stabilne krovne površi podrazumeva dovoljnu zategnutost svih konstruktivnih elemenata da bi se ograničili ugibi krova do limitiranih vrednosti i sprečilo ljuljanje usled nesimetričnih opterećenja, tj. obezbedio neophodan komfor korisnika i posetilaca. Stabilnost krova postiže se povećanjem sila prednaprezanja, tj. stepen zategnutosti cele konstrukcije podiže se na meru koja garantuje ugibe i pomeranja u dozvoljenim granicama usled dejstva najnepovoljnijih spoljašnjih opterećenja.

Preporuke konstruktora izgradjenih objekata [6], [8], [46], [53], istraživača [1], [53], [93] kao i zaključci nekih teorijskih radova [64], [84], [88], [99] ukazuju da se stabilna krovna površ, za nesimetrična opterećenja od vetra, može postići prethodnim naprežanjem visećeg krova, u ovom slučaju kablovske rešetke. Intenzitet zatežuće sile prethodnog naprežanja može se definisati uvođenjem dodatnog spoljašnjeg opterećenja na noseće kablove, uz uslov da prednaprežući kablovi usled najvećeg gravitacionog opterećenja ne smeju biti opuštene (nenapregnuti).

TABELA III-4 Racionalno "opterećenje za prednaprezanje" visećih krovova ¹¹ [93], [99]

Stalni teret i sneg g+s kN/m ²		Potrebno "opterećenje za prednaprezanje" p _p u %	
min	max	min	max
	0,10	100%	300%
0,10	0,50	30%	100%
0,50	1,00	10%	40%
1,00	1,50	7%	15%
1,50	2,00	5%	10%
2,00		0%	5%

Iz Tabele III-4 vidi se da vetar kao opterećenje nije uzet u obzir da bi se odredila sila prednaprezanja. U radovima [93] i [99] autori opterećenje od vetra nanose na konstrukciju prema *Slici III-5*. Sa slike se vidi da je deo konstrukcije izložen "sisanju" vetra, a jedan deo pritisku vetra. Uvodjenjem ovakvog uticaja vetra, mogućnost pritiska vetra po celokupnoj površini krova, može dovesti do opuštanja prednaprežućih kablova i ljuljanja krova. Tabela je rezultat opšteg pristupa svim visećim konstrukcijama, jer sopstvena težina krova i opterećenje od snega intenziteta većeg od 1,5kN/m² javljaju se samo kod jednostrukih lančanica stabilisanih betonskim elementima. Kod kablovskih rešetki i prethodno napregnutih mreža "g+s" je skoro uvek u granicama manjim od 1,5kN/m².



SLIKA III-5

Dejstvo vetra na cilindričnu površ visećih krovova [93], [99]

Tvorac kablovskih rešetki D.Žavert u svojim radovima [46], [84] pri analizi periode oscilovanja, takodje preporučuje uvođenje dodatnog opterećenja (v) na noseće kablove. Dodatno opterećenje u ravnotežnom stanju konstrukcije, bez spoljašnjeg opterećenja, izaziva silu u prednaprežućem kablo. Intenzitet sile u prednaprežućem kablo je u stvari sila prednaprezanja koja garantuje da će sistem ostati zategnut i pod najnepovoljnijim gravitacionim opterećenjem i usled nesimetričnih opterećenja od vetra. Preporuka Žaverta je da odnos dodatnog opterećenja (v) i ukupnog gravitacionog opterećenja (q) iznosi $v/q \leq 0,6$.

U vreme ekspanzije visećih krovnih konstrukcija u svetu i na našim prostorima pokrivena su sportske i izložbene dvorane prethodno napregnutim visećim lančaničnim

¹¹ Pawlowski Z.: Konstrukcje przekryc wiszacych, Budownictwo przemyslowe 7, 1958, 29-30, 35-41 [93]

sistemima. Profesor Edmund Balgač, autor Velike izložbene dvorane u Leskovcu, Sportsko-sajamske hale u Subotici i Omladinsko-rekreacionog centra u Zemunu, svoje proračune zasnovao je na svom originalnom metodu koji je, za prethodno napregnute mreže, podrazumevao uvođenje dodatnog opterećenja na noseće kablove [5]-[10]. Dodatno opterećenje nosećih kablova u direktnom kontaktu sa prednaprežućim kablovima prenose na njih reaktivno opterećenje koje u fazi neopterećenosti izazivaju zatezanje u stabilizujućim kablovima i uspostavljanje ravnoteže. Pri tome je najveća sila prednaprezanja u prednaprežućim-stabilizujućim kablovima u fazi bez spoljašnjeg opterećenja, a najmanja sila u prednaprežućim kablovima u fazi najvećeg gravitacionog opterećenja koje podrazumeva i pritiskajuće dejstvo vetra. Prema profesoru Balgaču dodatno opterećenje (v) treba da ima intenzitet od $0,15 \text{ kN/m}^2$ do $0,20 \text{ kN/m}^2$.

III-5 Sublimirani kriterijumi stabilnosti

- Standardizovani žičani kablovi: zaštićeni protiv korozije, relaksirani, sa ugradjenim odgovarajućim završnim elementima i spojnicama,
- Efektivna projektna jačina kabla mora biti jednaka ili veća od najveće vrednosti sila u kablovima koje nastaju pod uticajem različitih kombinacija opterećenja multiplikovana odgovarajućom konstantom [2],
- Maksimalna dozvoljena pomeranja konstrukcije ne smeju biti veća od propisanih [23], [53], [73], [74],
- Nijedan od kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti [53],
- Uslovi za postizanje rezonance ili kvazirezonance, koji dovode do velikih deformacija, moraju biti izbegnuti u slučaju da viseći krovovi budu izloženi dinamičkim opterećenjima (vetar, eksplozija ili zemljotres) [46], [53], [93].

Definisani kriterijumi stabilnosti su zavisni od stepena zategnutosti konstrukcije (prednapregnutosti). S obzirom da stepen zategnutosti konstrukcije nije na pogodan način definisan i prilagodjen praktičnoj primeni, naučni cilj ovog rada biće pronalaženje odgovarajućeg nivoa zategnutosti - prednaprezanja sistema kroz proračun, tj. traženje minimalnih sila prethodnog naprezanja koje garantuju stabilnost krovne površine i pod najnepovoljnijim kombinacijama opterećenja, a u zavisnosti od težine krova (g), raspona konstrukcije (L), poprečnog preseka nosećih elemenata-kablova (A), načina povezivanja nosećih i prednaprežućih kablova, pri ostalim opterećenjima koja se neće menjati: sneg (s) i vetar (w).

POGLAVLJE *IV*

Analiza

visećih krovnih sistema

korišćenjem

metode konačnih pomeranja

IV-1 Opšte

U ovom poglavlju razmatra se problem teorijske analize prethodno napregnutih kablovskih sistema. Takođe će se analizirati faktori koji pojednostavljuju, isto kao i oni koji komplikuju problem, pretpostavke i aproksimacije uobičajeno činjene u analizama kao i numerički postupci.

Poznato je da kablovski elementi primaju isključivo sile zatezanja. Ako su izloženi sili pritiska elementi postaju labavi. Ovo može da prouzrokuje velike lokalne deformacije. Zbog toga se viseći krovni sistemi prednaprežu kako bi pod najnepovoljnijim opterećenjem konstrukcija ostala stabilna.

U plejadi autora koji su 70-tih godina XX veka znatno doprineli bržem razvoju prethodno napregnutih visećih krovnih sistema značajno mesto pripada dr H. Melmanu [64].

Melman primenjuje opštu formulaciju matične metode konačnih elemenata i postavlja generalne principe za geometrijsku nelinearnost problema, kao bitnu karakteristiku ponašanja ovakvih konstruktivnih sistema. Definisani postupak poznat je pod nazivom **Metoda pomeranja za nelinearne elastične strukture** i uzima u obzir efekte konačnih pomeranja. Za rešavanje sistema nelinearnih jednačina koriste se numerički iterativni postupci. Izvodjenjem konstitutivnih jednačina, matrica krutosti za elemente i celu strukturu, dolazi se do nelinearnih algebarskih jednačina, koje se rešavaju Njutn-Rafsonovom metodom.

Moglo bi se reći da je Melman sintetizovao svoju teoriju na postavkama prethodnika koje i sam citira: Bendiksen, Ostenfeld, Argiris, Kelsej, Pastel, Liveslej i Przemieniecki, a nakon njega unapredjenju metoda doprineli su: Leonhard, Šlaih, Krišna, Kar, Okazaki, Ivković, Ačić, Praščević, Klem... Literatura korišćena pri izradi ovog poglavlja navedena je pod brojevima [4], [16], [17], [27], [28], [31], [33], [36], [49]-[51], [53], [56]-[58], [64], [78], [85], [86], [90], [103] i [118].

IV-2 Metod pomeranja

IV-2.1 Osnovne postavke

Fizička postavka problema direktno je uticala na definisanje matematičkog modela za proračun, a **pretpostavke** koje su uvedene olakšale su njegovo formulisanje za primenu na računaru:

- (1) *Kabl je tretiran kao potpuno fleksibilan element, tj. ne prima momente savijanja;*
- (2) *Kabl ne prima sile pritisaka;*
- (3) *Krovni pokrivač ne učestvuje u stabilizaciji krova;*
- (4) *Presek kablova tretira se kao čvor (zglob);*
- (5) *Kablovski elementi između dva čvora su pravi;*
- (6) *Spoljne sile deluju u slobodnim (neosloničkim) čvorovima sistema;*

Melman postavlja osnovni princip virtuelnog rada, kao dva posebna principa:

P₁ Ukupan rad spoljnih sila jednak je ukupnom radu unutrašnjih sila za proizvoljna infinitezimalna pomeranja čvorova saglasna vezama sistema.

P₂ Rad unutrašnjih sila svakog elementa jednak je nuli za infinitezimalna pomeranja tog elementa, shvaćena kao pomeranja krutog tela.

Ovi principi podrazumevaju stanje ravnoteže sistema.

IV-3 Jednačine metode pomeranja u Dekartovom koordinatnom sistemu

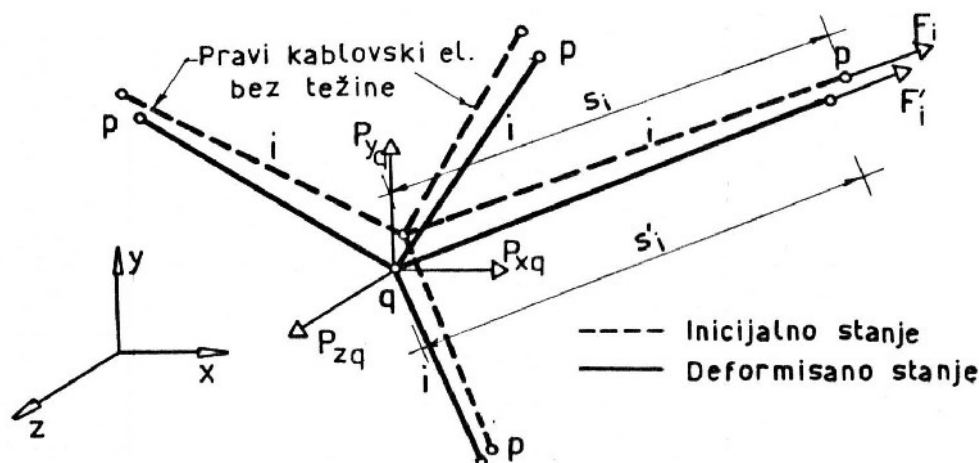
Jednačine će biti izvedene razmatranjem slobodnog čvora mreže q koji je povezan sa susednim čvorom p elementom i . Sila zatezanja u tipičnom elementu je F_i , a njegova dužina s_i . Početne koordinate čvora p i q su x_p, y_p, z_p i x_q, y_q, z_q . Kao što je prikazano na *Sl.IV-1*, spoljašnje sile P_{xq}, P_{yq}, P_{zq} deluju u čvoru q . Pomeranja čvorova q odnosno p obeležena su kao u_p, v_p, w_p odnosno u_q, v_q, w_q u pravcu koordinatnih osa x, y, z . Sila F_i i dužina s_i menjaju se za iznos ΔF_i , odnosno Δs_i , i postaju F_i' odnosno s_i' .

Jednačine ravnoteže u čvoru q , pre nanošenja opterećenja, mogu se napisati:

$$\sum_i \frac{F_i}{s_i} (x_p - x_q) = 0 \quad \sum_i \frac{F_i}{s_i} (y_p - y_q) = 0 \quad \sum_i \frac{F_i}{s_i} (z_p - z_q) = 0 \quad \text{IV-1}$$

Ovo podrazumeva da je pretpostavljena geometrija strukture u ravnoteži sa primenjenim silama. Slučaj kada ova pretpostavka nije ispunjena, tj. kada početna geometrija za zadate sile treba da bude pronadjena, biće razmatran u sledećem poglavlju. Dužina elementa s_i može se izraziti:

$$s_i = \left[(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2 \right]^{1/2} \quad \text{IV-2}$$



SLIKA IV-1 Slobodan čvor mreže u Dekartovom koordinatnom sistemu

Usled delovanja opterećenja, jednačine IV-1 i IV-2 će se promeniti, pa se dobija izraz IV-3:

$$\sum_i \left[\frac{F'_i}{s'_i} (x_p + u_p - x_q - u_q) \right] + P_{xq} = 0$$

$$\sum_i \left[\frac{F'_i}{s'_i} (y_p + v_p - y_q - v_q) \right] + P_{yq} = 0$$

$$\sum_i \left[\frac{F'_i}{s'_i} (z_p + w_p - z_q - w_q) \right] + P_{zq} = 0$$
IV-3

$$s'_i = \left[(x_p + u_p - x_q - u_q)^2 + (y_p + v_p - y_q - v_q)^2 + (z_p + w_p - z_q - w_q)^2 \right]^{1/2}$$
IV-4

Takodje je $F'_i = F_i + \Delta F_i$, pa je:

$$\Delta F_i = E A_i \left(\frac{s'_i - s_i}{s_i} \right) = E A_i \left(\frac{s'_i}{s_i} - 1 \right)$$
IV-5

gde je $E A_i$ aksijalna krutost i -tog elementa.

Jednačine IV-2 i IV-4 mogu se transformisati, pa se dobija:

$$s'_i = s_i \sqrt{1 + 2a_i + b_i}$$
IV-6

gde je:

$$a_i = \frac{1}{s_i^2} [(x_p - x_q)(u_p - u_q) + (y_p - y_q)(v_p - v_q) + (z_p - z_q)(w_p - w_q)]$$

$$b_i = \frac{1}{s_i^2} [(u_p - u_q)^2 + (v_p - v_q)^2 + (w_p - w_q)^2]$$

Proširenjem desne strane jednačine IV-6 i uvodjenjem pogodne smene u jednačinu IV-5, dobija se:

$$\Delta F_i = E A_i \left(a_i + \frac{1}{2} b_i - \frac{1}{2} a_i^2 - \frac{1}{2} a_i \cdot b_i + \frac{1}{2} a_i^3 + \dots \right) \quad \text{IV-7}$$

Izraz IV-6 može se napisati u obliku:

$$\frac{1}{s'_i} = \frac{1}{s_i} \left(1 + 2 a_i + b_i \right)^{1/2}$$

a proširenjem ovog izraza dobiće se:

$$\frac{1}{s'_i} = \frac{1}{s_i} \left(1 - a_i - \frac{1}{2} b_i + \frac{3}{2} a_i^2 + \frac{3}{2} a_i b_i - \frac{5}{2} a_i^3 \dots \right) \quad \text{IV-8}$$

Zamenom IV-1, IV-7 i IV-8 u jednačine IV-3, i preuredjenjem tako da prvi stepen pomeranja u, v, w predje na levu stranu, dobiće se:

$$\begin{aligned} \sum_i \left[F_i \frac{u_p - u_q}{s_i} + (E A_i - F_i) \frac{x_p - x_q}{s_i} a_i \right] &= -P_{xq} + R_{xq} \\ \sum_i \left[F_i \frac{v_p - v_q}{s_i} + (E A_i - F_i) \frac{y_p - y_q}{s_i} a_i \right] &= -P_{yq} + R_{yq} \\ \sum_i \left[F_i \frac{w_p - w_q}{s_i} + (E A_i - F_i) \frac{z_p - z_q}{s_i} a_i \right] &= -P_{zq} + R_{zq} \end{aligned} \quad \text{IV-9}$$

gde je:

$$\begin{aligned} R_{xq} &= - \sum_i (E A_i - F_i) \left[\frac{u_p - u_q}{s_i} c_i + \frac{x_p - x_q}{2 s_i} d_i \right] \\ R_{yq} &= - \sum_i (E A_i - F_i) \left[\frac{v_p - v_q}{s_i} c_i + \frac{y_p - y_q}{2 s_i} d_i \right] \\ R_{zq} &= - \sum_i (E A_i - F_i) \left[\frac{w_p - w_q}{s_i} c_i + \frac{z_p - z_q}{2 s_i} d_i \right] \\ c_i &= a_i + \frac{1}{2} b_i - \frac{3}{2} a_i^2 \quad d_i = b_i - 3 a_i^2 - 3 a_i b_i + 5 a_i^3 \end{aligned}$$

Izrazi za R_{xq} , R_{yq} i R_{zq} sadrže drugi i treći stepen pomeranja u, v, w dok su viši stepeni zanemareni. Izrazi za R predstavljaju, u stvari, **rezidualne sile** (zaostale) koje inače linearna teorija zanemaruje.

Za kablovske prostorne strukture po svakom čvoru potrebno je postaviti tri jednačine IV-9, što znači da će za ceo sistem biti potrebna postaviti $3N$ jednačina, gde je N broj slobodnih čvorova. Rešenje sistema jednačina pogodnom iterativnom metodom daće vrednosti za u, v, w . Zamenom ovih vrednosti u izraz IV-7 daće promenu sila u štapovima.

Problem proračuna kablovskih struktura svodi se na rešavanje nelinearnih jednačina IV-9. Kada se ove jednačine postave za celokupnu strukturu, mogu se izraziti u matričnom obliku:

$$K \cdot U = -P + R \quad \text{IV-10}$$

gde je: **K** - matrica krutosti sistema, a članovi matrice su nepoznate u, v, w , kao u jednačinama IV-9
U - vektor nepoznatih u, v, w
P - vektor opterećenja
R - vektor kolona zaostalih sila R_{xq}, R_{yq}, R_{zq} .

Veličina matrice **K** biće $2N \times 2N$ za ravanske sisteme (kablovske rešetke), odnosno $3N \times 3N$ za prostorne strukture (mreže). Slično, da bi matrice bile saglasne, vektori **U, P, R** veličine su $2N \times 1$ ili $3N \times 1$ za gornje slučajeve.

Ne postoji direktan metod rešavanja jednačina IV-10, zbog desne strane jednačine koja sadrži **R** i nelinearna je funkcija nepoznatih pomeranja. Zbog toga će se usvojiti iterativni numerički postupak rešavanja jednačina. Neke od numeričkih mogućnosti biće prikazane kasnije.

Svaki iterativni postupak zahteva usvajanje (pretpostavku) početnih vrednosti. U ovom slučaju potrebno je raspolagati koordinatama čvorova strukture i silama u štapovima za koje se pretpostavlja da su u datom sistemu u ravnoteži. Zbog toga, u opštem slučaju, treba formirati stvarno ravnotežno stanje pre nego se na strukturu nanese spoljašnje opterećenje. Problem se može rešiti pogodnom modifikacijom gore izvedenih jednačina. Pretpostavljene koordinate čvorova kroz iterativni postupak numeričkog rešenja se menjaju dok se ne uspostavi ravnoteža sila u sistemu. Da bi se rešio ovaj problem, jednačine IV-9 se menjaju unošenjem sledeća dva uslova:

(1) Za pretpostavljenu geometriju jednačine ravnoteže IV-1 ne moraju biti zadovoljene;

(2) Sile u štapovima date su kao konstante, tj. $F_i' = F_i$ ili $\Delta F_i = 0$.

$$\sum_i \left[\frac{F_i}{S_i} (u_p - u_q) - (x_p - x_q) a_i \right] = -P_{xq} + R_{xq}$$

$$\sum_i \left[\frac{F_i}{S_i} (v_p - v_q) - (y_p - y_q) a_i \right] = -P_{yq} + R_{yq} \quad \text{IV-11}$$

$$\sum_i \left[\frac{F_i}{S_i} (w_p - w_q) - (z_p - z_q) a_i \right] = -P_{zq} + R_{zq}$$

Ovde su u ovom slučaju P_{xq}, P_{yq}, P_{zq} komponente dela opterećenja od sopstvene težine koje deluje koncentrisano u čvorovima:

$$R_{xq} = - \sum_i \frac{F_i}{S_i} \left[(x_p - x_q) - (u_p - u_q) a_i - \frac{1}{2} (x_p + u_p - x_q - u_q) e_i \right]$$

$$R_{yq} = - \sum_i \frac{F_i}{S_i} \left[(y_p - y_q) - (v_p - v_q) a_i - \frac{1}{2} (y_p + v_p - y_q - v_q) e_i \right]$$

$$R_{zq} = - \sum_i \frac{F_i}{S_i} \left[(z_p - z_q) - (w_p - w_q) a_i - \frac{1}{2} (z_p + w_p - z_q - w_q) e_i \right]$$

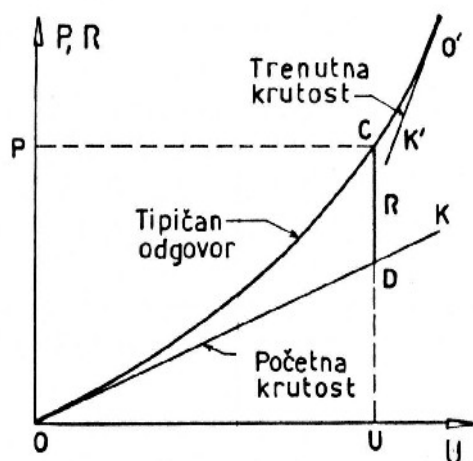
$$e_i = -b_i + 3 a_i b_i - 5 a_i^3$$

IV-4 Numeričke procedure

U ovom odeljku biće prikazane i komentarisane neke numeričke iterativne procedure. Koraci iterativnog rešavanja sistema nelinearnih jednačina mogu se definisati:

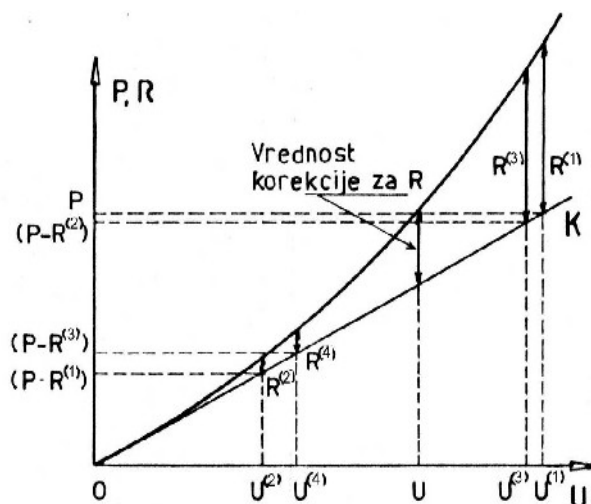
- (1) Pretpostavljene vrednosti U ;
- (2) Sračunavanje R na osnovu koraka (1);
- (3) Da bi se vrednosti U tačnije odredile, rešava se $K U = -P + R$;
- (4) Dobijaju se korigovane vrednosti R na osnovu rezultata dobijenih u koraku (3);
- (5) Ponavljaju se koraci (3) i (4) dok se ne postigne željena tačnost, tj. vrednosti U ili R u dva uzastona ciklusa iteracije slažu se sa dovoljnom tačnošću.

Moguće su varijacije u načinu postavljanja i rešavanja jednačina u koraku (3) u svakom ciklusu iteracija. Ove mogućnosti biće objašnjene uz pomoć jednostavnih grafičkih prikaza, bez upuštanja u matematičke pojedinosti. Karakteristike strukture date odnosom opterećenje/pomeranja biće prikazane nelinearnim krivama u više prostornih pravaca. Jedna takva kriva prikazana je na *Sl.IV-2* (takodje, na *Sl.IV-3* do *Sl.IV-5*, koje ilustruju numeričke šeme). Poznato je da tangenta krive u svakoj pojedinačnoj tački predstavlja krutost K strukture, za stanje ravnoteže, predstavljeno u toj tački. Na primer, tangenta u koordinatnom početku predstavlja *početnu krutost* sistema, dok tangenta u bilo kojoj drugoj tački K' predstavlja *trenutnu krutost* za stanje ravnoteže u tački O' . Za naneto opterećenje P korekcija vrednosti pomeranja je U , a odgovarajuća tačka koja se traži na krivoj je C . Duž C-D izmedju početne krutosti i krive predstavlja vrednost nelinearnih argumenata sadržanih u R .



SLIKA IV-2

Tipičan nelinearni odgovor krivine kabla



SLIKA IV-3

Grafički prikaz numeričke šeme "1"

IV-4.1 Šema 1: Modifikovan Njutn-Rafsonov metod

Grafička prezentacija koraka u svakoj pojedinačnoj iteraciji data je na *Sl.IV-3*. Koraci jedne iteracije su sledeći:

- (1) Pretpostavljaju se vrednosti $\mathbf{U}^{(0)}=\mathbf{R}^{(0)}=\mathbf{0}$;
- (2) Sračunava se $\mathbf{K} \mathbf{U}^{(1)} = -\mathbf{P}$ da bi se dobile vrednosti $\mathbf{U}^{(1)}$;
- (3) Pogodnom zamenom $\mathbf{U}^{(1)}$ sračunava se $\mathbf{R}^{(1)}$;
- (4) Da bi se vrednosti $\mathbf{U}^{(2)}$ tačnije odredile, rešava se $\mathbf{K} \mathbf{U}^{(2)} = -\mathbf{P} + \mathbf{R}^{(1)}$;
- (5) Ponavljaju se koraci (3) i (4) dok se ne postigne željena tačnost, koja se definiše za svaki pojedinačni problem.

Proračun ovim metodom zasniva se na **početnoj krutosti strukture**, tj. matrica krutosti strukture za svaki pojedinačni problem biće sračunata jednom i svi sledeći ciklusi iteracija biće zasnovani na njoj ($\mathbf{K}=\text{const}$). Ovo je prednost u odnosu na šeme "2" i "3", koje će biti kasnije objašnjene. Medjutim, ova šema ima i svoje nedostatke: promene fizičke ili elastične prirode, koje se mogu očekivati nakon nanošenja opterećenja, ne mogu se ugraditi u matricu krutosti.

Sa *Sl.IV-3* vidi se da vrednosti \mathbf{U} i \mathbf{R} oscilujuju oko tačne vrednosti u uzastopnim ciklusima iteracija. Zbog toga je **konvergencija spora** pa procedura nije pogodna za visok stepen nelinearnosti. Takodje je moguće da za veliko naneto opterećenje $\mathbf{R}^{(1)}>\mathbf{P}$, pa je $\mathbf{P}-\mathbf{R}^{(1)}$ negativno, što će dovesti do negativne vrednosti za $\mathbf{R}^{(2)}$. Lako je zaključiti da je moguće očekivati divergenciju u nekim slučajevima.

IV-4.2 Šema 2: Njutn-Rafsonov metod

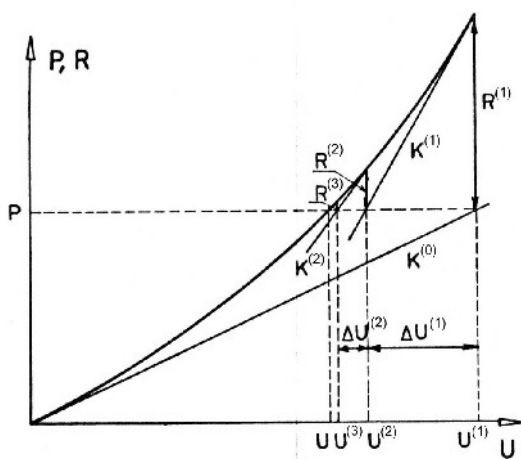
Procedura opisana ovde naziva se **Njutn-Rafsonov metod** i bitno se razlikuje od prethodne šeme. Proračun po ovoj metodi zasniva se na **trenutnoj krutosti strukture**, izvedenoj nanovo u svakom narednom ciklusu iteracije. Mnogo brža konvergencija može se očekivati upotrebom ovog metoda, čak i kod problema kod kojih šema "1" divergira. Ovaj metod, svakako, neophodno prenosi u svaki naredni ciklus iteracije obimnu proceduru pronalaženja nove (trenutne) matrice krutosti. Na drugoj strani, sve očekivane promene elastične i fizičke prirode, koje nastaju u procesu proračuna, mogu se lako ugraditi u matricu krutosti. Koraci svake pojedinačne iteracije opisani su i prikazani na *Sl.IV-4*.

- (1) Pretpostavljaju se vrednosti $\mathbf{U}^{(0)}=\mathbf{R}^{(0)}=\mathbf{0}$;
- (2) Sračunava se $\mathbf{K}^{(0)} \mathbf{U}^{(1)} = -\mathbf{P}$ da bi se dobile vrednosti $\mathbf{U}^{(1)}$;
- (3) Uz pomoć dobijenih vrednosti $\mathbf{U}^{(1)}$ sračunava se $\mathbf{R}^{(1)}$;
- (4) Rešava se $\mathbf{K}^{(1)} \Delta \mathbf{U}^{(1)} = \mathbf{R}^{(1)}$ da bi se dobilo $\Delta \mathbf{U}^{(1)}$, koje je korekcija $\mathbf{U}^{(1)}$. Na ovaj način se procenjuje $\mathbf{U}^{(2)} = \mathbf{U}^{(1)} + \Delta \mathbf{U}^{(1)}$, i $\mathbf{R}^{(2)}$;
- (5) Rešava se $\mathbf{K}^{(2)} \Delta \mathbf{U}^{(2)} = \mathbf{R}^{(2)}$, i tako u sledeći ciklus iteracije.

Ova procedura nastavlja se sve dok vrednosti $\Delta \mathbf{U}$ ili \mathbf{R} ne postanu manje od željene tačnosti, koja se definiše za svaki pojedinačni problem.

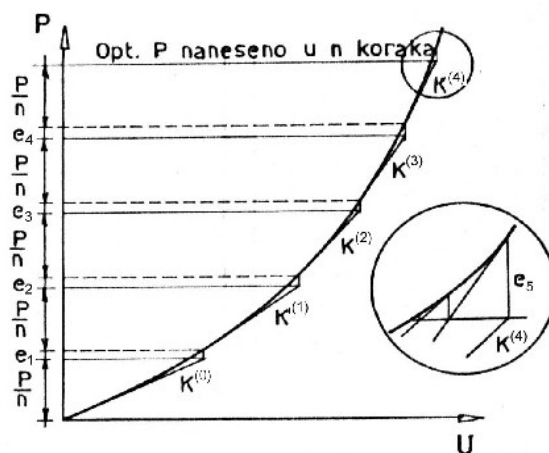
IV-4.3 Šema 3: Inkrementalno opterećenje

Mnogi praktični problemi kablovskih krovova, koji se susreću u praksi, zadovoljavajuće se rešavaju šemom "2". U slučaju da šema "2" ne zadovoljava, dalje poboljšanje procedure moguće je **nanošenjem opterećenja u nekoliko koraka** umesto odjednom. Grafički prikaz procedure dat je na *SL.IV-5*. Gde je $K^{(0)}$ početna matrica krutosti, a $K^{(1)}, K^{(2)} \dots$ su trenutne matrice krutosti sračunate posle svakog koraka opterećenja. Vidi se sa slike da se pri svakom koraku opterećenja javlja zaostala greška (e_1, e_2, e_3, \dots). Što je korak opterećenja manji i greška je manja, ali ipak postoji. Ovo se može izbeći ugradjivanjem šeme "2" u svaki korak ove metode. Procedura tako zadržava prednosti šeme "2" i ima dodatnu prednost uklanjanjem ograničenja za visok stepen nelinearnosti. Medjutim, postoji problem: kako izabrati optimalni inkrement opterećenja da bi se postigla maksimalna tačnost u nekoliko ciklusa proračuna, ako je to moguće.



SLIKA IV-4

Grafički prikaz numeričke šeme "2" (Njutr-Rafsonov metod)



SLIKA IV-5

Grafički prikaz numeričke šeme "3" (inkrementalno opterećenje)

Klasu problema kod kojih se javlja tečenje mnogo je pogodnije rešavati inkrementalnom procedurom. Tečenje se javlja u kablovskoj strukturi pod konstantnim opterećenjem i naziva se stacionarni problem. Izbijanje požara dovodi do visokih temperatura koje izazivaju puzanje. Takođe i dinamički problemi se rešavaju inkrementalnom procedurom. Ovo je u principu, vremenski zavisani problem koji se rešava unošenjem **inkremenata vremena**.

IV-4.4 Procedura prekida

Korišćenjem bilo koje od opisanih numeričkih šema, proračun će biti završen kada se postigne tražena tačnost rezultata. Pretpostavka je da je provera izvršena u v -tom ciklusu iteracije, a proces će biti zaustavljen ako su zadovoljeni zadati uslovi:

$$\left| \frac{u_q^{(v)} - u_q^{(v-1)}}{u_q^{(v)}} \right| < \Delta \quad \text{ili} \quad \left| \frac{R_{xq}^{(v)}}{P_{xq}} \right| < \Delta$$

IV-12

gde je:

- $\mathbf{u}_q^{(v)}$ - pomeranje u \mathbf{v} -tom ciklusu,
- $\mathbf{u}_q^{(v-1)}$ - pomeranje u $(\mathbf{v}-1)$ -om ciklusu,
- $\mathbf{R}_{xq}^{(v)}$ - rezidualna sila u x-pravcu u \mathbf{v} -tom ciklusu,
- \mathbf{P}_{xq} - spoljašnje opterećenje u x-pravcu naneto na čvor \mathbf{q} ,
- Δ - definisana tačnost.

Obično, kada se javlja veliki broj promenljivih (pomeranja i sile) sprovode se obe provere. Nije neophodno proveravati svaku nepoznatu, sasvim je dovoljno pronaći najveće pomeranje u \mathbf{v} -toj iteraciji i izvršiti proveru oba uslova za taj čvor i elemente koji se stiču u njemu.

IV-5 *Dinamička analiza prethodno napregnutih kablovskih sistema*

IV-5.1 *Opšte*

Kablovske strukture, uopšte, sklone su aerodinamičkom pobudjivanju ili njihanju, sve dok su slobodno obešene. Ovoj klasi konstrukcija pripadaju i viseći mostovi koji imaju duge i vitke linije. Veliki nedostaci takvih mostova, s obzirom na aerodinamičke sile, ranije su mnogo razmatrani. Takvi problemi kod krutih krovova postoje u mnogo manjoj meri. Aerodinamički fenomen ovakvih struktura može izazvati osećaj nesigurnosti i neprijatnosti kod korisnika i posetilaca tako pokrivenog prostora. Ako je objekat lociran u regionu burnih vetrova ili seizmičkih pomeranja, dinamički odgovor konstrukcije traži pažljiv proračun, tako da je ista stabilna i pouzdana.

Zato će sada biti reči o prikazu načina za proračun osnovnog odgovora za kablovske sisteme.

Vibracije krova mogu biti izazvane vetrom, eksplozijom ili zemljotresom. Vetar ili eksplozija direktno deluju na krov i mogu izazvati ljuljanje, dok se zemljotres prvo prenosi na oslonačku konstrukciju pa tek onda na krov. Uopšte, vertikalne, bočne i torzione oscilacije, kao i njihove kombinacije, su moguće i realne. Naravno, u slučaju obešenih krovova realno je očekivati samo vertikalne ili poprečne simetrične ili antisimetrične vibracije, sa velikim amplitudama [17], [53], [55], [58], [118].

Procedura dinamičke analize obešenih krovova sastoji se u sledećem:

- Definisane dinamičkih karakteristika kablovskog sistema, sa pokrivačem ili bez njega,
- Procena prigušenja za različite praktične situacije,
- Definisane vremenski zavisnog opterećenja koje odgovara silama vetra, eksploziji ili seizmičkim silama,
- Izračunavanje dinamičkog odgovora sa primenjenim vremenski zavisnim silama.

Proračun slobodnog ili prinudnog dinamičkog odgovora strukture može se pribaviti analitički. Metodi proračuna su razvijeni do stepena dovoljne tačnosti i biće ukratko izloženi u ovom poglavlju. Dejstvo vetra ili seizmičkog pobudjivanja, kao i procena

prigušenja, moraju se bazirati na eksperimentalnim podacima, jer postoji veliko odstupanje od postavljenih zahteva i dostupnih podataka.

IV-5.2 Analiza modela sa koncentrisanim masama

Kablove konstrukcije i u statičkom i u dinamičkom pogledu ponašaju se kao geometrijski nelinearne strukture zbog mogućnosti pojave velikih deformacija. Svaka detaljnija statička i dinamička analiza ovaj fenomen moraju uzeti u obzir. Međutim, u dinamičkoj analizi vrši se linearizacija, kao vid uprošćenja problema. Kablovi sistemi mogu se analizirati kao kontinualni ili kao diskretizovani sistemi.

Uopšte, jednačina dinamičke ravnoteže za sistem sa koncentrisanim masama može se iskazati u sledećem obliku:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = G + P(t) \quad \text{IV-13}$$

Gde je:

- [M] = matrica masa,
- [C] = matrica prigušenja,
- [K] = matrica krutosti,
- {u} = vektor pomeranja,
- G = kvadratna ili kubna funkcija pomeranja čvorova,
- P(t) = vektor vremenski promenljivog opterećenja.

Mase su koncentrisane u čvornim tačkama, što prouzrokuje ujednačenu matricu masa. Formiranje matrice **K** može se uraditi kao u poglavlju IV-3. Za nelinearan sistem, kakve su kablove konstrukcije, treba očekivati nesimetričnu matricu krutosti, što stvara poteškoće u pribavljanju odgovora konstrukcije. Matrica krutosti može biti sračunata za bilo koje ravnotežno stanje sistema.

Za slučaj da se problem tretira kao linearan, a ako je i prigušenje zanemarljivo, jednačina IV-13 dobija oblik:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = P(t) \quad \text{IV-14}$$

Za problem sa slobodnim vibracijama jednačina IV-14 biće redukovana:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{0\} \quad \text{IV-15}$$

IV-5.3 Osnovne jednačine analize svojstvenih oblika (mode-frequency analysis)

Analiza svojstvenih oblika vibracija (modalna analiza) pomaže nam u određivanju karakteristika vibracija: proračun prirodne (svojstvene) frekvencije i svojstvenih oblika oscilovanja konstrukcije. Takođe, koristi se kao polazna tačka za druge detaljnije dinamičke analize, kao što su: analiza trenutne pobude, tzv. tranzijent analiza, analiza usled harmonične pobude, tzv. harmonik analiza i analiza usled stohastične pobude, tzv. spektralna analiza.

IV-5.3.1 Pojam modalne analize

Modalna analiza se koristi za određivanje prirodne (svojstvene) frekvencije i svojstvenih oblika oscilovanja konstrukcije. Svojstvene frekvencije i oblici (tonove forme) su važni parametri pri projektovanju konstrukcije za uslove dinamičkog opterećenja. Neophodni su ako se traži dalja dinamička analiza konstrukcije, tranzijent, harmonik ili spektralna analiza.

Modalna analiza, u najvećem broju slučajeva, sprovodi se kao linearna analiza. U primenjenoj numeričkoj analizi teorije konstrukcija koriste se četiri metode za određivanje svojstvenih parametara konstrukcije: redukovani (Householderov metod), subspace metod, nesimetrični metod i metod sa prigušenjem. Modalna analiza može se sprovesti i na prednapregnutim konstrukcijama.

IV-5.3.2 Metode za ekstrakciju modalnih parametara

Osnovna jednačina, koju treba rešiti na tipičnom modelu bez prigušenja, je klasičan problem svojstvenih vrednosti:

$$[K] \cdot \{\phi_i\} = \omega_i^2 [M] \cdot \{\phi_i\} \quad \text{IV-16}$$

Gde je:

$[K]$ = matrica krutosti,

$\{\phi_i\}$ = vektor oblika tonove forme,

ω_i = prirodna kružna frekvencija tonove forme (ω_i^2 je svojstvena vrednost),

$[M]$ = matrica masa.

Postoje mnogi numerički metodi za rešenje gornje jednačine, ali se u metodi konačnih elemenata koriste ranije pobrojane metode.

Redukovani metod koristi HBI (Householder-Bisection-Inverse iteration) za sračunavanje svojstvenih vrednosti i svojstvenih vektora. Ovo je relativno brz metod, jer radi sa malim podsistemom stepeni slobode koji se naziva sistem glavnih stepeni slobode. Korišćenjem glavnih stepeni slobode dolazi se do egzaktne matrice $[K]$, ali do uprošćene matrice $[M]$, obično sa gubicima u masi. Zbog toga tačnost rezultata zavisi kako je aproksimovana matrica $[M]$, koja na početku zavisi od broja i lokacije mastera (glavnih tačaka).

Metod inverznih iteracija (subspace method) koristi tehniku iteracija podsistema, tj. za svaki podsistem uopšteni Jakobijev iteracioni algoritam. Metod je vrlo tačan jer koristi pune matrice $[K]$ i $[M]$. Iz istog razloga metod inverznih iteracija je i sporiji od redukovanog metoda. Ovaj metod se uglavnom koristi u slučajevima gde se zahteva visoka tačnost rezultata ili gde izbor glavnih stepeni slobode nije praktičan.

Nesimetričan metod (unsymmetric method) takodje koristi pune matrice $[K]$ i $[M]$ i primenljiv je na probleme gde su matrice krutosti i masa nesimetrične (problemi akustike, tj. fluid-structure problems). Ovaj metod koristi Lančosov algoritam koji sračunava kompleksne svojstvene vrednosti i svojstvene vektore za slučaj nekonzervativnih sistema. Realni deo svojstvenih vrednosti predstavlja prirodne frekvencije, dok je imaginarni deo mera stabilnosti sistema – negativne vrednosti označavaju stabilan sistem, a pozitivne vrednosti znače da sistem nije stabilan.

Metod prigušenja (damped method) primenljiv je na probleme gde prigušenje ne može biti zanemareno. Koristi pune matrice $[K]$ i $[M]$, kao i matricu prigušenja $[C]$. I ovaj metod koristi Lančosov algoritam koji sračunava kompleksne svojstvene

vrednosti i svojstvene vektore. U tom slučaju, imaginarni deo svojstvenih vrednosti predstavlja prirodne frekvencije, a realni deo je mera stabilnosti sistema

IV-5.3.3 *Pretpostavke i ograničenja*

1. Primenljiv za strukturne i fluidne stepene slobode,
2. Struktura ima konstantnu krutost i nepromenljivu masu,
3. Prigušenje ne postoji, osim ako se ne primeni opcija rešavanja svojstvenih vrednosti sa prigušenjem,
4. Na konstrukciju ne deluju parametri promenljivi u vremenu: sile, pomeranja, pritisak ili temperatura.

IV-5.3.4 *Opis analize*

Ovaj tip analize koristi se za određivanje prirodnih frekvencija i tonovih formi. Jednačina kretanja za neprigušen sistem, izražena u matričnom obliku i primenjenim pretpostavkama, je jednačina IV-15.

Treba napomenuti da matrica krutosti **[K]** može uključiti i efekte prednaprezanja. Za linearne sisteme slobodne (prirodne) vibracije biće harmonijske u obliku:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cdot \cos \omega_i t \quad \text{IV-17}$$

Gde je:

$\{\Phi\}$ = svojstveni vektor koji reprezentuje tonovu formu (oblik) i-te prirodne frekvencije,

ω_i = i-ta prirodna kružna frekvencija,

t = vreme.

Prema tome, jednačina IV-15 postaće:

$$(-\omega_i^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\phi\}_i = \{0\} \quad \text{IV-18}$$

Ova jednakost biće zadovoljena ako je jedan od uslova zadovoljen: $\{\phi\}_i = \{0\}$ ili je determinanta matrice $([K] - \omega^2 [M]) = 0$. Prvo rešenje je trivijalno i nije od interesa, dok je drugo:

$$|[K] - \omega^2 \cdot [M]| = 0 \quad \text{IV-19}$$

Ovo je problem svojstvenih vrednosti koji može biti rešen do n -te vrednosti od ω^2 i n svojstvenih vektora $\{\Phi\}_i$ koji zadovoljavaju jednačinu IV-18, gde je n broj stepeni slobode.

Pre nego se dobiju prirodne kružne frekvencije $\{\omega\}$, dobiće se prirodne (svojstvene, ambijent) frekvencije $\{f\}$, gde je:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad \text{IV-20}$$

Gde je:

f_i = i-ta prirodna frekvencija (broj ciklusa u jedinici vremena)

Ako se izvrši normalizacija svakog svojstvenog vektora $\{\Phi\}_i$ u odnosu na matricu masa **[M]**, dobiće se:

$$\{\phi\}_i^T \cdot [M] \cdot \{\phi\} = 1 \quad \text{IV-21}$$

Ako se normalizacija svojstvenog vektora $\{\Phi\}_i$ izvrši u odnosu na 1 (jedinicu), $\{\Phi\}_i$ se normalizuje u odnosu na njegovu najveću komponentu.

Ukoliko se primenjuje redukovani metod ekstrakcije tonovih formi, n svojstvenih vektora može se razviti u potpuni niz modalnih pomeranja konstrukcije za sve stepene slobode.

$$\{\phi_s\}_i = -[K_{ss}]^{-1} \cdot [K_{sm}] \{\hat{\phi}\}_i \quad \text{IV-22}$$

Gde je:

$\{\Phi\}_i$ = vektori pomoćnih stepeni slobode tona i (pomoćni stepeni slobode su oni stepeni slobode koje treba sažeto izraziti)

$[K_{ss}], [K_{sm}]$ = delovi podmatrica

$\{\hat{\phi}\}_i$ = vektori glavnih stepeni slobode tona i

IV-5.4 Dinamička analiza prolaznih vibracija (Transient Dynamic Analysis)

Dinamička analiza prolaznih (trenutnih, privremenih) vibracija, poznata kao “time-history” analiza, predstavlja metod kojim se pribavlja dinamički odgovor konstrukcije usled delovanja, u opštem slučaju, vremenski zavisnih opterećenja. Ovaj tip dinamičke analize može se koristiti da bi se odredile vremenski zavisna: pomeranja, dilatacije i sile u konstrukciji, kao i da li konstrukcija reaguje na neku od kombinacija statičkog, trenutnog ili harmonijskog opterećenja. Promene opterećenja tokom vremena, kao i inercija ili efekti prigušenja, su od bitnog uticaja na rezultate analize. Ako inercija, ili efekti prigušenja nisu od uticaja, statička analiza daje zadovoljavajuće rezultate.

Osnovne jednačine kretanja koje se rešavaju dinamičkom analizom trenutnih vibracija su:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad \text{IV-23}$$

Gde je:

- $[M]$ = matrica masa
- $[C]$ = matrica prigušenja
- $[K]$ = matrica krutosti
- $\{\ddot{u}\}$ = vektor ubrzanja čvorova
- $\{\dot{u}\}$ = vektor brzine čvorova
- $\{u\}$ = vektor pomeranja čvorova
- $\{F(t)\}$ = vektor vremenski zavisnog opterećenja

U bilo kom trenutku vremena, t , ove jednačine mogu biti shvaćene kao sistem jednačina “statičke ravnoteže”, koje uzimaju u obzir inercijalne sile $[M]\{\ddot{u}\}$ i sile prigušenja $[C]\{\dot{u}\}$. Metod **Njumarkove vremenske integracije** je iskorišćen za rešavanje ovih jednačina u definisanim vremenskim “tačkama”. Vremenski priraštaj između dve uzastopne integracije naziva se *integracioni vremenski korak*.

Dinamička analiza trenutnih vibracija je sveobuhvatnija od statičke analize, jer zauzima mnogo više resursa kompjutera, kao i operatera u svom „inženjerskom“ učešću. Neophodni prethodni koraci u sprovođenju *dinamičke tranzijent analize* su statički proračun i modalna analiza.

IV-5.4.1 Metode za analizu prolaznih – tranzijent vibracija

Za rešenje problema prolaznih, privremenih ili trenutnih vibracija na raspolaganju su *potpuni metod, metod superpozicije tonovih oblika i redukovani metod.*

Potpuni metod koristi sistem matrica koji nije redukovan. Ovaj metod je sveobuhvatniji od tri pomenuta metoda, jer omogućava efekte svih tipova nelinearnosti (plastičnost, velike deformacije, veliki naponi...).

Prednosti potpune metode za dinamičku tranzijent analizu su: omogućava sve tipove nelinearnosti, ne moraju se birati glavni stepeni slobode, koristi pune matrice pa se ne moraju uključivati aproksimacije matrica masa, sva pomeranja i sile sračunavaju se u jednom prolazu i svi tipovi opterećenja mogu se primeniti na modelu. Nedostatak ovog metoda je što iziskuje više vremena od druga dva raspoloživa metoda, naročito za velike sisteme.

Metod superpozicije tonovih oblika sumira izvedene tonove forme (svojstvene vektore) iz modalne analize da bi sračunao odgovor konstrukcije. Prednosti ove metode su: brža je od redukovane metode, opterećenja elemenata koja deluju u modalnoj, mogu se primeniti i u tranzijent analizi, a moguće je primeniti i modalno prigušenje. Mane ove metode su što „vremenski korak“ mora biti konstantan. Takodje, ovaj metod linearizuje problem i početna pomeranja moraju biti definisana.

Redukovani metod redukuje veličinu problema koristeći glavne stepene slobode i redukovane matrice. Pribavljanjem pomeranja glavnih stepena slobode, programski se razvijaju i ostala pomeranja. Prednost ove metode je brzo rešenje problema. Nedostaci ove metode su: dobijaju se pomeranja glavnih stepena slobode, kompletna rešenja dobijaju se u „proširenom prolazu“, elementi ne mogu biti opterećeni, sva druga opterećenja zadaje korisnik za definisane glavne stepene slobode, „vremenski korak“ mora biti konstantan kao i to što ovaj metod linearizuje problem.

IV-5.4.2 Opis tranzijent analize

Jednačina dinamičke ravnoteže trenutnih vibracija za linearne strukture data je izrazom IV-23. Rešenje problema dobija se primenom *Njumarkove metode*.

Njumark koristi metod proširenih konačnih razlika u vremenskom intervalu Δt u kojem je pretpostavljeno:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad \text{IV-24}$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \{\ddot{u}_n\} + \alpha \{\ddot{u}_{n+1}\} \right] \Delta t^2 \quad \text{IV-25}$$

Gde je: α, δ = Njumarkovi integracioni parametri
 Δt = $t_{n+1} - t_n$

$$\begin{aligned}
 \{u_n\} &= \text{vektor pomeranja čvora u trenutku vremena } t_n \\
 \{\dot{u}_n\} &= \text{vektor brzine čvora u trenutku vremena } t_n \\
 \{\ddot{u}_n\} &= \text{vektor ubrzanja čvora u trenutku vremena } t_n \\
 \{u_{n+1}\} &= \text{vektor pomeranja čvora u trenutku vremena } t_{n+1} \\
 \{\dot{u}_{n+1}\} &= \text{vektor brzine čvora u trenutku vremena } t_{n+1} \\
 \{\ddot{u}_{n+1}\} &= \text{vektor ubrzanja čvora u trenutku vremena } t_{n+1}
 \end{aligned}$$

Cilj proračuna je pribavljanje pomeranja $\{u_{n+1}\}$ i jednačina IV-23 biće rešena u trenutku vremena t_{n+1} kao:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F^a\} \quad \text{IV-26}$$

Pomeranja u trenutku vremena t_{n+1} pribavljena su preuredjenjem jednačine IV-24 i IV-25, tako da je:

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_n\} - a_3\{\ddot{u}_n\} \quad \text{IV-27}$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + a_6\{\ddot{u}_n\} + a_7\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad \text{IV-28}$$

Gde je:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2} & a_1 &= \frac{\delta}{\alpha \Delta t} & a_2 &= \frac{1}{\alpha \Delta t} & a_3 &= \frac{1}{2\alpha} - 1 \\
 a_4 &= \frac{\delta}{\alpha} - 1 & a_5 &= \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{2} - 2 \right) & a_6 &= \Delta t(1 - \delta) & a_7 &= \delta \Delta t
 \end{aligned}$$

Vektor $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ u jednačini IV-27, može biti zamenjen u jednačini IV-28, pa jednačine za $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ i $\{\dot{u}_{n+1}\}$ mogu biti izražene u funkciji nepoznatih $\{u_{n+1}\}$. Jednačine za $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ i $\{\dot{u}_{n+1}\}$ mogu se sada kombinovati sa IV-26 pa se dobija sledeći oblik jednačine:

$$(a_0[M] + a_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \{F^a\} + [M](a_0\{u_n\} + a_2\{\dot{u}_n\} + a_3\{\ddot{u}_n\}) + [C](a_1\{u_n\} + a_4\{\dot{u}_n\} + a_5\{\ddot{u}_n\}) \quad \text{IV-29}$$

Jedno rešenje je pribavljeno za $\{u_{n+1}\}$, dok se brzina i ubrzanje izvode iz IV-27 i IV-28.

Rešenje jednačine IV-26 korišćenjem Njumarkovih izraza IV-27 i IV-28 je jednoznačno odredjeno za:

$$\alpha \geq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + \delta \right), \quad \delta \geq \frac{1}{2}, \quad \frac{1}{2} + \delta + \alpha > 0 \quad \text{IV-30}$$

Njumarkovi parametri su zavisni od ulaznih:

$$\alpha = \frac{1}{4}(1 + \gamma)^2, \quad \delta = \frac{1}{2} + \gamma \quad \text{IV-31}$$

Gde je γ faktor slabljenja amplitude i ima vrlo malu vrednost (0,005) koja se najčešće koristi.

IV-5.4.2.a Rešenje potpunim metodom

Potpuni metod rešava jednačinu IV-29 direktno, ne uvodeći dodatne pretpostavke. U nelinearnoj analizi koristi se Njutn-Rafsonov metod, zajedno sa Njumarkovim postavkama. Inverzna jednačina IV-29, ili njen nelinearni ekvivalent, koriste isti direktni metod dekompozicije matrica kao kod statičkog rešenja.

Sušтина Njumarkove metode je da početne vrednosti pomeranja, brzine i ubrzanja na startu tranzijent analize moraju biti poznate. *Nenula inicijalne vrednosti* mogu se dobiti analitički (direktno) ili iz statičke analize, tj. neophodno je da se pre tranzijent analize sprovede statička analiza.

Prilog rešenju problema visećih krovnih sistema

V-1 Opšte

Pokrivanje objekata većih raspona moguće je korišćenjem raznovrsnih konstruktivnih sistema, od linijskih, preko površinskih, do visećih i pneumatskih. Korišćenjem visećih sistema postiže se velika ušteda ne samo u materijalu, skelama i eventualnoj oplati, već i u radnom vremenu. Zna se da su ovi sistemi montažni i neosporno je da su zbog toga ekonomičniji od klasičnih.

Sinteza ovog poglavlja nastala je na osnovu literature [4]-[11], [15], [16], [21], [27]-[46], [50], [53], [58], [64]-[66], [71], [85], [86], [93], [98], [99], [102] i [106].

V-2 Problem stabilnosti - aerodinamički fenomen

Same viseće konstrukcije, opterećene sopstvenom težinom, snegom, vetrom, termičkim "udarima" i potresima, bile bi isuviše nestabilne za nesimetrična opterećenja kojima su izložene. Iz tih razloga lančani nosači moraju biti u svakom trenutku napregnuti do te mere da bi se sprečili negativni efekti labilnosti takvih konstrukcija. To je tzv. **aerodinamički fenomen**: ljuljanje krova, pucanje plafona, oštećenja instalacija i posebno ugrožavanje komfora korisnika i posetilaca.

Efikasno obezbedjenje stabilnosti visećih konstrukcija i sprečavanje ljuljanja krova postiže se prednaprežanjem. Prethodno napregnutu konstrukciju karakterišu njeni specifični naponi koji postoje i bez ikakvog spoljašnjeg opterećenja (integralno zategnute konstrukcije).

Prema načinu na koji se obezbedjuje stabilnost krova, viseće krovne sisteme svrstavamo u dve grupe:

- Prethodno napregnute lančaniice u sadejstvu sa elementima velike čvrstoće na pritisak, tzv. **jednostruke lančaniice**;
- Prethodno napregnute lančaniice u sadejstvu sa drugim kablovima, uslovno nazvane **dvostruke lančaniice** (Sl.II-1 i Sl.II-2):
 - * *kablovske rešetke* (Sl.II-1);
 - * *prethodno napregnute mreže* (Sl.II-2).

U ovom poglavlju biće analizirane prethodno napregnute kablovske rešetke, sa ciljem da se:

- **racionalizuje postupak njihovog proračuna,**
- **odredi minimalna sila prednapreznja u odnosu na realna opterećenja.**

Pri tome konstrukcija treba da ispuni uslove stabilnosti koji su razmatrani u *poglavlju III*.

V-3 Metode proračuna

Zbog svoje mnogostruke statičke neodredjenosti, proračuni ovako složenih struktura predstavljaju veoma složene zadatke. Za odredjivanje stanja napona i deformacija karakteristična su dva pristupa.

Prvi se sastoji u tome da se, koristeći uslove ravnoteže i promene dužina lančaniica pri opterećenju, formiraju sistemi nelinearnih diferencijalnih jednačina - **rešenje u "zatvorenom" obliku**. Ovaj način je prilično komplikovan, ako se ne uvedu uprošćenja u postavci problema (npr. kablovska rešetka se posmatra kao neprekidna glatka površ-membrana, opterećenje je vertikalno, ravnomerno raspodeljeno, lančaniica je gipka i plitka, ima oblik parabole, oslonci su nepomerljivi, kablovi su idealno elastični ...). Uprošćenjima se linearizuje sistem diferencijalnih jednačina i svodi na lako rešiv problem.

Drugi pristup novijeg je datuma i uslovljen je upotrebom računara, a sastoji se u tome da se sistem posmatra kao skup konačnih elemenata - štapova koji su medjusobno zglobno vezani. Nepoznate veličine su pomeranja čvorova iz kojih se u daljem postupku pribavljaju sile u štapovima, tzv. **metod konačnih pomeranja (MKP)**. Matematički, problem se formuliše u vidu sistema linearnih algebarskih jednačina, koji se uspešno rešava primenom Njutn-Rafsonove metode - iterativnim postupkom ¹². Postupak rešavanja sistema jednačina ponavlja se sve dok vektor, koji predstavlja deo neuravnoteženog opterećenja u svim čvorovima sistema, ne bude jednak nuli ili se ne svede na približno dovoljno malu vrednost, koja bitno ne utiče na željenu tačnost rezultata. Poseban značaj za formiranje jednačina ima tzv. matrica krutosti, koja sadrži geometrijske i fizičke karakteristike sistema. Ovaj postupak razradio je i pripremio za primenu na računaru prof.dr H.Melman [64]. Postupak je vrlo primenljiv za proračun visećih sistema, pogotovu danas u eri elektronike kada su PC računari sastavni deo svakog projektnog biroa, čime se otvara mogućnost proračuna sistema sa velikim brojem štapova i pod najrazličitijim kombinacijama opterećenja. Osnovni problem kod proračuna ovim postupkom je **kako pretpostaviti ulazne podatke za "početni" tzv. referentni položaj (sile i geometrija)** imajući u vidu da u štapovima konstrukcije deluju sile, iako na nju ne deluje spoljašnje opterećenje ¹³. Za pretpostavljene sile i geometriju, sistem treba da je u ravnoteži.

12 Svaki iterativni postupak podrazumeva aproksimaciju-pretpostavku početnih - ulaznih podataka

13 Prethodno napregnuta struktura

Konačni cilj proračuna, u zatvorenom obliku, ili iterativnim postupkom, je određivanje dužine kablova u nenapregnutom stanju tzv. "šablon sečenja", kako bi konstrukcija mogla biti pripremljena za montažu u radionici.

V-4 Pojam referentnog položaja

Sposobnost projektanta i konstruktora ovakvih struktura je u tome da predvidi sve faze opterećenja kroz koje može da prodje konkretna konstrukcija i izvrši obezbedjenje stabilnosti konstrukcije. Krutost konstrukcije biće obezbedjena ako u lančanicama vladaju naponi centričnog zatezanja u fazi opterećenja krova najvećim gravitacionim opterećenjem, ili ako se ravnotežna konfiguracija spoljašnjih i unutrašnjih sila u ekstremnim slučajevima opterećenja konstituiše i sa tzv. nultim štapovima. Nulti štapovi su oni elementi sistema koji bi došli u stanje pritiska kada bi štapovi bili tako konstruisani da mogu primiti pritisak. Takvi štapovi isključuju se iz statičko-dinamičkog delovanja, tj. tretiraju se kao nenapregnuti.

Moguća su tri karakteristična položaja konstrukcije, od kojih jedan može biti usvojen za referentni:

- I Stanje posle montaže svih kablova pre unošenja sila prednaprezanja.** *Tada na sistem deluju samo sile sopstvene težine kablova nosećih i prethodno napregnutih, a naprezanje se javlja samo u nosećim kablovima.*
- II Stanje delimičnog ili potpunog prethodnog naprezanja.** *Tada na sistem simultano deluju sopstvena težina kablova i sile prethodnog naprezanja. Konstrukcija je neopterećena spoljašnjim opterećenjem. U stabilizujućim kablovima javljaju se maksimalne sile u odnosu na ostale faze opterećenja. Konstruktori najradije polaze od ovog stanja, jer se potpunim prethodnim naprezanjem postiže potrebna krutost konstrukcije, što omogućuje sigurnu i brzu montažu krovnog pokrivača.*
- III Projektovano stanje.** *To je stanje konstrukcije kada je izvršeno potpuno prethodno naprezanje i montiran krovni pokrivač.*

Za izabrano referentno stanje moraju se poznavati **koordinate čvorova, sile u štapovima kao i dužina štapa**. Pobrojane veličine nazivaju se **parametrima referentnog položaja** i o njima će još posebno biti reči kako bi se istakla njihova neophodna važnost.

V-5 Postupci za određivanje parametara u referentnom položaju

Proračun visećih struktura svodi se na primenu kompjuterskog programa po MKP. Pravilna postavka problema ubrzava njegovo rešavanje i redukuje broj iteracija koje su potrebne za postizanje tražene tačnosti. Redosled operacija svodi se na:

- a. Operacije koje slede konačnom proračunu**
 - usvajanje referentnog položaja,

- proračun geometrije i sila u štapovima za referentni položaj po jednoj od metoda,
- kontrola ravnoteže kompjuterskim programom, za sistem u referentnom položaju, kada ne deluje spoljašnje opterećenje,
- korekcija geometrije u referentnom položaju.

b. Konačan proračun po fazama opterećenja po MKP

Postupci za proračun geometrije i sila u štapovima za referentni položaj mogu se svesti na sledeće:

1. Eksperimentalno određivanje na elastičnom modelu u pogodnoj razmeri. Ovo je najpouzdaniji metod. Izradjeni model može se, osim za određivanje sila i koordinata čvorova, iskoristiti i za tačno definisnje opterećenja (sneg, vetar). Nedostatak ove metode je visok materijalni trošak izrade modela i njegovo ispitivanje.

2. Iskustveno određivanje sila s obzirom na usvojene kablove. Nedostatak ove metode je u manuelnom unošenju velikog broja podataka, što uvećava mogućnost greške koja može izazvati divergenciju iterativnog postupka.

3. Uvodjenje fiktivne negativne temperature u stabilizujuće (prednaprežuce) kablove. Ovaj i prethodni postupak ne daju odgovor o veličini *sile dodira*, tj. sile u štapovima ispune (dijagonale ili vertikale) između nosećih i stabilizujućih kablova u fazi najvećeg gravitacionog opterećenja, pa samim tim postoji mogućnost da u ovoj fazi opterećenja sistem nije stabilan (moguće je da dodje do ljuljanja krova).

4. Proračun sila i geometrije u zatvorenom obliku. Neki od ovih postupaka polaze od definisanja *sile dodira u "kontaktu" nosećih i stabilizujućih kablova* u fazi najvećeg gravitacionog opterećenja, kao osnovnog preduslova da se sistem prethodnim naprezanjem dovede u stabilno stanje. Nedostatak ovih metoda je linearizacija jednačina, kao i uniformno vertikalno opterećenje u svim fazama rada konstrukcije, što u stvarnosti nije tako.

V-6 Odredjivanje parametara u referentnom položaju u zatvorenom obliku

Jedan od postupaka za određivanje koordinata čvorova i sila u štapovima razvio je svojevremeno prof. Edmund Balgač, za proračun prethodno napregnutih mreža. Ovaj postupak primenjen je pri projektovanju "Velike izložbene hale sajma tekstila u Leskovcu" i "Sajamsko sportske dvorane u Subotici". Postupak je dopunio, prilagodio i izradio kompjuterski program za sračunavanje geometrije i sila u štapovima za prethodno napregnute viseće konstrukcije, tipa kablovske rešetke, autor ove disertacije mr Dragan Kostić. Blok šema algoritma data je na *Sl.V-8*. Dobijene vrednosti za referentni položaj formiraju ulaznu datoteku za proračun po MKP.

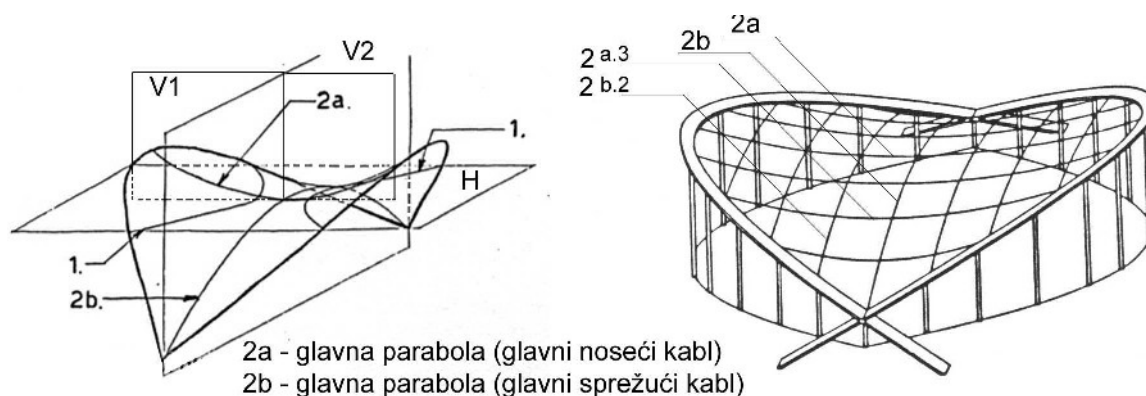
Analogija između površi hiperboličkog paraboloida, koja je geometrijska osnova za prethodno napregnute mreže, i cilindričnog paraboloida, koji predstavlja krovnu površ formiranu na nosećem kablju kablovske rešetke, postoji. Konstrukcije sličnosti i razlike između prostorne strukture - prethodno napregnute mreže, i ravanske - kablovske rešetke, date su u Tabeli V-1.

TABELA V-1

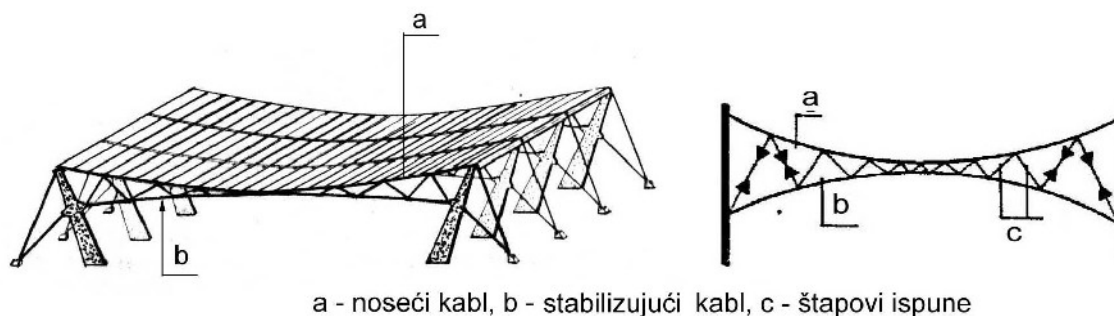
Konstruktione sličnosti i razlike između prethodno napregnutih mreža

i kablovskih rešetki

Kablovska konstrukcija	Oblik površi	Konstrukcija	Sličnost	Razlika
Prethodno napregnute mreže	Hi-par	Noseći kablovi su na presečnim krivama (parabole II stepena) između hi-par i vertikalne ravni V1. Stabilizujući kablovi su na presečnim krivama (parabole II stepena) između hi-par i vertikalne ravni V2 (centar krivine ispod površi).	Glavni noseći kabl mreže i noseći kabl kablovske rešetke imaju isti oblik i položaj. Glavni stabilizujući kabl je identičnog oblika kao kod kablovske rešetke. Direktnim kontaktom stabilizujući kabl pritiska glavni noseći kabl mreže.	Glavni stabilizujući kabl mreže je ortogonalan u odnosu na glavni noseći kabl (gledano u osnovi), dok je kod kablovske rešetke stabilizujući kabl suprotne zakrivljenosti u vertikalnoj ravni ispod nosećeg kabla. Na taj način se kod mreža zategnutost konstrukcije postiže direktnim kontaktom prednapregnutih stabilizujućih kablova i nosećih kablova, dok se kod kablovskih rešetki preko štapova ispune, sile prednaprezanja unete u stabilizujući kabl prenose na noseći i cela konstrukcija stabilizuje za projektovana opterećenja.
Kablovske rešetke	Cilindrični paraboloid	Noseći kabl je paraboličnog oblika kao i stabilizujući kabl ali su suprotne zakrivljenosti i međusobno su povezani štapovima ispune. Celokupna konstrukcija kablovskih rešetki je u vertikalnoj ravni	Glavni noseći kabl mreže i noseći kabl kablovske rešetke imaju isti oblik i položaj. Stabilizujući kabl je identičnog oblika kao glavni stabilizujući kabl kod mreže.	



SLIKA V-1 *Prethodno napregnuta mreža: geometrijska osnova i konstrukcijske karakteristike*



SLIKA V-2

Kablovska rešetka: geometrijska osnova i konstrukcijske karakteristike konkavne- udubljene forme

Koncepcija konstrukcije kablovskih rešetki zasniva se na krovnoj površi oblika cilindričnog paraboloida. Pretpostavke pod kojima se izvode jednačine za proračun kablovskih rešetki ovoga oblika su:

- površ mora biti plitka ($f/l \leq 1/6$),
- projekcije kablova u osnovi moraju biti paralelne X-osi, a noseći i stabilizujući kabl su povezani u sredini raspona,
- kablovi ispune posmatraju se kao membrana sa diferencijalno malim rastojanjem kablova,
- opterećenje je samo vertikalno,
- postoje samo vertikalna pomeranja usled opterećenja,
- materijal je homogen i elastičan,
- ivični nosači su kruti (oslonci nepomerljivi),
- kablovi (noseći i stabilizujući) i pre i posle deformacije imaju oblik parabole (menja se samo njihova strela).

V-6.1 Geometrijske odlike kablovske rešetke

Analitičke jednačine nosećeg i stabilizujućeg kabla kablovske rešetke izvlačimo iz opšteg oblika jednačina hiperboličkog paraboloida:

$$Z = \left(\frac{x}{n} \right)^2 - \left(\frac{y}{n} \right)^2 + h_0$$

V-6.1.a Jednačina oblika nosećih kablova

Jednačina parabole po osi simetrije -glavna parabola, kada je $y = 0$, glasi:

$$z = \left(\frac{x}{n} \right)^2 + h_0$$

Za konturne uslove, date na Sl.V-3, posle primene odredjenih transformacija, jednačina parabole sa koordinatnim početkom u polovini njenog raspona glasi:

$$z = 4 f_0 \frac{x}{l_0} \left(\frac{x}{l_0} + \frac{h}{4 f_0} \right) \quad \text{V-1}$$

Koordinatni početak je translatorno pomeren u odnosu na prvobitni za x_0 i z_0 , gde je:

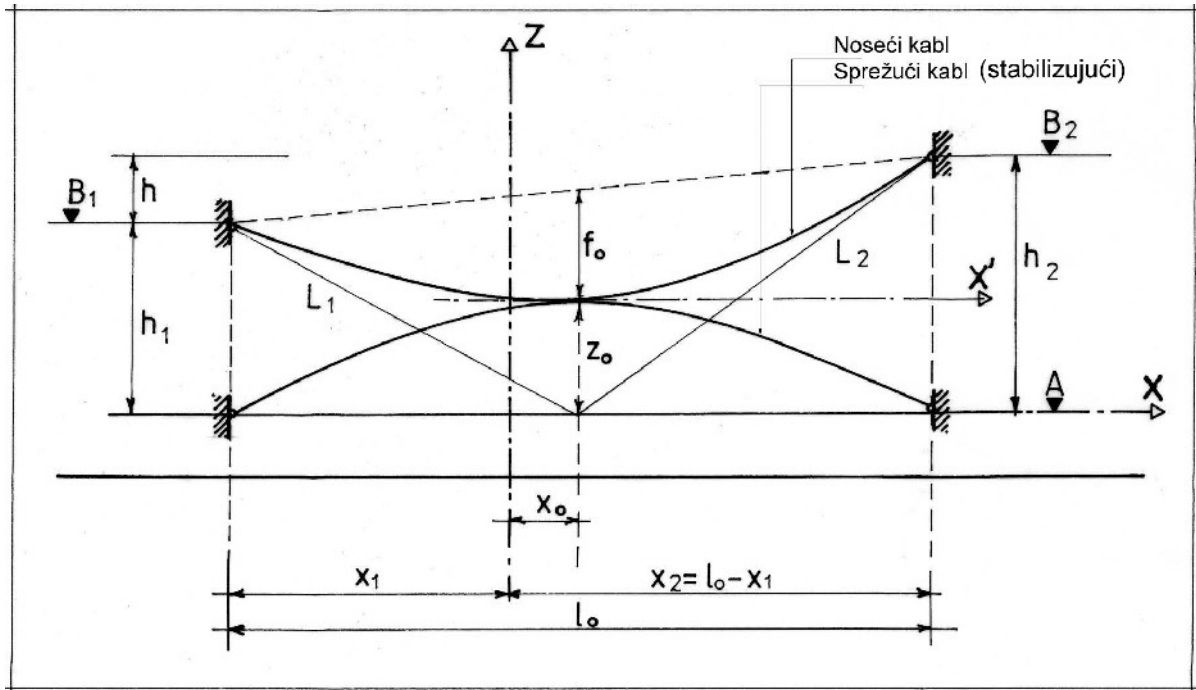
$$x_0 = \frac{x_2 - x_1}{2} \quad z_0 = \frac{h_1 + h_2}{4} = f_0 \quad \text{V-2}$$

V-6.1.b Jednačina oblika stabilizujućih kablova

Analogno jednačini nosećih kablova, jednačina stabilizujućih kablova, imajući u vidu da je $h = 0$, ima oblik:

$$z = - 4 f_0 \frac{x^2}{l_0^2} \quad \text{V-3}$$

Koordinatni početak ove parabole je u njenom temenu, tj. na polovini njenog raspona.



SLIKA V-3 Geometrijske odlike kablovske rešetke

V-6.2 Sila u kablju raspona l_0

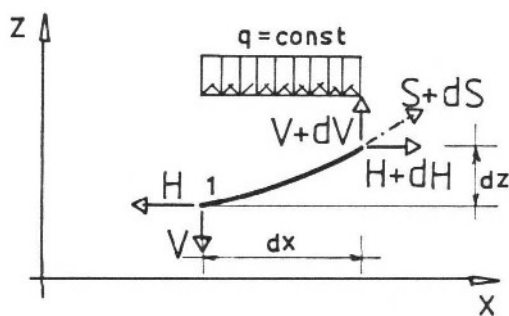
Savitljiv kabl - lančanica, raspona l_0 , strele f_0 i visinske razlike h , pod jednako podeljenim teretom duž projekcije kabla q , posmatra se tako da sila S u njemu obezbedi ravnotežni položaj (Sl.V-4).

Diferencijalna jednačina ravnoteže glasi:

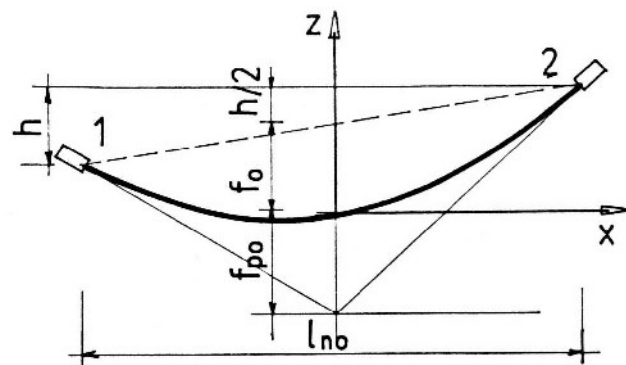
$$H + dH - H = 0 \Rightarrow dH = 0, \text{ tj. } H = H_0 = \text{const}$$

odnosno,

$$V + dV - V - q \cdot dx = 0 \Rightarrow dV - q \cdot dx = 0$$



SLIKA V-4 Diferencijalno mali deo lančanice u ravnoteži



SLIKA V-5 Noseći kabl

Uslov da sila S ima pravac tangente na krivinu kabla glasi: $\frac{dz}{dx} = \frac{V}{H}$,

tj. diferenciranjem se dobija:

$$\frac{dV}{dx} \cdot \frac{l}{H_0} = \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{q}{H_0} \quad \text{V-4}$$

Integracijom izraza V-4, dobija se:

$$z = \frac{q}{2} \frac{x^2}{H_0} + C_1 x + C_2 \quad \text{V-5}$$

Za koordinatni sistem, sa početkom na kabl u polovini njegovog raspona l_0 , je:

- (a) za $x = 0, z = 0 \Rightarrow C_2 = 0$
 (b) z_1 za $x = l_0/2$ i z_2 za $x = -l_0/2 \Rightarrow C_1 = h/l_0$.

pa jednačina ravnoteže glasi:

V-6

Upoređenjem jednačine V-6 sa V-1 vidi se da su slične, pa se njihovim izjednačavanjem dobija:

$$H_0 = \frac{q l_0^2}{8 f_0} \quad \text{V-7}$$

Sila u kabl u mestu x_a od koordinatnog početka je:

$$S_a = \frac{H_0}{\cos \alpha_a} \quad \text{V-8}$$

Gde je α_a - ugao nagiba tangente na kabl u preseku sa apscisom x_a .

Pri tome je $\text{tg } \alpha_a$:

$$\text{tg } \alpha_a = z'_{(a)} = 8 f_0 \frac{x_a}{l_0^2} + \frac{h}{l_0} \quad \text{V-9}$$

Na krajevima kabla, za $x_2 = l_0/2$ i $x_1 = -l_0/2$ nagibi tangenti su:

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{h + 4 f_0}{l_0} \quad \text{tg } \alpha_1 = \frac{h - 4 f_0}{l_0}$$

Izrazi za sile u kabl mogu se napisati u obliku:

$$V_2 = H_0 \text{tg } \alpha_2 = \frac{q l_0}{2} \left(1 + \frac{h}{4 f_0} \right) \quad V_1 = -H_2 \text{tg } \alpha_1 = \frac{q l_0}{2} \left(1 - \frac{h}{4 f_0} \right) \quad \text{V-10}$$

$$S_2 = \sqrt{H_0^2 + V_2^2} = \frac{q l_0^2}{8 f_0} \sqrt{1 + \left(\frac{4 f_0 + h}{l_0} \right)^2} \quad S_1 = \frac{q l_0^2}{8 f_0} \sqrt{1 + \left(\frac{4 f_0 - h}{l_0} \right)^2} \quad \text{V-11}$$

V-6.3 Dužina luka kabla

Jednačina parabole V-1, kabla raspona l_0 , visinske razlike h i strele f_0 sa koordinatnim početkom na paraboli u polovini njenog raspona, uvodjenjem smene, glasi:

$$\frac{4f_0}{l_0} = k \Rightarrow z = \frac{k}{l_0}x^2 + \frac{h}{l_0}x \Rightarrow \frac{dz}{dx} = 2\frac{k}{l_0}x + \frac{h}{l_0} \Rightarrow dz = \left[2\frac{k}{l_0}x + \frac{h}{l_0} \right] dx$$

Dužina luka ds iznosi:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2} = dx \sqrt{1 + \left(2\frac{k}{l_0}x + \frac{h}{l_0} \right)^2}$$

Uvede se oznake:

$$m = \frac{2k}{l_0} \quad n = \frac{h}{l_0} \Rightarrow ds = dx \sqrt{1 + (mx + n)^2}$$

Izvrše se smene:

$$mx + n = \xi \quad x = \frac{\xi}{m} - \frac{n}{m} \quad dx = \frac{1}{m} d\xi \Rightarrow ds = \frac{1}{m} d\xi \sqrt{1 + \xi^2}$$

Dužina luka s , dobija se integraljenjem za granice:

$$x = -\frac{l_0}{2} \Rightarrow \xi = -m\frac{l_0}{2} + n, \quad x = +\frac{l_0}{2} \Rightarrow \xi = +m\frac{l_0}{2} + n$$

$$s = \frac{1}{m} \int_{-m\frac{l_0}{2} + n}^{m\frac{l_0}{2} + n} \sqrt{1 + \xi^2} d\xi$$

Rešenje integrala dobija se u obliku:

$$s = \frac{l_0^2}{16 f_0} \left[a \sqrt{1+a^2} - b \sqrt{1+b^2} + \ln \frac{a + \sqrt{1+a^2}}{b + \sqrt{1+b^2}} \right] \quad \text{V-12}$$

gde je: $a = (h + 4f_0)/l_0$, $b = (h - 4f_0)/l_0$.

Jednačina V-12 služi za određivanje dužina kablova prilikom njihovog krojenja. Za kasnija izvodjenja potreban je izraz za dužinu luka s , dobijen razvijanjem osnovnog obrasca V-12 u Tejlorov red:

$$f(\xi) = \frac{1}{2} \xi \sqrt{1+\xi^2} + \frac{1}{2} \ln \left[\xi + \sqrt{1+\xi^2} \right] \quad \text{V-13}$$

Iz V-13 dobija se:

$$f(0) = 0$$

$$f'(\xi) = f'(0) \sqrt{1+\xi^2} + \frac{f''(0)}{2!} \xi^2 + \frac{f'''(0)}{3!} \xi^3 + \dots = \xi + \frac{\xi^3}{6} - \frac{\xi^5}{40} + \frac{\xi^7}{112} - \frac{5\xi^9}{1152} + \dots$$

$$\frac{f''(\xi)}{f''(0)} = \left[\frac{\xi}{\xi} + \frac{1 \cdot 3 \xi^2}{2 \cdot 2} + \frac{\xi^7}{112} - \frac{5 \xi^9}{1152} \right] \frac{1}{f''(0)} \quad \text{V-14}$$

$$f'''(\xi) = -3\xi (1+\xi^2)^{-\frac{5}{2}} \quad f'''(0) = 0$$

$$f^{IV}(\xi) = (-3 + 12\xi^2) (1+\xi^2)^{-\frac{7}{2}} \quad f^{IV}(0) = -3$$

itd.

Koristeći samo prva dva člana reda izraz za dužinu s glasi:

$$s = l_0 + \frac{8}{3} \frac{f_0^2}{l_0} + \frac{h^2}{2l_0} \quad \text{V-15}$$

V-6.4 *Uticaaj jednako raspodeljenog opterećenja na promenu strele kabla*

Dužina kabla s , raspona l , strele f i visinske razlike h dobija se primenom izraza V-15. Ako kabl promeni svoju dužinu za Δs , povećaće svoju strelu za Δf :

$$s + \Delta s = l + \frac{8}{3l} (f + \Delta f)^2 + \frac{h^2}{2l} \Rightarrow \Delta s = \frac{8}{3l} \Delta f (2f + \Delta f) \quad \text{V-16}$$

Pod uticajem opterećenja q u preseku x , javlja se u kabl u sila S_x . Ako je aksijalna krutost kabla EF , onda je ukupno izduženje kabla:

$$\Delta s = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{S_x ds}{EF} \quad \text{V-17}$$

Pri tome su:

$$S_x = H \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_x} \quad ds = dx \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_x} \quad S_x ds = H (1 + \text{tg}^2 \alpha_x) \quad \text{V-18}$$

Vrednosti za H i α_x dobijaju se iz jednačina V-7 i V-9 u kojima, za strelu f_0 treba staviti $f + \Delta f$ (f je strela pre opterećenja kabla, Δf je povećanje strele pod uticajem izduženja Δs od opterećenja q), tj.,

$$H = \frac{q l^2}{8 (f + \Delta f)} \quad \text{tg } \alpha_x = 8 (f + \Delta f) \frac{x}{l^2} + \frac{h}{l} \quad \text{V-19}$$

Iz izraza V-17, V-18 i V-19 dobija se:

$$\Delta s = \frac{q l}{8 E F} \left[\frac{h^2 + l^2}{f + \Delta f} + \frac{16}{3} (f + \Delta f) \right] \quad \text{V-20}$$

Jednačine V-16 i V-20 daju obrazac za određivanje promene Δf strele f kabla pod uticajem jednako raspodeljenog opterećenja q duž horizontalne projekcije kabla:

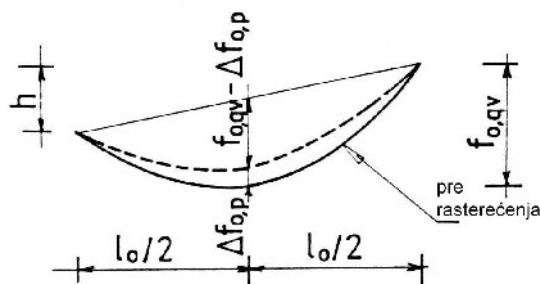
$$\Delta f^3 + \Delta f^2 (3f - A) + \Delta f (2f^2 - 2Af) - A(B + f^2) = 0 \quad \text{V-21}$$

$$A = \frac{q l^2}{4 E F} \quad B = \frac{3}{16} (l^2 + h^2)$$

V-6.5 *Uticaaj rasterećenja konstrukcije visećeg krova*

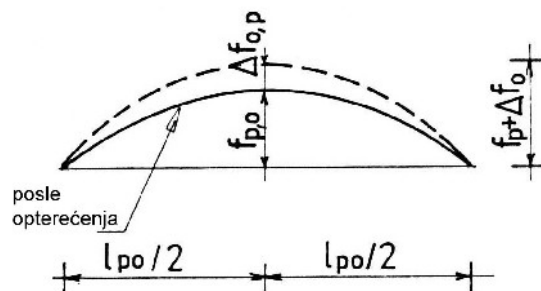
Kada je krovna površ izložena stalnim i povremenim opterećenjem ($g_p + p_p$) u $[kN/m^2]$, tada stabilizujući kabl pritisk noseći. Ako je ova sila pritiska ekvivalentna jednako podeljenom opterećenju v_p u $[kN/m^2]$, onda je to tzv. **sila dodira**. Ako je međusobni razmak kablovskih rešetki označen sa a u $[m]$, onda je noseći kabl izložen opterećenju $(g+p) = a(g_p + p_p)$ u $[kN/m]$ od stalnog i povremenog tereta, a $v = a(v_p)$ u $[kN/m]$ od sile unete određenim prethodnim naprežanjem u stabilizujući kabl. Prema tome, noseći

kabl opterećen je jednako podjeljenim teretom ($g+p+v$), a stabilizujući samo opterećenjem v .



SLIKA V-6

Deformacija nosećeg kabla usled rasterećenja



SLIKA V-7

Deformacija stabilizujućeg kabla usled opterećenja

Rasterećenje krova za p_p dovodi do smanjenj ugiba, odizanje krovne površi i povećanje strele stabilizujućeg kabla, tj. javlja se njegovo izduženje. Isti efekat na stabilizujući kabl izazvalo bi povećanje opterećenja sa v na $v+k$. Noseći kabl opterećen teretom sa krova ($q=g+p$) i pritiskom od stabilizujućih kablova v ima strelu $f_{0,qv}$ (Sl.V-6). Kada se opterećenje sa krova smanji za p , stabilizujući kablovi povećavaju svoj pritisak na noseće, tako da će ukupno opterećenje za njih biti $v+k$. Nova strela nosećeg kabla iznosi tada $f_{0,qv}-\Delta f_{0,p}$. To se može formulisati i ovako: kabl strele $f_{0,qv}-\Delta f_{0,p}$, opterećen teretom $(p-k)$ ima strelu $f_{0,qv}$. Izduženje $\Delta s_{0,p}$ dobija se iz izraza V-20

$$\Delta s_{0,p} = \frac{l_0}{8EF} \left[\frac{h^2 + l^2}{f_{0,qv}} + \frac{16}{3} f_{0,qv} \right] (p - k) \quad \text{V-22}$$

Medjutim, s druge strane iz V-15 sledi:

$$l_0 + \frac{8}{3} \frac{(f_{0,qv} - \Delta f_{0,p})^2}{l_0} + \frac{h^2}{2l_0} + \Delta s_{0,p} = l_0 + \frac{8}{3} \frac{f_{0,qv}^2}{l_0} + \frac{h^2}{2l_0} \Rightarrow \quad \text{V-23}$$

$$\Rightarrow \Delta s_{0,p} = \frac{8}{3} \Delta f_{0,qv} (2f_{0,qv} - \Delta f_{0,p})$$

Izjednačavanjem V-22 i V-23 dobija se:

$$k = p - \frac{2f_{0,qv}^2 \Delta f_{0,p} - f_{0,qv} \Delta f_{0,p}^2}{m_G} \quad \text{V-24}$$

$$m_G = m + m_I + m_{II} \quad m = 3 \frac{l_0^4}{64EF} \quad m_I = \frac{f_{0,qv}^2 l_0^2}{4EF} \quad m_{II} = \frac{3 l_0^2 h^2}{64EF}$$

Osim toga, promena strele nosećeg kabla za $\Delta f_{0,p}$ izaziva izduženje stabilizujućeg kabla, koji noseći kabl dodiruje u polovini njegovog raspona. Ovo izduženje stabilizujućeg kabla nalazi se lako iz izraza V-15, gde je za $h = 0$:

$$\Delta s_{p,0} = l_{p0} + \frac{8}{3} \frac{(f_{p0} + \Delta f_{0,p})^2}{l_{p0}} - \left[l_{p0} + \frac{8}{3} \frac{f_{p0}^2}{l_{p0}} \right] = \frac{8}{3l_{p0}} (2 f_{p0} \Delta f_{0,p} + \Delta f_{0,p}^2) \quad \text{V-25}$$

Do ovog izduženja došlo je usled promene opterećenja pomoćnog kabla za iznos k . Izduženje se dobija iz V-22, stavljajući za $h = 0$, i opterećenje k :

$$\Delta s_{p0} = \frac{l_{p0}}{8 E F_p} \left[\frac{l_{p0}^2}{f_{p0} + \Delta f_{0,p}} + \frac{16}{3} (f_{p0} + \Delta f_{0,p}) \right] k \quad \text{V-26}$$

Izjednačavanjem izraza V-25 i V-26, zanemarujući $\Delta f_{0,p}^3$, dobija se:

$$k = \frac{2 f_{p0}^2 \Delta f_{0,p} + 3 f_{p0} \Delta f_{0,p}^2}{m_p} \quad \text{V-27}$$

$$m_p = m_p + m_{p1} \quad m_p = \frac{3 l_{p0}^4}{64 E F_p} \quad m_{p1} = \frac{l_{p0}^2 f_{p0}^2}{4 E F_p}$$

Izjednačavanjem desnih strana jednačina V-24 i V-27 dobija se izraz za određivanje veličine **smanjenja strele $\Delta f_{0,p}$** nosećeg kabla, koje je jednako **povećanju strele** stabilizujućeg kabla usled rasterećenja za p :

$$\Delta f_{0,p}^2 \left(\frac{f_{0,qv}}{m_G} - \frac{3 f_{p0}}{m_p} \right) - \Delta f_{0,p} \left(\frac{2 f_{0,qv}^2}{m_G} + \frac{2 f_{p0}^2}{m_p} \right) + p = 0 \quad \text{V-28}$$

Za m_G i m_p videti jednačine V-24 i V-27; a $f_{0,qv}$ i f_{p0} su strele osnovnih kablova, nosećeg i pomoćnog, pre rasterećenja, tj. pod opterećenjem.

V-6.6 Smanjenje reaktivnog opterećenja prethodno zategnutog stabilizujućeg kabla pod uticajem opterećenja krova

Ovo predstavlja obrnuti problem u odnosu na odeljak V-6.4 i traži se odgovor za koju vrednost se smanjuje pritisak, kojim se noseći kabl opire prethodno zategnutom stabilizujućem kabl, kada se krov, tj. noseći kabl opteretiti? Javlja se, na primer, pri prelazu iz faze prednaprezanja, kada je noseći kabl opterećen jedino teretom izazvanim prethodnim zatezanjem stabilizujućeg kabla, u fazu opterećenja sopstvenom težinom (g).

Ako u neopterećenom krovu noseći i stabilizujući kabl, imaju strele f_0 i f_{p0} , a posle opterećenja sa p strele $f_0 + \Delta f_0$ i $f_{p0} - \Delta f_{p0}$, onda iznos k_1 za koji će ravnomerno podeljeni pritisak nosećeg kabla na stabilizujući opasti, nalazimo kada u jednačinama V-24 i V-27, $f_{0,qv}$ zamenimo sa $f_0 + \Delta f_0$, a f_{p0} sa $f_{p0} - \Delta f_{p0}$, pri čemu se zanemaruju vrednosti Δf_0^3 :

$$k_l = p - \frac{f_0}{m_G} \Delta f_0 (2f_0 + 3\Delta f_0) \quad \text{tj.} \quad k_l = \frac{f_{p0} \Delta f_0}{m_P} (2f_{p0} - \Delta f_0) \quad \text{V-29}$$

Izjednačavanjem desnih strana izraza dobija se ugib nosećeg kabla, usled opterećenja p :

$$\Delta f_0^2 \left[\frac{3f_0}{m_G} - \frac{f_{p0}}{m_P} \right] + \Delta f_0 \left[\frac{2f_0^2}{m_G} + \frac{2f_{p0}^2}{m_P} \right] - p = 0 \quad \text{V-30}$$

U ovoj jednačini su f_0 i f_{p0} strele osnovnih kablova pre dejstva opterećenja p , a veličine m_G i m_P nalaze se iz izraza V-24 i V-27, gde su l_0 i l_{p0} rasponi osnovnih kablova, a F i F_p površine njihovih preseka.

V-6.7 Odredjivanje sila u kablovima

Polazeći od pretpostavke da su kablovi opterećeni jednako podeljenim vertikalnim teretom, karakteristične faze kroz koje će krov proći u toku montaže i eksploatacije definišu se kao:

- (0) Neopterećen;
- (1) Prednapregnut;
- (2) Prednapregnut i opterećen sopstvenom težinom;
- (3) Prednapregnut, opterećen sopstvenom težinom, snegom i pritiskom ili sisanjem vetra.

Postupak proračuna mogao bi da se podeli na dve etape:

I Prethodni proračun oblika nosećeg i stabilizujućeg kabla za pomenute faze opterećenja

Ovaj postupak obuhvata odredjivanje promene strela glavnih kablova usled opterećenja ili rasterećenja konstrukcije, korišćenjem izraza V-21, V-28 i V-30. Usvaja se da se strele f_0 i f_{p0} javljaju u fazi (2), u tzv. **projektovanom stanju**. Usled potpunog rasterećenja, faza (0), doći će do promene strela osnovnih kablova za Δf_0 čija se vrednost dobija izrazom V-28.

Struktura opterećenja u fazi (2) je:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_{\text{nos.}} + \mathbf{g}_{\text{pom.}}$$

gde je:

$$\mathbf{g}_{\text{nos.}} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}_p + \mathbf{k}_{\text{ver.}} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{g}_p - \mathbf{k}_{1,\text{ver.}}; \quad \mathbf{g}_{\text{pom.}} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}_p + \mathbf{k}_{\text{ver.}} - \mathbf{k}_{1,\text{ver.}}$$

Verovatni uvećani pritisak, kojim pomoćni kabl pritiska noseći, usled rasterećenja krova $\mathbf{k}_{\text{ver.}} \approx \mathbf{g}_p \cdot \mathbf{a}$, odnosno, **verovatni pad pritiska** nosećeg kabla na stabilizujući usled opterećenja krova $\mathbf{k}_{1,\text{ver.}} \approx \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{a}$ ¹⁴, mora se pretpostaviti dovoljno tačno kako prethodni proračun ne bi morao da se ponavlja. Usled opterećenja punim teretom, neopterećeni krov prelazi u fazu najvećeg gravitacionog

opterećenja (faza (3)), a promena strele izračunava se izrazom V-21. Sukcesivnim rasterećenjem krova za iznos opterećenja vetra i snega, odnosno sopstvene težine, krov prelazi u fazu opterećenja (2), odnosno (1), a promena strele sračunava se izrazom V-30. Dobijene strele osnovnih kablova po fazama opterećenja unose se u izraze V-24, V-27 i V-29, iz kojih slede očekivane vrednosti za k i k_1 . Ako je $k_{ver.} \neq k$ i $k_{1,ver.} \neq k_1$, prethodni proračun mora se ponoviti sa korigovanim vrednostima $k_{ver.}$ i $k_{1,ver.}$.

II Proračun geometrije i sila u kablovima

Korišćenjem jednačine V-1 i jednačina V-7, V-10 i V-11 dobija se geometrija kablovske rešetke, odnosno sile u kablovima nosača.

Jasno je da će se u nosećem kablju najveće sile javiti u fazi najvećeg gravitacionog opterećenja, a najmanje u fazi prednapreznja, dok će se u stabilizujućem kablju najveće sile javiti u fazi prednapreznja, a najmanje u fazi punog opterećenja.

Stabilizujući kablovi, i pod najvećim gravitacionim opterećenjem, moraju zadržati u sebi silu zatezanja koja će svojom vertikalnom komponentom pritiskati noseće kablove izvesnim opterećenjem v . Intenzitet ovog opterećenja biće predmet analize koja će biti prikazana u poglavljima VI i VII.

Profesor Balgač u svojoj metodi preporučuje da se usvaji "sila kontakta" $v=0,15 - 0,20 \text{ kN/m}^2$, što garantuje stabilnost krova od prethodno napregnute mreže, tj. sile zatezanja u svim štapovima sistema. To predstavlja kvalitet ove metode proračuna i pored uprošćenja koja su uvedena u proračun.

V-7 Odredjivanje sila u štapovima

Odredjivanje sila u štapovima sistema i pomeranja usled realnog opterećenja, koje je uglavnom nesimetrično, svodi se na upotrebu **metode konačnih pomeranja (MKP)**. MKP predstavlja iterativni proces, koji kroz nekoliko ciklusa, za pretpostavljenu geometriju i sile u štapovima, uravnotežuje unutrašnje sile sa zadatim spoljašnjim opterećenjem. Pri tome je neophodno dovoljno tačno pretpostaviti početne parametre kako bi proces mogao da konvergira rešenju. Metoda izložena u odeljku V-6 treba da pribavi početne parametre za MKP u referentnom položaju konstrukcije.

Proces izračunavanja sila u štapovima i pomeranja čvorova sistema odvija se prema algoritmu prikazanom na *Sl. V-8*.

Sledeći šemu algoritma uočava se da je proces proračuna podeljen u tri etape koje su nazvane "**CABL-T**" (**Cable Truss**- kablovska rešetka), "**CABL-TP**" (**Cable Truss Preprocessor**- predprocesor za kablovsku rešetku) i "**CABL-N**" (**Cable Net**- kablovska mreža i kablovska rešetka).

V-7.1 Programski blok "CABL-T"

"**CABL-T**" je program u FORTRAN-u 77 i obuhvata grupu blokova koji predstavljaju metodu proračuna prikazanu u odeljku V-6. Redosled proračuna dosledno je poštovan, s tim što su pojedini ograničavajući elementi zamenjeni opštim elementima, koji **omogućavaju primenu proračuna na širi krug problema.**

Poboljšanja metode u odnosu na onu koju je razvio prof. Edmund Balgač sastoje se u sledećem:

(1) **Izbor geometrijskih karakteristika površi krova** koji obuhvata izbor raspona po glavnim lančanicama i veličina strela, tj. stinjenost površi.

Prof. E. Balgač ograničio se na osno simetrične plitke površi ($l_0 = l_{p0}$) čije su strele glavnih kablova (nosećeg i stabilizujućeg) jednake ($f_0 = f_{p0}$).

"**CABL-T**" daje mogućnost izbora različitih raspona po glavnim lančanicama ($l_0 \neq l_{p0}$) u granicama "zlatnog preseka" ($l_0 = 0,75$ do $1,25 \cdot l_{p0}$ ili obrnuto). U tom slučaju izrazi za konfiguraciju sistema koje je izveo prof. Balgač ne važe u opštem slučaju, pa je primenjen Lagranžov interpolacioni polinom kroz tri tačke, koji daje funkciju drugog stepena. Interpolacione tačke su krajnje tačke kabla na osloncima i u temenu parabole.

Takodje, "**CABL-T**" daje mogućnost izbora stinjenosti površine u granicama "zlatnog preseka" ($f_0 = 0,75$ do $1,25 \cdot f_{p0}$ ili obrnuto).

(2) **Analiza "kontaktnog" opterećenja** sprovedena je sa velikom preciznošću u nalaženju pritiska kojim pomoćni kablovi pritiskaju noseće usled rasterećenja krova $k_{ver.} = k$ odnosno, pad pritiska nosećih kablova na stabilizujuće usled opterećenja krova $k_{1,ver.} = k_1$. Apsolutna greška, pri kojoj se zaustavlja traženje verovatnih vrednosti, je $1 \cdot 10^{-3}$.

V-7.2 Programski blok "CABL-TP"

"CABL-T" proračunava koordinate karakterističnih tačaka sistema i sila u štapovima za usvojena opterećenja. Izdvajanjem geometrijskih i fizičkih parametara za **referentni položaj konstrukcije** (faza potpunog prethodnog naprezanja) i aktiviranjem modula "CABL-TP" pribavljaju se parametri referentnog položaja kablovske rešetke i formira izlazna, formatirana datoteka (TP-OUT.dat), koja istovremeno predstavlja ulaznu datotetku za MKP i programski modul "CABL-N" (INPUT.dat).

Podaci koji se na ovaj način dobiju za prethodno zategnute kablovske rešetke predstavljaju ulazne parametre za MKP (Sl.V-9) i dovoljno su "tačni", tj. odgovaraju ravnotežnom stanju, dovode do brže konvergencije rešenja i ubrzanja iterativnog postupka ("**CABL-N**" za tako dobijene podatke uspostavi matematičku ravnotežu sistema kroz 2 -3 iteracije).

Predprocesorski moduli "CABL-T" (sastoji se iz dve programske celine: "BALGAČ-1" i "BALGAČ-2") i "CABL-TP" su samostalno autorsko delo mr Dragana Kostića, dok je "CABL-N" preuzet iz monografije *Cable suspended roofs* [53] i prilagodjen PC računarima.

V-7.3 Programski blok "CABL-N"

“**CABL-N**” je program u FORTRAN-u 77 i obuhvata grupu blokova koji predstavljaju metodu proračuna prikazanu u poglavlju IV, prema algoritmu koji je dat na *Slici V-10*.

MKP je realizovan kroz ovaj program, koji može da rešava strukture čiji su štapovi medjusobno vezani zglobovima i opterećeni isključivo silama zatezanja (prethodno napregnute mreže i kablovske rešetke) ili silama zatezanja i silama pritiska (kablovske rešetke). Spoljašnje opterećenje deluje na konstrukciju u čvorovima. Oslonci strukture su nepomerljivi. Postupak analize sproveden je primenom iterativnog procesa koristeći numeričku šemu 2 (Njutn-Rafsonov postupak) u procesu rešavanja sistema algebarskih jednačina, tj. matrica krutosti se menja u svakom narednom ciklusu iteracije pa se rešenje za korektno postavljen problem dobija najviše kroz 6 do 7 iteracija.

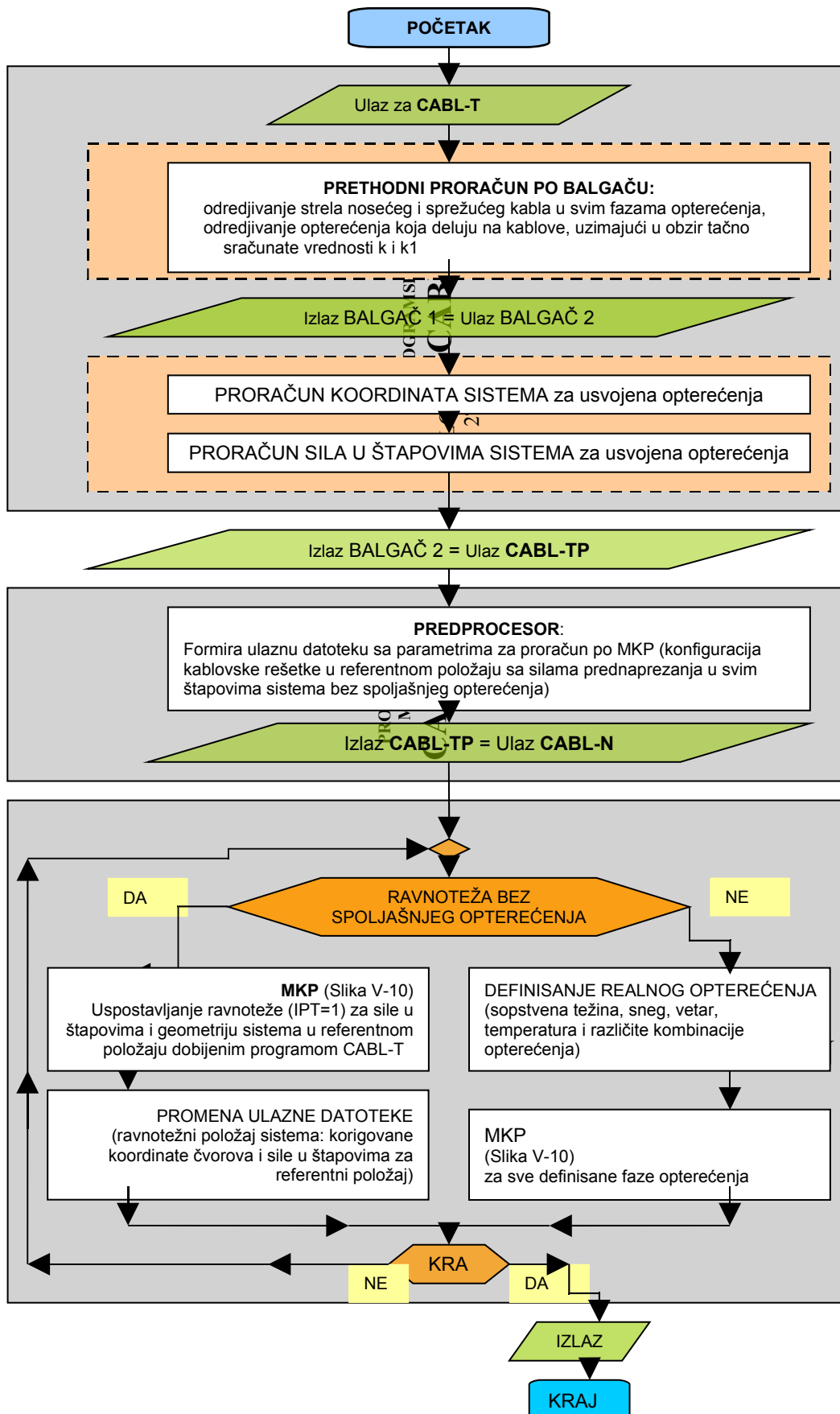
CABL-N rešava ravanske (kablovske rešetke) i prostorne (mrežaste) strukture kada su definisani:

- konfiguracija,
- fizička svojstva strukture,
- sile u štapovima i
- opterećenja u čvorovima.

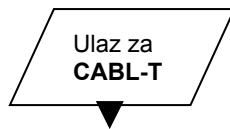
Spoljašnja opterećenja u čvorovima:

- (1) mogu da budu definisana (Indikator tipa problema **IPT=0**), kada se proračunom spoljašnje opterećenje uravnotežava sa unutrašnjim silama, a kao rezultat dobijaju se pomeranja i sile u štapovima usled njihovog delovanja.
- (2) mogu da ne budu definisana, nema ih (**IPT=1**), kada se traži ravnoteža za pretpostavljene sile prednaprezanja u referentnom položaju. Za svaku sledeću fazu opterećenja definiše se teret koji deluje u referentnom položaju.

Za drugi tip problema (IPT=1), program je napravljen da ostvari ravnotežu sistema koji je bez spoljašnjeg opterećenja (faza prethodnog naprezanja). Ulazni podaci za ovaj tip problema formirani su primenom programa CABL-TP. Izlazni podaci, pored drugih relevantnih podataka, smešteni su kao ulazni podaci za sledeće faze opterećenja (sopstvena težina krova, sneg, vetar...) (IPT=0).



SLIKA V-8 Blok šema algoritma "CABL-T", "CABL-TP" i "CABL-N"



1. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE KABLOVSKE REŠETKE
rasponi noseće i sprežne lančanice
visine oslonaca noseće i sprežne lančanice
strele noseće i sprežne lančanice
rastojanje kablovskih rešetki
2. FIZIČKE KARAKTERISTIKE KABLOVSKE REŠETKE
Jungov moduo E
koeficijent termičkog širenja α_t
površine poprečnih preseka nosećeg F_n i sprežnog F_p kabla
3. OPTEREĆENJA KABLOVSKE REŠETKE
sopstvena težina (g)
sneg (s)
vetar (w)
preostala sila iz prednapreženih kablova (v)



1. GEOMETRIJSKI PARAMETRI SISTEMA
broj stepeni slobode čvorova
ukupan broj čvorova
broj slobodnih čvorova
broj osloničkih čvorova
koordinate čvorova sa oznakama pomerljivosti
2. FIZIČKI PARAMETRI ŠTAPOVA
sile prednapreženja u štapovima
Jungov moduo E
pripadajući čvorovi svakog štapa
poprečni presek štapova
Temperatura u štapovima
3. MATEMATIČKI USLOVI PRORAČUNA
broj iteracija
procenat greške (tolerancija) pomeranja
4. OPTEREĆENJA U SLOBODNIM ČVOROVIMA SISTEMA



Za svaku fazu opterećenja ponaosob:
 KOORDINATE ČVOROVA
 NENAPREGNUTI ŠTAPOVI
 POMERANJA ČVOROVA
 SILA U ŠTAPOVIMA
 PROMENA SILE U ŠTAPOVIMA

SLIKA V-9

Šema ulaznih parametara programa "CABL-T" i "CABL-N" i izlaznih parametara "CABL-N"

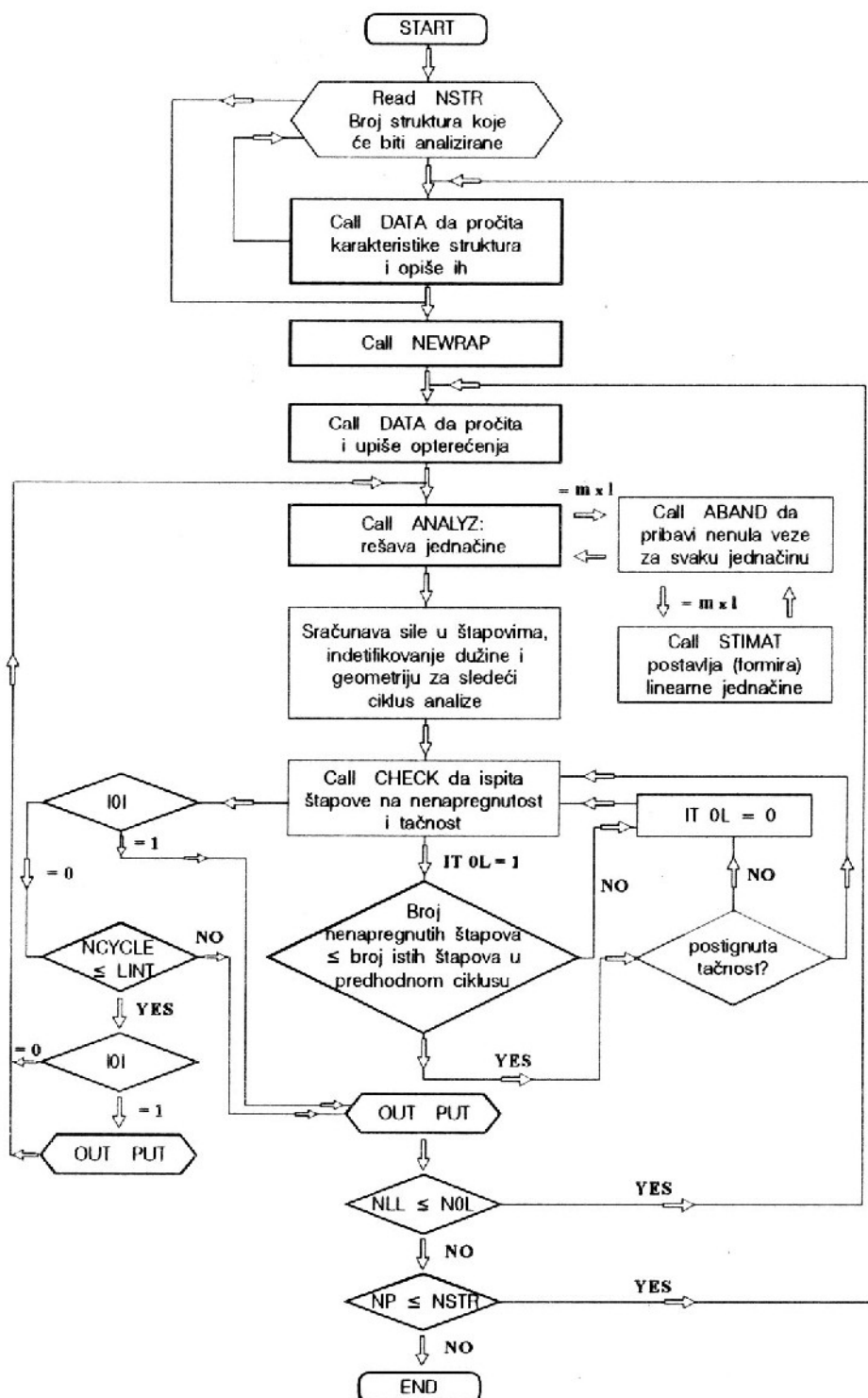
V-8 Prilog rešenju problema proračuna kablovskih rešetki

Poznato je da se kod rešavanja nelinearnih jednačina iterativnim putem pretpostavljaju ulazni (početni) parametri. Ulazni parametri se u današnjoj praksi usvajaju na osnovu iskustva konstruktora, imajući u vidu raspon konstrukcije, razmak nosača, poprečni presek kablova, opterećenja koja će najverovatnije delovati na krov... Pod ovim uslovima ne zna se kolika će biti krutost kablovske rešetke za pretpostavljenu konfiguraciju čvorova i sila prednapreženja, tj. sile koje deluju u konstrukciji, a da na nju nije aplicirano nikakvo spoljašnje opterećenje.

U ovom poglavlju prezentiran je kombinovani analitičko-numerički model proračuna kablovskih rešetki, prikazan na slici V-8.

- Analitički se brzo i pouzdano pribavljaju ulazni parametri za iterativni postupak po MKP korišćenjem programskog modula CABL-T i CABL-TP.
- Metodom konačnih pomeranja, numeričkom procedurom rešavanja sistema nelinearnih jednačina, dolazi se do konačnih rezultata: konfiguracije sistema, pomeranja čvorova i sila u štapovima sistema za svaku od faza opterećenja konstrukcije.

Programski moduli za PC, dati u prilogu disertacije, dodatno utiču na ubrzanje postupka u celini i olakšano formiranje inicijalnih (početnih) parametara, koji u daljem toku proračuna pouzdano dovode do brze konvergencije iterativnog postupka, i naravno, do dovoljno tačnih konačnih rezultata.



SLIKA V-10 Blok šema algoritma "CABL-N" (proračun po MKP)

Ovako koncipiran analitičko-numerički model proračuna predstavlja **doprinos unapredjenju proračuna visećih konstrukcija tipa kablovskih rešetki:**

- Skraćenje vremena rada računara,
- Povećane tačnosti rezultata,
- Kontrole stabilnosti konstrukcije prema parametrima iz *poglavlja III*.

Poglavlje VI

Analiza stabilnosti nekih izvedenih konstrukcija

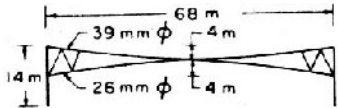
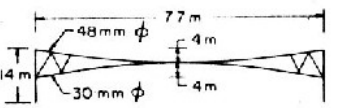
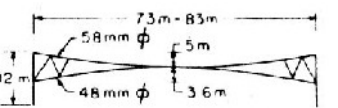
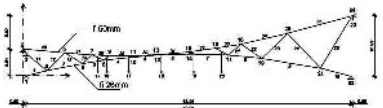
VI-1 Uvod

U ovom polavlju biće prikazani primeri izgrađenih kablovskih rešetki za pokrivanje velikih raspona, prema dostupnim podacima iz literature [1], [21], [33], [43], [46], [53], [63], [65], [72], [93] i [101]. Globalna analiza konstrukcija, koje će biti prikazane, daće njihov odgovor na projektovana opterećenja. Tako dobijeni elementi biće analizirani sa aspekta kriterijuma stabilnosti, koji su prikazani u *poglavlju III*. U procesu analize dobijenih rezultata doći će se do redosleda važnosti pojedinih kriterijuma, kao i njihov uticaj na globalnu stabilnost kablovskih rešetki.

VI-2 Konstrukcijske karakteristike nekih izvedenih kablovskih rešetki

Izgradnja stadiona za zimske sportove 1956. godine u Johaneshovu kod Štokholma u Švedskoj (*SI-I-7, II-4*), koji je pokriven kablovskim rešetkama, dovela je do masovne primene ovih konstrukcija. Tako je u periodu od nekoliko godina izgrađeno više od stotinu objekata koji su pokriveni ovim konstrukcijskim sistemom. Objekti, čije su karakteristike prikazane, izabrani su kao tipični primeri kablovskih rešetki za pokrivanje raspona koji se kreću od 60m do 80m, sa lakim krovim pokrivačem. U Tabeli VI-1 date su konstrukcijske šeme konfiguracije nosača, raspon i dužina objekta, međusobni razmak kablovskih rešetki, način njihovog oslanjanja i opterećenja.

TABELA VI-1 *Konstruktivske karakteristike nekih kablovskih rešetki*

Opis	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska 	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija 	Klizalište u Johaneshovu, Švedska 	Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu, Srbija 
Medjusobni razmak nosača	3.35m	4.7m	5.28m	5.0m
Dužina objekta	40m	140m	120m	45m
Tip oslonačke konstrukcije	Izvrnuti luk	Čelični stubovi i zatege	Čelični stubovi i zatege	AB stubovi i čelične zatege
Broj čvorova konstrukcije	19	19	19	24
Slobodni/oslonački čvor.	15 / 4	15 / 4	15 / 4	18 / 6
Broj štapova	30	30	32	35
Noseći/dijag./stabilizujući	10 / 12 / 8	10 / 12 / 8	10 / 14 / 8	10 / 15 / 10
Površine popreč.preseka	1000 / 400 / 446 mm ²	1520 / 400 / 594 mm ²	2325 / 600 / 1592 mm ²	1511 / 381 / 400 mm ²
Prednaprezanje (ekvivalent)	0.28 kN/m ²	0.20 kN/m ²	0.39 kN/m ²	0.15 kN/m ²
Opterećenja kN/m ²				
g = Sopstvena težina	0.40	0.50	0.42	0.35
s = sneg	0.75	0.50	1.00	1.00
w = vetar	-0.60	-0.42	-0.40	-0.64
t = temperatura °C	-20 do +20	-10 do +25	-20 do +20	-15 do +15

VI-3 Kontrola ravnoteže kablovskih rešetki u referentnom položaju metodom konačnih pomeranja

Za gore definisane konstrukcije prethodno napregnutih kablovskih rešetki obešenog krova izvršena je **provera ravnoteže u referentnom položaju** (faza potpunog prethodnog naprezanja). Pri tome na sistem ne deluje spoljašnje opterećenje. Parametri referentnog položaja: koordinate čvorova i sile u štapovima dobijeni su primenom programa CABL-T po metodi prof.Balgača, koja je prilagodjena za kablovske rešetke i programski prilagodjena za računarsku primenu. Programom CABL-TP formirana je ulazna datoteka za metod konačnih pomeranja, tj. definisana je konfiguracija sistema: numeracija čvorova, povezivanje štapova, opterećenje i temperaturna promena u štapovima i to za preuzete podatke iz programa CABL-T.

Podaci dobijeni programom CABL-T, predstavljaju ravnotežno stanje konstrukcije u referentnom položaju dobijenom analitičkim postupkom prof.Balgača. Metodom konačnih pomeranja, tj. programom CABL-N, kontrolisana je ravnoteža sistema, prema blok šemi prikazanoj na slici V-8. Dobijeni rezultati složeni su tabelarno. Zbog preglednosti rezultata prikazane su samo maksimalne vrednosti pomeranja i sila u pojasnim štapovima:

- Maksimalna korekcija vertikalnih koordinata slobodnih čvorova sistema (Tabela VI-2). Horizontalna pomeranja su zanemarljivo mala.
- Ukupne sile u štapovima i njihove korekcije (Tabela VI-3). U sistemu ne postoje nenapregnuti (labavi) štapovi u referentnom položaju.

TABELA VI-2

Maksimalna korekcija pomeranja slobodnih čvorova sistema u referentnom položaju - čvor u sredini raspona

Vertikalni položaj čvora dobijen programom	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Klizalište u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu, Srbija
CABL-T	4,597 m	4,819	4,349	4,017
CABL-N	4,586 m	4,805	4,334	3,999
Korekcija	1,13 cm	1,36 cm	1,46 cm	1,82 cm
Odstupanje	2,5 ‰	2,8 ‰	3,4 ‰	4,48 ‰

TABELA VI-3

Maksimalna korekcija sila u pojasnim štapovima sistema u referentnom položaju

Sile u štapovima konstrukcije, dobijene programom	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Ledena dvorana u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu, Srbija	
Gornji-noseći	CABL-T	402,770 kN	617,048 kN	929,168 kN	249,288 kN
	CABL-N	418,751 kN	637,592 kN	966,349 kN	265,722 kN
	Korekcija	15,981 kN	20,544 kN	37,181 kN	16,434 kN
	Odstupanje	3,82 ‰	3,22 ‰	3,85 ‰	6,18 ‰
Donji-stabilizujuć	CABL-T	298,992 kN	408,463 kN	908,391 kN	237,074 kN
	CABL-N	293,004 kN	400,515 kN	891,884 kN	239,076 kN
	Korekcija	-5,988 kN	-7,948 kN	-16,508 kN	-3,002 kN
	Odstupanje	2,05 ‰	1,98 ‰	1,85 ‰	1,26 ‰

Analiza rezultata

Opravdanost primene predložene metode za pribavljanje početnih parametara za konačan proračun, prethodno napregnutih visećih konstrukcija po MKP, očigledna je.

Korekcije geometrije tačaka sistema, a takodje i sila u štapovima su neznatne. Maksimalne korekcije geometrije su: 1.13cm, 1.36cm, 1.46cm i 1.82cm. Maksimalne korekcije sila u štapovima nosećeg kabla su: 3,22% do 6,18% u odnosu na silu dobijenu MKP, dok su korekcije sila u štapovima stabilizujućeg kabla u granicama 1,26% do 2,05%.

Pretpostavljeni podaci su vrlo bliski ravnotežnom stanju, jer se konačni ravnotežni položaj dobija kroz tri iteracije programom CABL-N.

VI-4 Proračun kablovskih rešetki za projektovana opterećenja metodom konačnih pomeranja

Tipični primeri kablovskih rešetki, analizirani su u prethodnoj glavi sa aspekta opravdanosti primene kombinovane, analitičko-numeričke metode za dobijanje parametara u referentnom položaju sistema. Proračun analiziranih kablovskih rešetki za projektovana opterećenja daće odgovore konstrukcija, koji će biti analizirani sa aspekta kriterijuma stabilnosti definisanih u *poglavlju III*.

Svaka od analiziranih konstrukcija, prvobitno je prethodno napregnuta - sračunati početni parametri po analitičkoj metodi profesora Balgača, koja je prilagodjena za primenu na kablovske rešetke i primenu na PC-ju (programski modul „CABL-T“). Predprocesor „CABL-TP“ formirao je ulaznu datoteku za MKP. Programski modul „CABL-N“, sa opcijom provere ravnoteže za referentni položaj (faza potpunog prednaprezanja), je proverom ravnoteže, formirao i novu ulaznu datoteku INPUT.DAT sa podacima o svim fazama opterećenja. Opterećenja deluju na uravnoteženu prethodno napregnutu konstrukciju kablovskih rešetki.

Opterećenja deluju na konstrukcije, kao što je predviđeno tadašnjim projektima (Tabela VI-1), a sama konstrukcija prolazi kroz sledeće faze opterećenja koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju:

- (1) Sopstvena težina krova i konstrukcije **g**,
- (2) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sneg: **g+s**
- (3) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g+s-w**
- (4) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g-w**
- (5) Sopstvena težina krova i konstrukcije i negativna temperaturna promena na štapove sistema **g-t**,
- (6) Sopstvena težina krova i konstrukcije i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema **g+t**,
- (7) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-t**
- (8) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s+t**

- (9) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-w-t**
- (10) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g+s-w+t**
- (11) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i negativna temperaturna promena na štapove sistema: **g-w-t**
- (12) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova i pozitivna temperaturna promena na štapove sistema: **g-w+t**

Karakteristični parametri, od uticaja na stabilnost analiziranih kablovskih rešetki, prikazani su u Tabeli VI-4, za sve karakteristične faze opterećenja.

TABELA VI-4

Karakteristični parametri od uticaja na stabilnost analiziranih kablovskih rešetki

	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Klizalište u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu, Srbija
Referentni položaj	Prednaprezanje			
Projektovani položaj	Prednaprezanje i sopstvena težina krova sa konstrukcijom			
(1) faza opterećenja	g			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹⁵	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	512.328	860.247	1159.645	405.023
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	276.156	338.104	852.455	210.725
Pomeranja u odnosu na referentni položaj [m]	-0.1877	-0.3442	-0.1874	-0.1320
(2) faza opterećenja	g+s			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	737.163	1118.094	1743.888	888.726
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	183.646	242.893	651.260	122.844
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	-0.3514	-0.3493	-0.4542	-0.2792
(3) faza opterećenja	g+s-w			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	557.329	901.561	1507.784	581.215
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	255.994	321.174	751.785	179.239
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	-0.0713	-0.0523	-0.2692	-0.1038
(4) faza opterećenja	g-w			
Nenapregnuti štapovi	ne	ne	ne	Neki dijag. ¹⁶
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	402.156	661.550	967.364	194.286
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	335.104	398.773	911.259	296.851
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.0886	0.2949	0.1784	0.2663
(5) faza opterećenja	g-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	540.863	880.818	1229.884	427.371
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	297.095	353.324	949.431	230.347
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.0016	0.0171	0.0165	0.0217
(6) faza opterećenja	g+t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	484.796	809.471	1090.078	382.892
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	254.204	299.668	814.646	191.480
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	-0.018	0.0255	-0.017	-0.0237
(7) faza opterećenja	g+s-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹
Maksimalna sila u nosećem kablu [kN]	762.125	1136.690	1804.279	907.484
Maksimalna sila u stabilizujućem kablu [kN]	206.402	258.162	729.567	142.829
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	-0.3308	-0.3304	-0.4293	-0.2611

15 Dijagonalni štap koji povezuje oslonac stabilizujućeg kabla i noseći kabl, i svi štapovi koji su „paralelni“ sa njim

16 Dijagonalni štap koji povezuje oslonac nosećeg kabla sa stabilizujućim kablom, i svi štapovi uz niži oslonac koji su „paralelni“ sa njim

(8) faza opterećenja		g+s+t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	
Maksimalna sila u nosećem kablju [kN]	712.537	1072.279	1684.366	870.296	
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju [kN]	160.815	204.597	572.717	102.927	
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	-0.3723	-0.3791	-0.4797	-0.2973	
(9) faza opterećenja		g+s-w-t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	
Maksimalna sila u nosećem kablju [kN]	584.537	921.784	1571.237	601.161	
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju [kN]	279.125	336.372	829.982	199.658	
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.0531	-0.040	-0.2467	-0.0861	
(10) faza opterećenja		g+s-w+t			
Nenapregnuti štapovi	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	Neki dijag. ¹	
Maksimalna sila u nosećem kablju [kN]	530.441	851.665	1445.192	561.676	
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju [kN]	233.728	283.014	673.351	158.837	
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.0899	-0.0836	-0.2922	-0.1214	
(11) faza opterećenja		g-w-t			
Nenapregnuti štapovi	Ne	Ne	Ne	Neki dijag. ²	
Maksimalna sila u nosećem kablju [kN]	439.825	685.507	1053.807	232.741	
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju [kN]	355.455	411.798	983.680	320.191	
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.3637	0.3029	0.1896	0.2860	
(12) faza opterećenja		g-w+t			
Nenapregnuti štapovi	Ne	Ne	Ne	Neki dijag. ²	
Maksimalna sila u nosećem kablju [kN]	365.980	602.013	885.619	156.937	
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju [kN]	314.678	368.648	859.882	273.576	
Pomeranja u odnosu na projekovani položaj [m]	0.2777	0.2736	0.1663	0.2451	

TABELA VI-5

Kriterijumi stabilnosti i sračunati parametri analiziranih kablovskih rešetki

	Sportska hala u Bilinghemu, Engleska	Prolazni magacin u Šipholu, Holandija	Klizalište u Johaneshovu, Švedska	Sportski kompleks „Zdravlje“ u Leskovcu, Srbija
Nenapregnuti štapovi	Da – dijagon.	Da – dijagon.	Da – dijagon.	Da - dijag.
Maksimalna sila u nosećem kablju kN	762.125	1136.690	1804.279	907.484
Faza opterećenja	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t	(7) g+s-t
¹⁷ Max. dozvoljena sila u nosećem kablju kN	1463	2100	3969	1996
¹⁸ Kataloška računaska prekidna sila	1570	2390	3650	2277
Maksimalna sila u stabilizujućem kablju kN	355.455	411.798	983.680	320.191
Faza opterećenja	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t	(11) g-w-t
³ Max. dozvoljena sila u stabilizujućem kablju kN	711	824	2164	640
⁴ Kataloška računaska prekidna sila	700	933	2500	615
Max.pomeranje u odnosu na projek. položaj m	-0.3637	-0.3791	-0.4797	0.2860
Faza opterećenja	(11) g-w-t	(8) g+s+t	(8) g+s+t	(11) g-w-t
¹⁹ Max.dozv.pomer. u odnosu na projekt.polož. m	0.227	0.257	0.277	0.200
²⁰ Max.dozv.pomer. u odnosu na projekt.polož. m	0.340	0.385	0.415	0.300

17 Prema efektivnim kriterijumima projektnih jačina kablova – glava III-3.1

18 Prema katalogu proizvođača kablova

19 Prema našem pravilniku za noseće čelične konstrukcije – glava III-3.2 (L/300)

20 Prema EC-3 maksimalni ugib za čelične konstrukcije – glava III-3.2 (L/200 ili L/250)

Analiza rezultata

Proračun konstrukcija koje su prikazane pokazuje da nisu ispunjeni svi uslovi stabilnosti koji se pominju u literaturi i primenjuju u praksi.

- **Sportska hala u Bilinghemu (Engleska):** u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju zadovoljava, ali ne zadovoljava u pogledu sila u stabilizujućem kablju, kao ni u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije. Takodje, pojasni kablovi (noseći i stabilizujući) su zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su samo u fazi prednaprezanja zategnuti, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut. Može se reći da ova konstrukcija u znatnoj meri pokazuje znake “uznemirenosti”, što može izazvati nesigurnost posetilaca i korisnika dvorane sa aspekta njihovog komfora.
- **Prolazni magacin u Šipholu (Holandija):** u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem i stabilizujućem kablju zadovoljava, ali ne zadovoljava u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije. Takodje, pojasni kablovi (noseći i stabilizujući) su zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su samo u fazi prednaprezanja zategnuti, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut. Može se reći da je ova konstrukcija nešto stabilnija u odnosu na Sportsku halu u Bilinghemu (Engleska).
- **Klizalište u Johaneshovu (Švedska):** u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju ne zadovoljava, ali zadovoljava u pogledu sila u stabilizujućem kablju. Ne zadovoljava ni u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije. Takodje, pojasni kablovi (noseći i stabilizujući) su zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su samo u fazi prednaprezanja zategnuti, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut. Može se reći da i ova konstrukcija u znatnoj meri pokazuje znake “uznemirenosti”, što može izazvati nesigurnost posetilaca i korisnika dvorane sa aspekta njihovog komfora.
- **Sportski kompleks “Zdravlje” u Leskovcu (Srbija):** u pogledu maksimalnih zatežućih sila u nosećem kablju zadovoljava, dok u pogledu sila u stabilizujućem kablju, prekoračuje granicu iskorišćenosti za oko 4%. Ne zadovoljava u pogledu pomeranja u odnosu na projektovani položaj konstrukcije. Pojasni kablovi (noseći i stabilizujući) su zategnuti u svim fazama opterećenja, a dijagonalni štapovi su samo u fazi prednaprezanja zategnuti, dok je u narednim fazama opterećenja svaki drugi štap nenapregnut. Može se reći da ova konstrukcija pokazuje znake “uznemirenosti” što može izazvati nesigurnost posetilaca i korisnika dvorane sa aspekta njihovog komfora, a eventualna dinamička analiza pokazala bi kolika se pomeranja krova mogu očekivati u slučaju dinamičke pobude (vetar, zemljotres, eksplozija).

VI-5 Kriterijumi stabilnosti prema prioritetu ispunjenosti

Prema do sada analiziranim primerima može se predložiti model prioriteta postojećih kriterijuma, koji moraju biti ispunjeni da bi se konstrukcija kablovske rešetke mogla proglasiti stabilnom i sigurnom u eksploataciji:

- (1) Maksimalna dozvoljena pomeranja konstrukcije definišu se kao minimalno potrebni lokalni ili globalni uslovi stabilnosti prema Evro Codu-3 ($L/250$).
- (2) Nijedan od pojasnih kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti.
- (3) Efektivna projektna jačina kabla mora biti jednaka ili veća od najveće vrednosti sila u kablovima koje nastaju pod uticajem različitih kombinacija opterećenja.

Kriterijume stabilnosti potrebno je proširiti i dopuniti:

- poprečna pomeranja čvorova treba ograničiti, jer se javljaju nenapregnuti dijagonalni štapovi, što može dovesti do „vitoperenja“ vertikalne ravni u kojoj su noseći i stabilizujući kabl, a samim tim i do horizontalnog pomeranja krova – upravno na ravan nosača,
- pomeranja usled harmonijskih oscilacija krova (prinudne prigušene vibracije),
- komfor korisnika i posetilaca, koji je direktno zavisao od maksimalnog pomeranja konstrukcije usled statičkog i dinamičkog opterećenja. Sprovedjenjem dinamičke analize dobila bi se maksimalna pomeranja koja ne treba da prekorače vrednost $L/200$.

Poglavlje **VII**

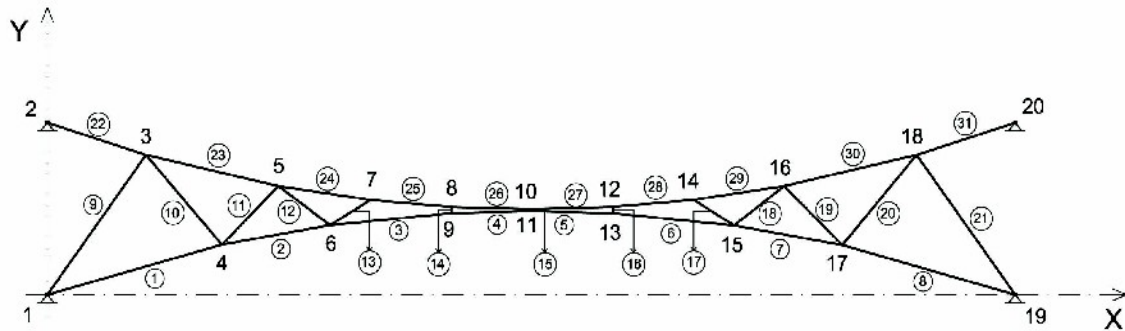
***Utvrđivanje nivoa
prednaprezanja
kablovskih rešetki***

VII-1 Uvod

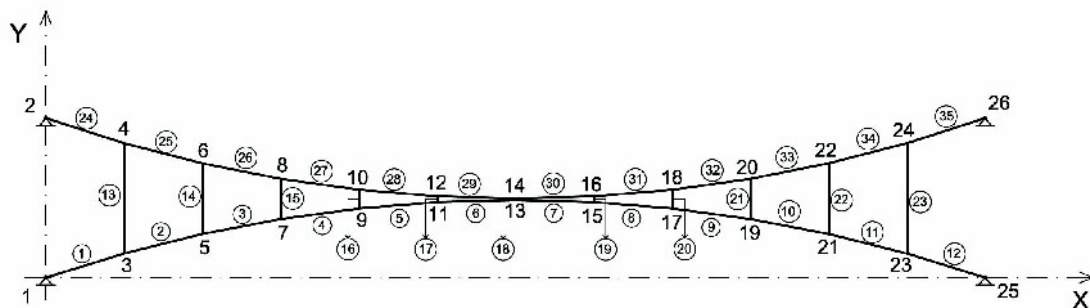
Nivo prednaprezanja kablovske rešetke određiće se analizom rezultata, koji će biti dobijeni primenom postupka prikazanog u poglavlju V (*Slika V-8*). Prethodno će biti određena konfiguracija sistema i usvojeni noseći elementi (kablovi). Realno očekivana opterećenja analizirana su u daljem tekstu. Za različite težine krovnog pokrivača primeniće se prikazani model proračuna kablovske rešetke raspona 60m. Pri tome kablovska rešetka biće izložena realnim opterećenjima, a variraće nivo njene krutosti. Analizom dobijenih rezultata dobiće se nivo sila koje treba da deluju u konstrukciji u referentnom položaju (faza potpunog prednaprezanja) da bi za određenu težinu krovnog pokrivača konstrukcija bila stabilna prema predloženim kriterijumima.

Raspon kablovske rešetke izabran je prema potrebama pokrivena univerzalne dvorane za sportske, zabavne ili sajamske manifestacije. Imajući u vidu broj posetilaca koji odgovara jednom regionalnom centru u Srbiji, usvojen je raspon $L=60,00m$. Strela nosećeg kabla usvaja se prema uslovu da $f/l \leq 1/6$, a da se može usvojiti i do odnosa $f/l > 1/20$, tj. strela se kreće u granicama od 3m do 10m. Zbog tipiziranja elemenata usvaja se simetrična geometrijska forma sa strelom nosećeg i prednaprežućeg kabla $f=5,00m$ i sa osloncima na visini od $h_1=h_2=10,00m$. Medjusobni razmak kablovskih rešetki kreće se od 4,00m do 6,00m. Usvojen je razmak $a=5,00m$.

Analiza stabilnosti konstrukcije biće sprovedena za dva osnovna tipa kablovskih rešetki, tj. sa štapovima ispune koji mogu biti dijagonalni sa nagibom dijagonala 50° do 20° i sa vertikalnim štapovima ispune koji su na medjusobnom rastojanju 5m.



SLIKA VII-1 Konfiguracija kablovske rešetke sa dijagonalnim štapovima ispune – tip “D”



SLIKA VII-2 Konfiguracija kablovske rešetke sa vertikalnim štapovima ispune – tip “V”

VII-2 Analiza sopstvene težine kablovske rešetke i krovnog pokrivača

Sopstvena težina kablovske rešetke može se sračunati iz podataka o dužini kablovskih elemenata, njihovoj težini po dužnom metru, kao i međusobnog rastojanja samih nosača. Najčešće primenjivani preseći kablova su od $\Phi 40\text{mm}$ do $\Phi 50\text{mm}$ za noseću užad i $\Phi 25\text{mm}$ do $\Phi 30\text{mm}$ za stabilizujuću užad. Rasponi su oko 60m, a međusobno rastojanje nosača od 4m do 6m. Kablovski nosači su u proseku teški od $0,05\text{kN/m}^2$ do $0,07\text{kN/m}^2$.

Konstrukcije građene šezdesetih i sedamdesetih godina XX veka, kao zatvorene hale, pokrivane su lakim i teškim elementima.

Laka konstrukcija krova sastojala se od elemenata koji su obezbeđivali vodonepropustljivost krovne površine (krovni pokrivač od ravnog lima ili slojevite hidroizolacije sa reflektujućom zaštitom) i sa odgovarajućom toplotnom izolacijom (perlit beton kao ravnajući sloj na TR-limu i termoizolacija). Takve krovne konstrukcije su težine od $0,40\text{ kN/m}^2$ do $0,45\text{ kN/m}^2$.

Teška konstrukcija krova sadržala je neke tipove građevinskih ploča (durisol, siporeks, salonit) umesto TR lima, što je sa slojevima koji su isti kao kod lakih pokrivača, konstrukciju krova opterećivalo od $0,65 \text{ kN/m}^2$ do $0,70 \text{ kN/m}^2$.

Konstrukcije krova, za zatvorene i otvorene, hale bez termoizolacionog sloja i ploča, odnosno TR lima, opterećuju konstrukciju sa $0,20 \text{ kN/m}^2$ do $0,25 \text{ kN/m}^2$.

Savremene tendencije uvođenja novih materijala za pokrivanje, dovele su do primene poliesterskih i staklenih vlakana u obliku tkanina koje su impregnirane vodonepropusnom emulzijom na bazi teflona (Poli Tetra Fluorid Etilen). Naročito pogodna primena ovakvih tkanina pokazale se kod zatvorenih izložbenih prostora, ili otvorenih nadstrešnica stadiona. Transparentnost, trajnost geometrije, zatezna čvrstoća i vrlo mala težina dovela je do masovne primene ovih tkanina u kombinaciji sa kablovskim konstrukcijama. Težina krovnog pokrivača, zavisno od debljine tkanine i sekundarnih elemenata, može biti od $0,07 \text{ kN/m}^2$ do $0,10 \text{ kN/m}^2$.

Imajući u vidu navedene karakteristične krovne konstrukcije, može se zaključiti da su kablovske rešetke izložene opterećenjima koja se mogu svrstati u **kategoriju ultra lakih krovova** sa sopstvenom težinom od oko $0,15 \text{ kN/m}^2$, **vrlo lakih krovova** sa sopstvenom težinom od oko $0,30 \text{ kN/m}^2$, **lakih krovova** sa sopstvenom težinom od oko $0,50 \text{ kN/m}^2$ i **srednje teških krovova** sa težinom od oko $0,75 \text{ kN/m}^2$.

VII-3 Dimenzionisanje nosećih elemenata kablovske rešetke

Dimenzionisanje i izbor nosećih elemenata konstrukcije koja pokriva veliki raspon je vrlo važan deo proračuna u celini. Jedan od primarnih faktora zbog kojih posebnu pažnju treba posvetiti usvajanju poprečnih preseka kablova je cena koštanja. Preliminarni postupak dimenzionisanja kablovskih elemenata po Melmanu [64] i Krišni [53] biće primenjen ovde. Primenom tog postupka pribaviće se potrebne površine poprečnih preseka kablova korišćenjem uslova zasnovanih na:

- otpornosti kablova i
- deformaciji kablovske rešetke.

Prethodno je potrebno pretpostaviti opterećenja koja deluju na konstrukciju, kako bi se dobila prva pretpostavljena vrednost površine poprečnih preseka nosećeg F_n i stabilizujućeg F_p kabla.

Opterećenja koja će biti razmatrana su:

- sopstvena težina krova, objašnjena u odeljku VII-1,
- povremeni teret (sneg) $s=1,00 \text{ kN/m}^2$,
- vetar kao kompleksno opterećenje, koje deluje dinamički na konstrukciju. U ovoj fazi vetar će biti pretpostavljen kao kontinualno statičko opterećenje, i to:
 - „sisanje“ na celom rasponu $w=-0,48 \text{ kN/m}^2$ (provera stabilnosti stabilizujućeg kabla),
 - isti intenzitet „sisanja“ na jednoj polovini raspona i pritiska na drugoj polovini raspona (provera deformacija).
- prednaprezanje se uvodi kao kontinualno dodatno opterećenje v , a usvaja se u preliminarnom proračunu kao uslov stabilnosti nosećeg kabla ($v > g-w$) ili kao uslov stabilnosti prednaprežućeg kabla ($v < g+s-w$).

TABELA VII-1 *Dodatno opterećenje v*

	$g=0,15 \text{ kN/m}^2$	$g=0,30 \text{ kN/m}^2$	$g=0,50 \text{ kN/m}^2$	$g=0,75 \text{ kN/m}^2$
$v > g-w$	0,33	0,18	0,02	0,27
$v < g+s-w$	0,67	0,82	1,02	1,27
Usvojeno	0,70	0,80	0,95	1,10

VII-3.1 Usvajanje kablova na bazi otpornosti materijala

Procena površine nosećeg, odnosno stabilizujućeg kabla, uradiće se najpre na osnovu minimalnih uslova potrebne jačine kablova prikazanih u odeljku III-3. Sila u kablu sračunava se pomoću izraza V-7 i V-8. Promena sile u kablovima usled dodatog opterećenja usvaja se kao podeljena sila izmedju nosećeg i stabilizujućeg kabla, u obrnuto srazmernoj proporciji prema stinjenosti (odnos strele i raspona).

Sila inicijalnog prednapreznja u gornjem i donjem kablu iskazuje se izrazom:

$$T_{0,gore} = \frac{5,00 \cdot 0,70 \cdot (60)^2}{8 \cdot 5,00} = 315 \text{ kN} \qquad T_{0,dole} = \frac{5,00 \cdot 0,70 \cdot (60)^2}{8 \cdot 5,00} = 315 \text{ kN}$$

Promena sile u gornjem i donjem kablu usled sopstvene težine:

$$\Delta T_{1,gore} = \frac{5,00 \cdot 0,15 \cdot (60)^2}{8 \cdot 5,00} \cdot \frac{5,00}{10,00} = 33,75 \text{ kN} \qquad T_{1,dole} = 33,75 \cdot \frac{5,00}{5,00} = 33,75 \text{ kN}$$

Promena sile u gornjem i donjem kablu usled težine snega:

$$\Delta T_{2,gore} = \frac{5,00 \cdot 1,0 \cdot (60)^2}{8 \cdot 5,00} \cdot \frac{5,00}{10,00} = 225 \text{ kN} \qquad T_{2,dole} = 225 \cdot \frac{5,00}{5,00} = 225 \text{ kN}$$

Promena sile u gornjem i donjem kablu usled dejstva vetra:

$$\Delta T_{3,gore} = \frac{5,00 \cdot 0,8 \cdot (60)^2}{8 \cdot 5,00} \cdot \frac{5,00}{10,00} = 108,0 \text{ kN} \qquad \Delta T_{3,dole} = 108 \cdot \frac{5,00}{5,00} = 108 \text{ kN}$$

TABELA VII-2 *Preliminarni proračun sila u kablovima po Melmanu [64] i Krišni [53]*

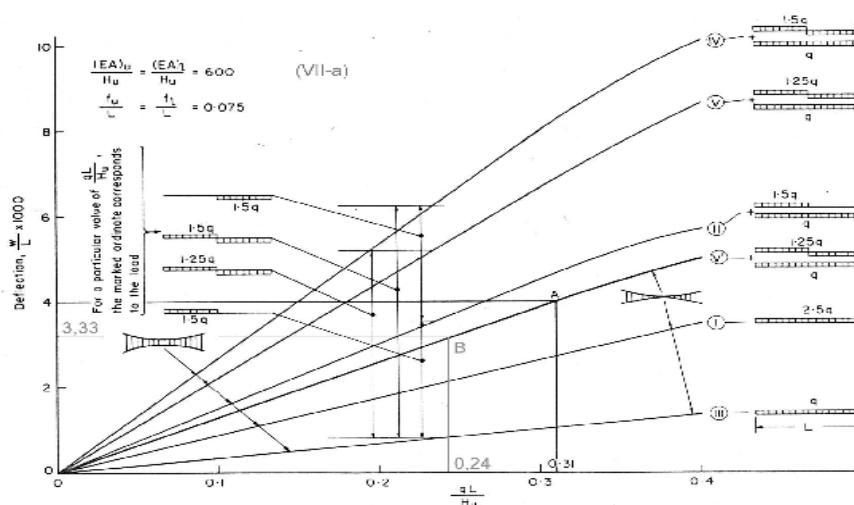
	$g=0,15 \text{ kN/m}^2$		$g=0,30 \text{ kN/m}^2$		$g=0,50 \text{ kN/m}^2$		$g=0,75 \text{ kN/m}^2$	
	Noseci (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseci (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseci (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseci (gornji)	Stabilizujući (donji)
Promena sile	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>
S0	315	315	360	360	427,5	427,5	495	495
dS1 (g)	34	-34	67,5	-67,5	112,5	-112,5	168,75	-168,75
dS2 (s)	225	-225	225	-225	225	-225	225	-225
dS3 (w)	-108	108	-108	108	-108	108	-108	108
Min.sila		56		67,5		90		101
T0=2S0	630	630	720	720	855	855	990	990
2,2T1	767	619	941	644	1188	693	1460	718
1,6T1+2,7T2	1166	-158	1292	-140	1472	-104	1670	-85
2,2T3	1262	124	1436	149	1683	198	1955	223
2,0T4	932	329	1089	351	1314	396	1562	419
2,0T6	482	779	639	801	864	846	1112	869
²¹ Užad [mm]	Φ36	Φ29	Φ39	Φ29	Φ42	Φ30	Φ45	Φ32

VII-3.2 Usvajanje kablova na bazi deformacija

Potreban poprečni presek kablova može biti usvojen i na osnovu definisanih deformacija, tj. pomeranja koja su definisana u dijagramima na Slici VII-3. Neophodno je da se postave uslovi na osnovu kojih se bazira usvajanje preseka:

- sopstveno opterećenje krova prenosi se na kablovske rešetke pre nego što one zauzmu konačnu geometriju,
- kritični uslov za proveru pomeranja nastaje usled prethodnog uslova, tj. dodavanjem korisnog opterećenja q + antimetrično dejstvo vetra $= 1.25q$
- pretpostvka je da: - efekat promene f_1 / L i $(EA)_1$ beznačajan, - granično pomeranje $w = L / 300$, tj. $w / L = 3,33 \times 10^{-3}$
- pretpostavljena je kinematička linearnost.

Poprečni preseki kablova mogu sada biti usvojeni uz pomoć brojnih kriva koje su date na Slici VII-3. Osnovne krive za maksimalna pozitivna pomeranja obeležena su rimskim brojevima I i II. Sve ostale krive izvedene su skaliranjem ordinata zavisno od opterećenja. Kriva koja odgovara konfiguraciji konstrukcije i pretpostavljenom kritičnom opterećenju je V'.



SLIKA VII-3 Krive vertikalnih pomeranja kablovskih rešetki [53]

Povlačenjem apscise za granično pomeranje $w / L = 3,33 \times 10^{-3}$ do preseka sa krivom V' u tački B, dobija se vrednost od $0,24qL/H_u$, za gornju granicu, dok se za donju granicu usvaja uslov $w / L = 4 \times 10^{-3}$ tj. $0,31qL/H_u$. Primenom izraza VII-a sa slike VII-3, dobija se:

$$A_{noseci} = \frac{600 \cdot q \cdot L}{0,24 \cdot E} = \frac{600 \cdot (0,15 \cdot 5,00) \cdot 60,0}{0,24 \cdot 165} = 682 \text{ mm}^2 \quad \text{VII-1}$$

Stabilizujuće uže usvaja se prema odnosu iz tabele VII-3, kao 779/1262 u odnosu na noseće uže, tj. dobija se 420 mm^2 .

TABELA VII-3 Preliminarni proračun površina poprečnog preseka užadi na bazi deformacija, prema Krišni [53]

	g=0,15 kN/m²		g=0,30 kN/m²		g=0,50 kN/m²		g=0,75 kN/m²	
	Noseći (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseći (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseći (gornji)	Stabilizujući (donji)	Noseći (gornji)	Stabilizujući (donji)
Popr.presek	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²
Sl.VII-1 za 0.24	682	-	1363	-	2273	-	2639	-
Sl. VII-1 za 0.31	528	-	1055	-	1760	-	2272	-
sile u užadima	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
T max	1262	779	1436	801	1683	855	1955	990
Ts / Tn	0,617		0,558		0,508		0,506	
¹ Užad [mm]	Φ33	Φ26	Φ45	Φ34	Φ58	Φ41	Φ62	Φ44
Užad [mm]	Φ29	Φ25	Φ40	Φ30	Φ51	Φ37	Φ58	Φ41

Površine poprečnih preseka užadi usvojene su na osnovu vrlo približnih obrazaca koji u sebi ne sadrže međusobni uticaj nosećeg i stabilizujućeg užeta. Dobijeni podaci koriste se samo kao polazni elementi za prethodni proračun po Balgaču. Balgačevim (analitičkim) postupkom treba proveriti da li usvojeni poprečni preseki užadi, sa usvojenim opterećenjem, zadovoljavaju usvojene kriterijume stabilnosti.

Dosadašnja praksa pokazala je da za raspone oko 60m, kao i za rastojanje nosača od 4m do 6m, treba primenjivati noseću užad Φ40mm do Φ50mm, a za prednaprežuću užad Φ25mm do Φ30mm.

VII-4 Analiza opterećenja od snega

U oblastima gde se javljaju snežne padavine²², opterećenje koje će odgovarati očekivanom snežnom pokrivaču, mora se sračunati. Intenzitet koji će biti uzet u obzir zavisice u mnogome od geografskog položaja objekta (klimatske zone i nadmorske visine). U tom kontekstu, važno je napomenuti da sneg u saradnji sa naletima vetra može izazvati nesimetrično opterećenje. Pojave nanosa snega nastaju sa vetrom brzine iznad 8 m/s, a naročito iznad 15 m/s (mećava). Sneg je tada suv, sitan i lako pokretljiv pa se taloži u svim zavetrinama, a naročito na mestima gde vazдушna struja vetra isisava. Opterećenje snegom može biti i simetrično ako je vetar slab, brzine manje od 5 m/s pa je sneg vlažan i težak. Ako se zna debljina snežnog pokrivača u proračun treba uzeti specifičnu težinu snega $\gamma_s = 1,5 \text{ kN/m}^3$. Za nišku kotlinu [20] zna se da su maksimalni nanosi snega u zimskom periodu veći od $h_s = 34 \text{ cm}$, a da je najveća visina zabeležena $h_{s,max} = 62 \text{ cm}$.

Po našim propisima PTP-2/1948. opterećenje snegom za ravne i do 20° nagnute površine krova usvaja se 0,75 kN/m² površine osnove. Kod nagiba većih od 20° koristi se tablica za razne nagibe krovova koja je deo propisa.

Visina i oblik nanosa snega na krov teško se može predvideti, ako se ne izvrše ispitivanja na modelu ili merenja na već izgradjenim krovovima slične geometrije. Sneg se zamenjuje suvom drvenom piljevinom, kvarcnim peskom, aluminskom prašinom i dr.

22 Potrebno je izraditi meteorološko-klimatološku studiju regiona u kojem će biti gradjen viseći krov, a na osnovu najmanje 15 godišnjeg neprekidnog posmatranja [20], [109] i [110]

Takodje, naizmenično topljenje i smrzavanje može dovesti do nejednake akumulacije opterećenja. Veća količina snega može se zadržati u nižim delovima krova. Usled nejednako raspodeljenog opterećenja mogu se javiti kritična pomeranja u kablovskom sistemu. Kada postoji mogućnost zadržavanja otopljenog snega na krovu, vodu treba tretirati kao dodatno opterećenje.

Za proračun modela koji su usvojeni, a na osnovu merenih vrednosti [20], opterećenje snegom je sračunato kao $s=\gamma_s h_{s,max}=1,0 \text{ kN/m}^2$, kao konstantno na celoj površini krova.

VII-5 Analiza opterećenja od vetra

Projektovanje visećih krovnih sistema umnogome zavisi od opterećenja vetrom. Uobičajeno je da se vetar tretira kao uniformni pritisak iliisanje pri projektovanju visećih krovova, uprkos dobijenim rezultatima merenja na modelima [11], [13], [15], [20], [23], [26], [46], [48], [72], [87], [90], [93], [97] i [102], što je daleko od zadovoljavajuće simulacije.

U nedostatku informacija preporučuje se, kad god je to moguće, dejstvo vetra na površinu krova odrediti ispitivanjem modela u aerodinamičkom tunelu. Ako su aeroelastični modeli suviše skupi, mogu se koristiti i kruti modeli koji, takodje, daju zadovoljavajuće rezultate.

Opterećenje vetrom u jugoslovenskoj tehničkoj regulativi obradjeno je sa najširim obimom primene u Tehničkim propisima iz 1964. Zasnivaju se na primeni izraza za opterećenje vetrom:

$$w = q \cdot C \cdot A, \quad [\text{kN}, \text{ ili } \text{kN/m}] \quad \text{VII-2}$$

gde je: q [kN/m^2] osnovno opterećenje vetrom,
 C [-] koeficijent oblika,
 A [m^2 ili m^2/m] izložena površina konstrukcije.

Oblasti q date su kartom geografskih zona opterećenja vetrom koja se prvi put pojavljuje u PTP-2/1948.

Medjunarodni tehnički dokumenti (ISO, CICIND, CECM)²³ tretiraju vetar kao slučajan i neprekidan proces koji se analizira i definiše primenom metoda matematičke statistike, mehanike turbulentnih strujanja i teorije sigurnosti konstrukcija.

Izračunato opterećenje vetrom w , odnosno aerodinamički pritisak q iz izraza VII-2, po karakteru je (kvazi)statički, a po intenzitetu odgovara traženom (globalnom ili parcijalnom) koeficijentu sigurnosti za projektovani konstrukcioni deo ili konstrukciju u celini.

Aerodinamički pritisak vetra zavisi i od odgovora konstrukcije, pre svega, njene vitkosti izražene frekvencijama slobodnih oscilacija u I tonu n_1 [Hz].

Principi i kvantitativni odnosi iz medjunarodne regulative prihvaćeni su i ugradjeni u JUS U.C7.110-113 Opterećenje vetrom, sa obaveznom primenom od 27.03.1992. [48].

Shodno osnovnim načelima, JUS definiše vetar:

23 ISO - Medjunarodni komitet za standarde
 CICIND - Medjunarodni komitet za industrijske dimnjake,
 CECM - Evropski komitet za čelične konstrukcije

- (a) u meteorološkom smislu - horizontalno ili približno horizontalno vazdušno strujanje,
- (b) u smislu mehanike fluida - turbulentno vazdušno strujanje,
- (c) kao opterećenje - dinamičko opterećenje slučajnog karaktera (stohastička poremećajna sila), koje se izražava kao kvazistatička, a deluje u horizontalnim ravnima,
- (d) u matematičkom smislu - stacionaran slučajni proces.

Opterećenje vetrom izračunava se, principijelno, po izrazu VII-2, a rezultat je sadejstva više uticaja predstavljenih odgovarajućim fizičkim veličinama. Pregled uticaja dat je u Tabeli VII-4.

TABELA VII-4 *Uticaji na opterećenje konstrukcija vetrom*

GRUPA UTICAJA	UTICAJ	POJEDINAČNE VELIČINE
FIZIČKE OSOBINE VAZDUHA		Gustina vazduha
		Kinematička viskoznost
PRIRODA VETRA	Pravac	
	Brzina vetra	Osnovna brzina Turbulentnost vazduha
TEREN OKO OBJEKTA	Topografija terena	
	Hrapavost terena	Konstante hrapavosti Gradijentna visina
OSOBINE KONSTRUKCIJE	Materijal konstrukcije	Modul elastičnosti
	Krutost konstrukcije	Koeficijent prigušenja oscilovanja
		Frekvencija oscilovanja u 1 tonu
	Oblik konstrukcije	Koeficijent sile (oblika)
		Rejnoldsov broj
Strouhalov broj		

Opšti izraz za proračun opterećenja vetrom građevinskih konstrukcija dat je u obliku (prošireni izraz VII-2):

$$w = \frac{1}{2} \rho (v_{m,50,10} k_t k_T)^2 10^{-3} \cdot S_z^2 \cdot K_z^2 \cdot G_z \cdot C \cdot A \quad [kN] \quad \text{VII-3}$$

gde je:

ρ gustina vazduha [kg/m^3],

$v_{m,T,10}$ osnovna brzina vetra osrednjena (indeks **m**) u 1h-intervalu, koja može biti prekoračena jednom u **T** godina (indeks **T** dobijen je iz anemografskih zapisa pri visini instrumenta od 10m (indeks **10**) iznad posmatranog terena) merena na izloženom mestu tokom najmanje 15 godina, na terenu koji odgovara klasi hrapavosti **B**. U niškoj kotlini [20], [109], [110] izmerena srednja brzina vetra iznosi 24,4 m/s.

k_t faktor vremenskog intervala osrednjavanja; za $t=1h$ $k_t=1$

k_T faktor povratnog perioda; za $T=50god.$ $k_T=1$

S_z faktor topografije terena; $S_z=1$ na ravnom terenu

K_z faktor ekspozicije zavisan od hrapavosti terena. Klase hrapavosti su **A**-velike vodene površine, **B**-otvoreni ravni tereni, **C**-šumoviti predeli, ind. zone, gradovi.

G_z dinamički koeficijent koji je različit za (a) delove obloga (fasada), kad je reč o lokalnom dejstvu vetra, i (b) konstrukciju u celini, kad govorimo o ukupnom dejstvu vetra. Ukupno dejstvo vetra različito je za krute konstrukcije -one koje dejstvo vetra ne može pobuditi na veće oscilacije, i vitke konstrukcije koje osim oscilovanja u pravcu vetra mogu oscilovati i u upravnom pravcu zbog odvajanja vrtloga, ili čak i torziona pa ih tako treba i ispitati i dimenzionisati odgovarajućim ekvivalentnim opterećenjima. U ovom delu neophodno je izvršiti dinamičku analizu, tj. odrediti frekvenciju slobodnih oscilacija u 1.-om tonu (JUS U.C7.111).

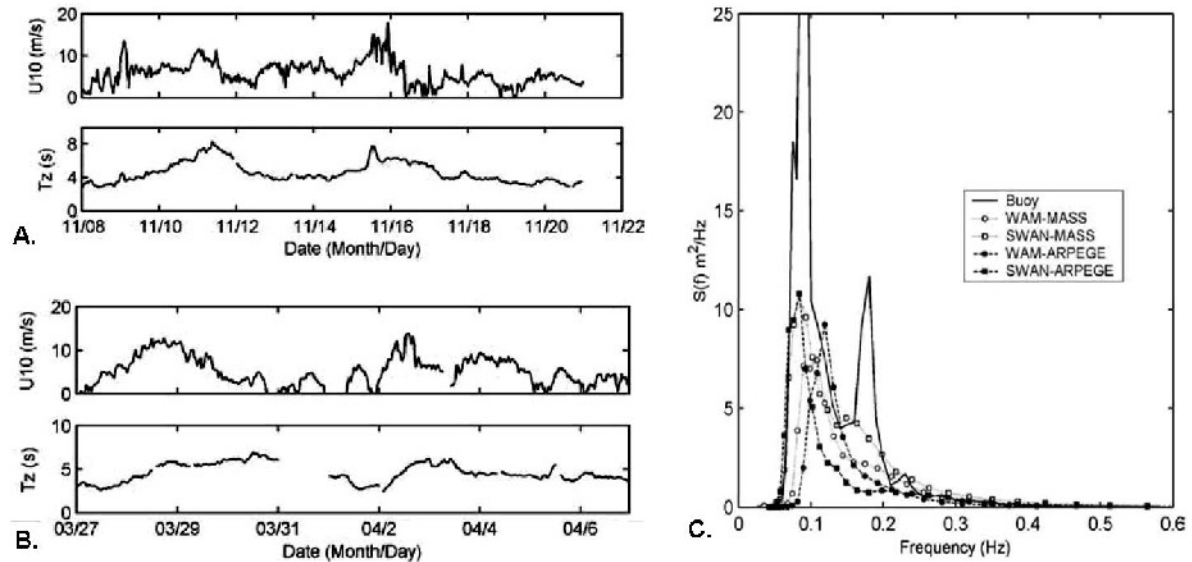
C koeficijent pritiska za različite oblike krovova (JUS U.C7.112)

Primenom izraza VII-3 za opterećenje vetrom realno je očekivati da će intenzitet, pravac i smer delovanja sila u svakoj pojedinačnoj tački razmatranog visećeg krova, s obzirom na njegovu zakrivljenost, biti različit. Medjutim, ovi propisi ostali su nedorečeni u smislu definisanja koeficijenta pritiska **C** za zakrivljene sedlaste krovne oblike. Ispitivanja na modelima u aerodinamičkim tunelima i hidrauličkim-vodenim kanalima [15], [30], [36] i [90] pokazala su da je realna raspodela opterećenja od vetra na krovu konkavno-cilindričnog oblika data na *Sl.III-6* [93]. Koeficijent oblika $C=1,6$ do $1,9$ direktno je proporcionalan stinjenosti površi $f/L=0,05$ do $0,1$.

Prema JUS U.C7.110 i 111, model objekta opisan u Uvodu ovog poglavlja, znajući da je perioda svojstvenih oscilacija u I tonu između $0,5\text{sec.}$ i 1sec. , može se razvrstati u "velike krute konstrukcije" koje nisu podložne rezonantnom efektu. Primenom jednačine VII-3 i koeficijenata pritiska sa *Sl.III-6*, najveće "sisajuće" dejstvo vetra na konstrukciju biće $w = -0,80\text{ kN/m}^2$, dok će pritiskajuće dejstvo vetra biti $w = 0,17\text{ kN/m}^2$.

Sile vetra mogu da izazovu dinamičku pobudu konstrukcije. Usled aerodinamičkih sila može doći do oscilacija u jednoj od svojstvenih frekvencija konstrukcije, tj. do galopirajuće pobude i rezonantnih efekata ukoliko se frekvencija harmonijske sila pobude približi svojstvenim frekvencijama konstrukcije.

Propisi o dejstvu vetra na konstrukcije u primeni u Velikoj Britaniji, SAD, Kanadi i Australiji [87] definišu proveru odgovora konstrukcije na turbulentne udare vetra. Udari vetra definisani su za obloge fasada, podove i krovne pokrivače na trajanje od 3 sekunde, za zgrade čija je čeona dimenzija manja od 50m na trajanje od 5 sekundi i za zgrade čija je čeona dimenzija veća od 50m na trajanje 15 sekundi.

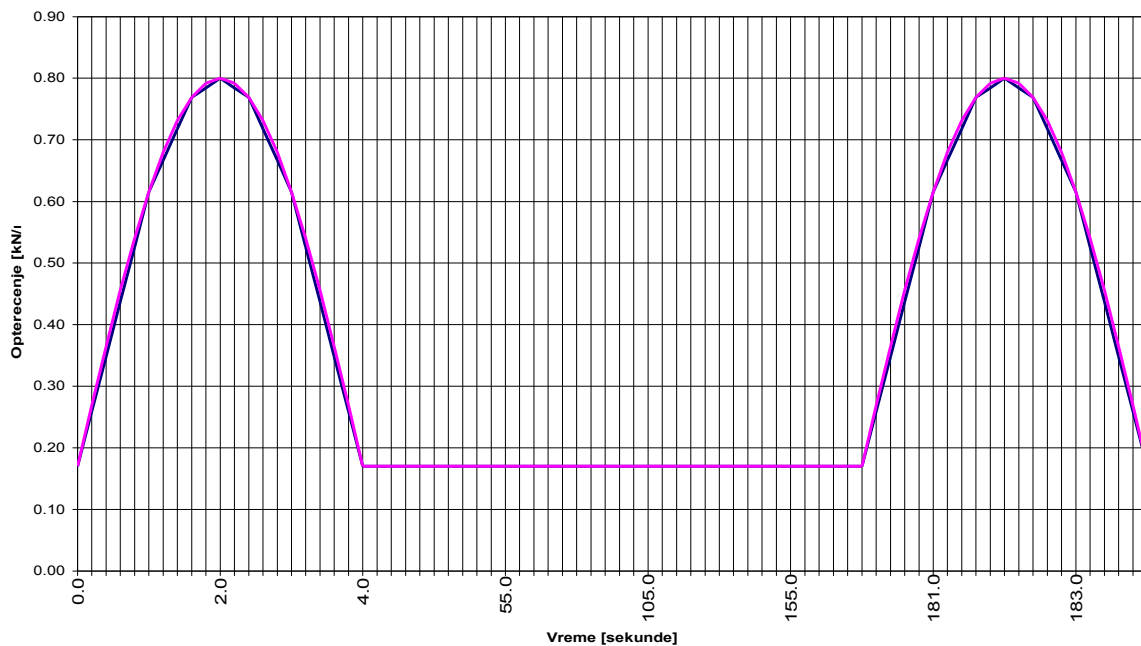


SLIKA VII-4 Harmonijska pobuda vetra za područje delte reke Ebro u Španiji (meteorološki zapisi iz novembra 2001. i marta, aprila 2002.)

Analiza uticaja turbulentnih udara vetra na elastične konstrukcije, kakve su kablovske rešetke, nisu definisane, već se preporučuje njihova dinamička analiza i superpozicija svojstvenih frekvencija sa frekvencijama pobude od harmonijskog dejstva vetra. Spektar harmonijske pobude dat je na *sl.VII-4.c*, sa koje se vidi da je moguć frekventni opseg harmonijske pobude vetrom od 0Hz do $0,4\text{Hz}$, odnosno da je perioda harmonijskih promena intenziteta vetra u opsegu $T_z=2,5$ do 10 sekundi za brzine vetra

$U_{10}=0$ m/s do 20 m/s ²⁴. Verifikacioni primer ²⁵ analize ponašanja mosta preko Takoma tesnaca u SAD, država Vašington, takodje je usvojio harmonijske pobude vetra za frekventni opseg od 0Hz do 0.4Hz. Poznato je da se ovaj viseći most srušio zbog rezonantnih pojava, usled srednje jakog vetra brzine oko 70 km/h (oko 20 m/s).

Dijagram udarnog dejstva vetra za 10-to minutne osrednjene brzine vetra, preporučio je prof.Šljah [88] za područje primene sa dominantnim vetrom tipa Košava koji je dat na sl.VII-5. Vremenski promenljivo opterećenje udarnih talasa vetra q_d predstavljeno je sinusnom krivom, dok je stalni uticaj vetra osrednjenom brzinom q_s prestavljen horizontalom. Uprošćenje sinusne raspodele dinamičkog opterećenja izvršeno je linearnom aproksimacijom.



SLIKA VII-5 Dinamički efekat Košave za 10-to minutne osrednjene brzine vetra po prof.Šljahu [88]

Da bi se vremenski zavisna funkcija koja predstavlja opterećenje od vetra, primenila u tranzijent dinamičkoj analizi, potrebno je da se na pogodan način opterećenje podeli na nekoliko linearnih segmenata, kao što je prikazano na slici VII-5 i Tabeli VII-5.

TABELA VII-5 Linearna aproksimacija dinamičkih udara vetra

Vreme t [sec.]	Opterećenje w [kN/m ²]	Vreme t [sec.]	Opterećenje w [kN/m ²]
0.0	0.17000	180.0	0.17000
1.0	0.61548	181.0	0.61548
1.6	0.76917	181.6	0.76917
2.0	0.80000	182.0	0.80000
2.4	0.76917	182.4	0.76917
3.0	0.61548	183.0	0.61548
4.0	0.17000	184.0	0.17000

²⁴ WWW.ScienceDirect.com/Journal of Marine Systems/Evaluation of Two Atmospheric Models for Wind-Wave Modelling in the NW Mediterranean, authors: Bolanos-Sanches, Sanchez-Arcilla, Cateura

²⁵ AnSys Dynamics – Chapter 9: Analysis using prestress

Površine popreč. preseka noseći/ ispuna /stabilizujući mm ²	953	1105	1219	1399	953	1105	1219	1399
	400	400	400	400	400	400	400	400
	555	555	555	555	555	555	555	555
Usvojena užad noseći/ ispuna /stabilizujući Φ [mm]	Φ 38	Φ 40	Φ 42	Φ 45	Φ 38	Φ 40	Φ 42	Φ 45
	Φ 25	Φ 25	Φ 25	Φ 25	Φ 25	Φ 25	Φ 25	Φ 25
	Φ 29	Φ 29	Φ 29	Φ 29	Φ 29	Φ 29	Φ 29	Φ 29

VII-7 Faze opterećenja kablovske rešetke

Usvojeni modeli kablovskih rešetki analizirani su za faze opterećenja kroz koje prolazi sistem krovnih nosača i mogu se definisati kao statički uticaji i kao dinamički uticaji. Podrazumeva se da je kablovska rešetka iz nultog stanja, unošenjem sile prednaprezanja, zauzela svoj referentni položaj u prostoru, te da poseduje određeni stepen krutosti. Na tako pripremljenu konstrukciju nanosi se opterećenje.

VII-7.1 Statička opterećenja

Prema do sada analiziranim spoljašnjim uticajima (u odeljcima VII-2, VII-4 i VII-5), na prethodno napregnutu konstrukciju u tzv. „referentnom“ položaju, nanosi se spoljašnje statičko opterećenje, koje zbog nelinearnosti odgovora konstrukcije mora biti nanešeno kao zbirni vektor u slobodnim čvorovima nosećeg užeta:

- (1) Sopstvena težina krova i konstrukcije: **g**,
- (2) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sneg: **g+s**
- (3) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g+s-w**
- (4) Sopstvena težina krova i konstrukcije i sisajuće dejstvo vetra na celoj površini krova: **g-w**
- (5) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i dejstvo vetra prema *Sl.III-5* i *Sl.VII-6.B* (sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova): **g+s+“w“**
- (6) Sopstvena težina krova i konstrukcije i dejstvo vetra prema *Sl.III-5* i *Sl.VII-6.B* (sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova): **g+“w“**

VII-7.2 Dinamička opterećenja

Faze opterećenja kroz koje prolaze usvojeni modeli tip „D“ i tip „V“, mogu se analizirati i sa aspekta vremenski zavisnih opterećenja. U odeljku VII-5 već je naglašeno da se fenomen vetra može tretirati kao dinamičko opterećenje promenljivo u realnom vremenu ili udarno (mahovito) dejstvo vetra za osrednjene 10-to minutne brzine vetra.

Vremenski zavisna funkcija dinamičkog dejstva vetra u realnom vremenu je harmonijska pobuda frekvencije 0Hz do 0.4Hz.

Turbulentno, tj. udarno-mahovito dejstvo vetra dato je na *Sl.VII-5* sa linearnom aproksimacijom prikazanom u Tabeli VII-5.

Nelinearnost odgovora konstrukcije zahteva aplikaciju statičkog i vremenski promenljivog opterećenja istovremeno. Analiza ponašanja, tj. odgovora konstrukcije

mora se sprovesti za sve vreme dejstva dinamičkog opterećenja, što u ovom slučaju iznosi 185 sekundi.

Dejstvo vetra, prema Sl.III-5 i Sl.VII-6.B, svoj najveći uticaj dodeljuje nosaču na rastojanju od oko 0.2l od oslonačkog čvora, dok na ostalim delovima konstrukcije deluje skoro konstantno. U skladu sa tim, vremenski zavisno opterećenje deluje „sisanjem“ na čvor 5 kod modela tipa „D“, odnosno na čvor 6 kod modela tipa „V“. Intenzitet vremenski promenljivog vektora je od -0.17kN/m^2 do -0.80kN/m^2 .

Dinamička opterećenja koja deluju na usvojene modele su:

- (7) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i dinamičko harmonijsko dejstvo vetra prema Sl.III-5 i Sl.VII-4.c (konstantno statičko sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova od $\pm 0.17\text{kN/m}^2$ kao i hamonijska sila pobude koja deluje u čvoru 5 (tip „D“) odnosno čvoru 6 (tip „V“) i svoj intenzitet menja po sinusnoj raspodeli od -0.17kN/m^2 do -0.80kN/m^2 i to u intervalima 2.5 do 10 sekundi: **$g+s+w_{hd}$**
- (8) Sopstvena težina krova i konstrukcije i dinamičko harmonijsko dejstvo vetra prema Sl.III-5 i Sl.VII-4.c (konstantno statičko sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova od $\pm 0.17\text{kN/m}^2$ kao i hamonijska sila pobude koja deluje u čvoru 5 (tip „D“), odnosno čvoru 6 (tip „V“) i svoj intenzitet menja po sinusnoj raspodeli od -0.17kN/m^2 do -0.80kN/m^2 i to u intervalima 2.5 do 10 sekundi: **$g+s+w_{hd}$**
- (9) Sopstvena težina krova i konstrukcije, sneg i dinamičko udarno dejstvo vetra prema Sl.III-5 i Sl.VII-5 (konstantno statičko sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova od $\pm 0.17\text{kN/m}^2$ kao i udarna sila pobude koja deluje u čvoru 5 (tip „D“), odnosno čvoru 6 (tip „V“) i svoj intenzitet menja po polusinusnoj raspodeli od -0.17kN/m^2 do -0.80kN/m^2 i to za period vremena od 0 do 185 sekundi prema tabeli VII-5: **$g+s+w_d$**
- (10) Sopstvena težina krova i konstrukcije i dinamičko udarno dejstvo vetra prema Sl.III-5 i Sl.VII-5 (konstantno statičko sisajuće dejstvo vetra na delu površine krova i pritiskajuće dejstvo vetra na delu površine krova od $\pm 0.17\text{kN/m}^2$ kao i udarna sila pobude koja deluje u čvoru 5 (tip „D“), odnosno čvoru 6 (tip „V“) i svoj intenzitet menja po polusinusnoj raspodeli od -0.17kN/m^2 do -0.80kN/m^2 i to za period vremena od 0 do 185 sekundi prema tabeli VII-5: **$g+s+w_d$**

VII-8 Preostala sila iz prednaprežućih kablova – „sila kontakta“

Najbitniji problem visećih krovnih konstrukcija je **postizanje stabilne krovne površi**. Stabilnost krova postiže se povećanjem sila prednaprezanja, tj. stepen zategnutosti cele konstrukcije podiže se na meru koja garantuje ugibe i pomeranja u dozvoljenim granicama usled dejstva najnepovoljnijih spoljašnjih opterećenja.

Preporuke za utvrdjivanje nivoa prednaprezanja u funkciji stabilnosti visećih krovova, prezentirane su u odeljku III-4. Imajući u vidu radove Pavlovskog [93], [99], Žaverta [46], [84] i Balgača [5]-[10], intenzitet zatežuće sile prethodnog naprezanja može se definisati kao **dodatno spoljašnje opterećenje** na noseće kablove, uz uslov da štapovi prednaprežućeg kabla usled najvećeg gravitacionog opterećenja (2), (5), (7) ili (9), kao i ostalim fazama opterećenja ne smeju biti opušteni (nenapregnuti). S obzirom da vetar podiže konstrukciju, kod ultra lakih i vrlo lakih krovnih pokrivača, realno je očekivati da se kritična faza opterećenja javi usled uticaja sopstvene težine i sisajućeg dejstva vetra, tj. faze (4), (6), (8) ili (10), kada bi se javilo opuštanje nosećeg užeta.

TABELA VII-7 “Sila kontakta” visećih krovova, prema Pavlovskom

Stalni teret i sneg (1.0) $g+s$ kN/m^2		Potrebno opterećenje za prednaprezanje v_p u % od $g+s$		Potrebno opterećenje za prednaprezanje v_p u kN/m^2	
g	g+s	min	max	min	max
0.15	1.15	7%	15%	0.08	0.17
0.30	1.30	7%	15%	0.09	0.20
0.50	1.50	7%	15%	0.16	0.22
0.75	1.75	5%	10%	0.09	0.18

Tabela VII-6 sastavljena je na osnovu radova [93] i [99]. Takođe, tvorac kablovskih rešetki D.Žavert u radovima [46] i [84] pri analizi periode oscilovanja, preporučuje uvođenje dodatnog opterećenja (v) na noseće kablove, tako da odnos dodatnog opterećenja (v) i ukupnog gravitacionog opterećenja (q) iznosi $v/q \leq 0,6$.

Profesor Edmund Balgač za prethodno napregnute mreže podrazumeva uvođenje dodatnog opterećenja na noseće kablove [5]-[10], dejstvo vetra je pritiskajuće, a dodatno opterećenje (v) treba da ima intenzitet od $0,15 \text{ kN/m}^2$ do $0,20 \text{ kN/m}^2$.

TABELA VII-8 Maksimalne “sile kontakta” za usvojene modele

Stalni teret i sneg $g+s+w$ kN/m^2			Pavlovski v_p u odnosu na: $[\text{kN/m}^2]$		Žavert v_p u odnosu na: $[\text{kN/m}^2]$		Balgač v_p u odnosu na: $[\text{kN/m}^2]$		Predlog dodatnog opterećenja $v_{p,max}$	
g	g+s	g+s+w	g+s	g+s+w	g+s	g+s+w	g+s	g+s+w	$[\text{kN/m}^2]$	% od $g+s+w$
0.15	1.15	0.81	0.17	0.32	-	0.49	-	0.10	0.70	60%
0.30	1.30	0.96	0.20	0.38	-	0.58	-	0.12	0.50	52%
0.50	1.50	1.16	0.22	0.17	-	0.70	-	0.14	0.30	26%
0.75	1.75	1.41	0.18	0.21	-	0.85	-	0.17	0.20	14%

Na osnovu do sada prezentiranih elemenata **nivoi prednaprezanja** biće utvrđeni prema predloženim dodatnim opterećenjima, vodeći računa da kriterijumi stabilnosti budu ispunjeni. Nivoi prednaprezanja, koji će biti primenjeni na usvojenim modelima su $v_p=0.05 \text{ kN/m}^2$, $v_p=0.10 \text{ kN/m}^2$, $v_p=0.15 \text{ kN/m}^2$, $v_p=0.20 \text{ kN/m}^2$, a zavisno od odgovora konstrukcije na zadata opterećenja do maksimalnih vrednosti iz Tabele VII-8.

VII-9 Kontrola ravnoteže usvojenih modela kablovskih rešetki u referentnom položaju metodom konačnih pomeranja

Za gore definisane modele prethodno napregnutih kablovskih rešetki izvršena je **provera ravnoteže u referentnom položaju** (faza potpunog prethodnog naprezanja) za nivo prednaprezanja $v_p=0.05 \text{ kN/m}^2$ do $v_p=0.20 \text{ kN/m}^2$. Pri tome na sistem ne deluje spoljašnje opterećenje. Parametri referentnog položaja: koordinate čvorova i sile u

štapovima dobijeni su primenom programa CABL-T, po metodi prof. Balgača koja je prilagodjena za kablovske rešetke i programski prilagodjena za računarsku primenu. Programom CABL-TP formirana je ulazna datoteka za metod konačnih pomeranja, tj. definisana konfiguracija sistema: numeracija čvorova, povezivanje štapova, opterećenje i temperaturna promena u štapovima, a za preuzete podatke iz programa CABL-T.

Podaci dobijeni programom CABL-T predstavljaju ravnotežno stanje konstrukcije u referentnom položaju dobijeni analitičkim postupkom prof. Balgača. Metodom konačnih pomeranja, tj. programom CABL-N, kontrolisana je ravnoteža sistema, prema blok šemi prikazanoj na slici V-8. Zbog preglednosti rezultata prikazana su samo odstupanja rezultata CABL-T / CABL-N. Odstupanja su dobijena upoređivanjem maksimalnih vrednosti pomeranja srednjih čvorova (Tabela VII-9) i sila u pojasnim štapovima (Tabela VII-10). U sistemu ne postoje nenapregnuti (labavi) stapovi u referentnom položaju.

TABELA VII-9

Maksimalna korekcija pomeranja slobodnih čvorova sistema u referentnom položaju - čvor u sredini raspona modela tip „D“ i tip „V“ za definisane nivoe prednaprezanja

Nivo v_p [kN/m ²]	Ultra laki pokrivači g=0.15 kN/m ²		Vrlo laki pokrivači g=0.30 kN/m ²		Laki pokrivači g=0.50kN/m ²		Srednje teški pokrivi. g=0.75 kN/m ²	
	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“
0.05	0.3 ‰	0.5 ‰	0.0 ‰	0.7 ‰	0.3 ‰	0.9 ‰	0.6 ‰	1.0 ‰
0.10	0.6 ‰	0.6 ‰	0.2 ‰	0.8 ‰	0.3 ‰	1.0 ‰	0.7 ‰	1.2 ‰
0.15	0.4 ‰	0.7 ‰	0.6 ‰	0.9 ‰	0.3 ‰	1.1 ‰	0.7 ‰	1.3 ‰
0.20	0.5 ‰	0.8 ‰	0.6 ‰	1.0 ‰	0.3 ‰	1.2 ‰	0.7 ‰	1.5 ‰

TABELA VII-10

Maksimalna korekcija sila u pojasnim štapovima modela tip „D“ i tip „V“ u referentnom položaju za definisane nivoe prednaprezanja

Nivo v_p [kN/m ²]	Ultra laki pokrivači g=0.15 kN/m ²		Vrlo laki pokrivači g=0.30 kN/m ²		Laki pokrivači g=0.50kN/m ²		Srednje teški pokrivi. g=0.75 kN/m ²		
	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“	Tip „D“	Tip „V“	
Gornji-noseći	0.05	6.1 %	1.3 %	5.9 %	1.8 %	5.5 %	2.5 %	5.0 %	3.3 %
	0.10	7.6 %	1.4 %	5.6 %	1.9 %	5.3 %	2.6 %	4.8 %	3.4 %
	0.15	5.6 %	1.5 %	5.4 %	2.1 %	5.1 %	2.7 %	4.6 %	3.6 %
	0.20	5.5 %	1.6 %	5.2 %	2.2 %	4.9 %	2.9 %	4.5 %	3.7 %
Donji-stabiliz	0.05	3.0 %	0.9 %	2.8 %	1.1 %	2.6 %	1.3 %	2.4 %	1.4 %
	0.10	3.2 %	0.9 %	2.7 %	1.1 %	2.5 %	1.3 %	2.3 %	1.5 %
	0.15	2.8 %	1.0 %	2.6 %	1.1 %	2.5 %	1.3 %	2.3 %	1.5 %
	0.20	2.7 %	1.0 %	2.6 %	1.2 %	2.4 %	1.3 %	2.2 %	1.5 %

Analiza rezultata

Opravdanost primene predložene metode, za pribavljanje početnih parametara za konačan proračun prethodno napregnutih modela kablovskih rešetki po MKP, očigledna je.

Korekcije geometrije tačaka sistema, a takodje i sila u štapovima neznatne su. Maksimalne korekcije geometrije su manje od 1cm. Veće korekcije javljaju se kod

modela tipa "V", što je razumljivo jer pripada tzv. *pokretnom* tipu. Maksimalne korekcije sila u štapovima nosećeg kabla su: 7.6% kod tipa "D" i 5.9% kod tipa "V". Veće korekcije sila kod modela tipa "D" su razumljive, jer se veća energija utroši na uspostavljanje ravnoteže zbog *nepomerljivosti* čvorova ovakve konfiguracije.

Pretpostavljeni podaci su vrlo bliski ravnotežnom stanju, jer se konačni ravnotežni položaj dobija kroz tri iteracije programom CABL-N za model tip "D", a kroz dve iteracije za model tipa "V".

VII-10 Proračun modela za utvrdjena opterećenja

VII-10.1 Statički proračun

Svaki od analiziranih modela: Tip „D“ i Tip „V“, prvobitno je prethodno napregnut - sračunati početni parametri po analitičkoj metodi profesora Balgača (predprocesor „CABL-TP“ i programski modul „CABL-T“). Programski modul „CABL-N“, izvršio je korekciju ravnotežnih parametara za referentni položaj (faza potpunog prednaprezanja) za svaki od predviđenih nivoa prednaprezanja. Opterećenja deluju na uravnoteženu prethodno napregnutu konstrukciju kablovskih rešetki.

Statička opterećenja, koja deluju na modele, definisana su u odeljku VII-7.1 tako da sama konstrukcija prolazi kroz faze opterećenja koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju.

Analiza uticaja spoljašnjeg opterećenja na modele („D“ i „V“) za predviđene nivoe prednaprezanja sagledava se tabeli VII-11.

TABELA VII-10

Faze opterećenja koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju

Nivo prednaprezanja	Faze statičkog opterećenja modela Tip „D“	Faze statičkog opterećenja modela Tip „V“
$V_p = 0.05 \text{ kN/m}^2$	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6
$V_p = 0.10 \text{ kN/m}^2$	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6
$V_p = 0.15 \text{ kN/m}^2$	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6
$V_p = 0.20 \text{ kN/m}^2$	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6

Svaki model proračunat je za četiri nivoe prednaprezanja, a svaki nivo prednaprezanja opterećen je sa šest statičkih opterećenja. Statičkom analizom obuhvaćeno je ukupno 8 ravnotežnih proračuna programima CABL-TP i CABL-T, dok je programom CABL-N analizirano 48 faza opterećenja koje deluju na modele „D“ i „V“ u skladu sa blok šemom prikazanoj na slici V-8.

Maksimalna dozvoljena sila ($S_{dozv.}$) u analiziranim modelima za zadati nivo prednaprezanja predstavlja maksimalnu efektivnu silu multiplikovanu odgovarajućom konstantom, koja zavisi od kombinacije opterećenja i ne sme biti veća od minimalne prekidne sile ($S_{kidanja}$) propisane katalogom proizvođača za usvojeni poprečni presek kabla (odeljak III-3.1: *Granična stanja nosivosti-sile u kablovima*).

Pomeranja modela, usled dejstva opterećenja, prezentirana su u odnosu na „projektovani“ položaj konstrukcije, tj. u odnosu na konstrukciju pod dejstvom sopstvene težine i za čvor u sredini raspona (čvor 10 za model tipa „D“, tj. čvor 14 za model tipa „V“).

TABELA VII-12 Statički parametri od uticaja na stabilnost modela tipa „D“ (sile u nosećim i prednaprežućim kablovima i pomeranja)

		Noseći kabl [kN]				Prednaprežućí kabl [kN]				Pomeranje čvora 10 [m]			
		v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20	v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20	v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20
g=0.15 kN/m ²	S0	218.40	247.40	266.60	290.70	211.30	239.70	258.00	281.30				
	S1 (g)	257.71	286.41	305.14	328.89	187.03	215.65	234.00	257.46				
	S2 (s)	567.49	595.04	610.97	631.23	63.32	99.69	120.25	146.49	-0.244	-0.259	-0.259	-0.259
	S3 (g+s-w)	459.63	484.57	500.84	521.56	112.53	144.25	164.45	190.86	-0.177	-0.179	-0.180	-0.180
	S4 (g-w)	191.05	221.87	241.56	267.66	243.32	271.40	289.48	312.57	0.137	0.131	0.128	0.124
	S5 (g+s-"w")	578.43	616.48	630.86	650.52	77.64	123.03	138.61	160.80	-0.291	-0.300	-0.297	-0.295
	S6 (g-"w")	296.55	323.28	341.06	363.94	237.25	262.84	279.63	301.72	-0.053	-0.044	-0.040	-0.036
	S dozv.	1249	1309	1344	1389	487	543	579	603				
	S kidanja	1421				827							
	max.sila	578.425	616.476	630.856	650.520	243.316	271.399	289.479	312.573				
min.sila	165.85	199.18	213.49	237.25	31.79	86.47	99.98	99.98					
g=0.30 kN/m ²	S0	224.90	249.00	273.20	297.40	217.30	240.70	264.10	287.50				
	S1 (g)	307.83	306.26	354.62	378.07	181.79	205.00	227.48	250.44				
	S2 (s)	637.08	660.29	680.30	700.35	66.51	97.07	123.12	149.14	-0.202	-0.217	-0.219	-0.220
	S3 (g+s-w)	525.56	545.88	566.29	586.75	110.76	136.65	162.32	188.50	-0.142	-0.145	-0.147	-0.149
	S4 (g-w)	221.72	245.72	271.21	295.93	223.49	246.85	270.22	293.55	0.123	0.119	0.116	0.113
	S5 (g+s-"w")	641.48	678.22	696.36	716.73	73.51	117.72	137.50	161.14	-0.243	-0.256	-0.253	-0.254
	S6 (g-"w")	350.10	370.76	392.08	414.54	223.84	244.33	265.61	288.69	-0.035	-0.033	-0.032	-0.032
	S dozv.	1402	1453	1497	1541	448	489	531	577				
	S kidanja	1649				827							
	max.sila	641.48	678.22	696.36	716.73	223.49	246.85	270.22	293.55				
min.sila	205.35	238.23	253.33	274.72	30.10	79.62	98.18	121.59					
g=0.50 kN/ m ²	S0	246.50	266.00	290.30	314.40	246.50	256.90	280.30	303.60				
	S1 (g)	387.09	408.86	430.70	453.10	185.15	209.77	234.34	258.12				
	S2 (s)	729.26	748.89	772.21	792.03	72.81	98.66	129.34	155.20	-0.177	-0.172	-0.187	-0.188
	S3 (g+s-w)	616.04	636.17	656.37	676.56	113.69	139.51	165.34	190.84	-0.121	-0.120	-0.120	-0.121
	S4 (g-w)	286.94	310.78	334.63	358.42	210.80	234.13	257.48	280.88	0.101	0.102	0.103	0.102
	S5 (g+s-"w")	718.79	760.66	779.27	799.55	62.38	113.18	133.94	157.87	-0.209	-0.220	-0.217	-0.218
	S6 (g-"w")	431.55	451.44	472.91	494.46	215.80	236.11	259.00	281.86	-0.020	-0.017	0.138	-0.017
	S dozv.	1604	1648	1699	1742	493	514	561	605				
	S kidanja	1818				827							
	max.sila	729.26	748.89	772.21	792.03	246.50	256.90	280.30	303.60				
min.sila	265.364	287.488	309.657	331.794	21.148	87.336	107.432	131.867					
g=0.75 kN/ m ²	S0	261.70	286.50	304.90	329.10	247.30	270.80	294.10	317.50				
	S1 (g)	492.79	513.37	533.92	555.00	180.91	206.46	231.92	256.75				
	S2 (s)	844.06	863.51	886.60	906.20	79.19	104.87	135.36	160.92	-0.162	-0.158	-0.172	-0.171
	S3 (g+s-w)	728.34	748.24	768.10	788.03	115.92	141.60	167.16	192.74	-0.113	-0.112	-0.111	-0.111
	S4 (g-w)	377.27	400.54	423.76	447.02	207.80	230.34	254.02	276.18	0.061	0.065	0.067	0.069
	S5 (g+s-"w")	822.45	868.78	888.98	908.25	56.98	113.87	138.15	163.95	-0.191	-0.203	-0.203	-0.201
	S6 (g-"w")	532.51	552.84	573.74	594.75	205.22	226.87	249.47	272.11	-0.022	-0.020	-0.020	-0.019
	S dozv.	1737	1900	1951	1994	495	542	588	635				
	S kidanja	2087				827							
	max.sila	844.06	868.78	888.98	908.25	247.30	270.80	294.10	317.50				
min.sila	339.460	360.481	381.536	402.666	23.603	90.840	116.922	138.879					

TABELA VII-13 *Statički parametri od uticaja na stabilnost modela tipa „V“ (sile u nosećim i prednaprežućim kablovima i pomeranja)*

		Noseći kabl [kN]				Prednaprežujući kabl [kN]				Pomeranje čvora 14 [m]			
		v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20	v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20	v=0,05	v=0,10	v=0,15	v=0,20
g=0.15 kN/m ²	S0	214.40	238.20	261.90	285.70	214.20	237.90	261.60	285.20				
	S1 (g)	257.92	281.44	305.01	328.56	189.07	212.90	236.67	260.44				
	S2 (s)	550.29	572.41	594.57	616.74	30.90	55.39	79.77	104.17	-0.254	-0.252	-0.251	-0.250
	S3 (g+s-w)	450.48	473.08	495.71	518.34	82.87	107.16	131.35	155.56	-0.169	-0.168	-0.167	-0.166
	S4 (g-w)	159.50	183.51	207.56	231.59	246.58	270.14	293.66	317.18	0.089	0.089	0.088	0.088
	S5 (g+s-"w")	533.90	536.16	604.03	625.63	45.01	45.19	128.40	152.21	-0.319	-0.299	-0.332	-0.325
	S6 (g-"w")	295.82	312.97	331.13	350.07	268.92	286.29	304.57	323.64	-0.127	-0.116	-0.106	-0.097
	S dozv.	1211	1259	1308	1357	497	540	587	647				
	S kidanja	1421				827				0.24			
	max.sila	550.29	572.41	604.03	625.63	268.92	286.29	304.57	323.64				
	min.sila	153.21	176.26	199.35	222.42	29.90	32.47	77.17	100.77				
g=0.30 kN/m ²	S0	220.20	244.00	267.80	291.60	220.00	243.70	267.40	291.10				
	S1 (g)	312.10	335.48	358.87	382.25	174.49	198.37	222.26	246.11				
	S2 (s)	619.09	641.14	663.20	685.27	32.43	56.81	81.18	105.51	-0.229	-0.228	-0.227	-0.226
	S3 (g+s-w)	514.63	537.12	559.64	582.14	79.12	103.35	127.57	151.75	-0.152	-0.152	-0.151	-0.150
	S4 (g-w)	208.01	231.86	255.72	279.56	226.14	249.82	273.51	297.16	0.080	0.080	0.080	0.079
	S5 (g+s-"w")	592.14	595.39	668.11	690.27	33.97	35.64	124.39	148.91	-0.283	-0.267	-0.300	-0.293
	S6 (g-"w")	345.74	363.24	381.62	400.73	249.50	267.42	286.21	305.72	-0.114	-0.105	-0.097	-0.090
	S dozv.	1362	1410	1459	1508	499	535	572	611				
	S kidanja	1649				827				0.24			
	max.sila	619.09	641.14	668.11	690.27	220.00	243.70	267.40	291.10				
	min.sila	199.43	222.30	245.18	268.05	26.49	27.68	78.55	102.09				
g=0.50 kN/ m ²	S0	236.40	260.30	284.10	307.60	236.10	259.80	283.50	306.90				
	S1 (g)	394.29	417.47	440.64	463.46	165.77	189.75	213.71	237.33				
	S2 (s)	709.61	731.52	753.44	775.03	35.22	59.60	83.95	107.97	-0.212	-0.211	-0.210	-0.209
	S3 (g+s-w)	602.51	624.84	647.18	669.18	78.16	102.42	126.65	150.53	-0.141	-0.140	-0.140	-0.139
	S4 (g-w)	286.96	310.58	334.20	357.44	213.19	237.01	260.80	284.25	0.074	0.074	0.074	0.074
	S5 (g+s-"w")	671.67	733.83	755.83	775.45	22.10	99.48	124.03	146.02	-0.254	-0.278	-0.273	-0.269
	S6 (g-"w")	419.57	437.91	456.98	476.33	231.70	250.78	270.56	290.65	-0.098	-0.091	-0.085	-0.079
	S dozv.	1561	1609	1658	1705	472	520	567	614				
	S kidanja	1818				827				0.24			
	max.sila	709.61	733.83	755.83	775.45	236.10	259.80	283.50	306.90				
	min.sila	226.60	249.50	272.30	294.80	18.43	57.72	81.32	104.53				
g=0.75 kN/ m ²	S0	250.20	274.10	297.80	321.50	249.70	273.40	297.05	320.60				
	S1 (g)	496.67	519.59	542.43	565.26	154.82	178.84	202.74	226.61				
	S2 (s)	823.09	844.85	866.53	888.22	38.48	62.79	86.98	111.14	-0.190	-0.189	-0.188	-0.188
	S3 (g+s-w)	712.43	734.57	756.64	778.71	76.80	101.02	125.12	149.19	-0.126	-0.126	-0.125	-0.125
	S4 (g-w)	385.09	408.42	431.67	454.91	196.99	220.88	244.66	268.41	0.067	0.067	0.066	0.066
	S5 (g+s-"w")	783.29	841.13	863.79	884.03	24.15	95.56	121.06	143.76	-0.231	-0.248	-0.244	-0.241
	S6 (g-"w")	513.43	532.55	552.15	572.22	211.30	231.47	252.10	273.18	-0.084	-0.078	-0.074	-0.069
	S dozv.	1811	1859	1906	1954	499	547	594	641				
	S kidanja	2087				827				0.24			
	max.sila	823.09	844.85	866.53	888.22	249.70	273.40	297.05	320.60				
	min.sila	239.80	262.70	285.50	308.20	20.24	60.84	84.27	107.67				

VII-10.2 Analiza odgovora modela za statička opterećenja

Stabilnost usvojenih modela usled dejstava statičkih opterećenja biće analizirana u odnosu na kriterijume stabilnosti, definisane u odeljku III-5. Ispunjenost postavljenih kriterijuma, u celosti ili delimično, daće delimičan odgovor na rešenje problema stabilnosti kablovskih rešetki.

TABELA VII-14 Ispunjenost kriterijuma stabilnosti

Tip modela Kategorije sopstvene težine, nivoi prednaprezanja		Noseće uže	Prednapr. uže	Pomeranja	Nenapregnuti štapovi		
Tip "D"		S dozv. < S kidanja		čvor 10	noseći *	prednapr. *	dijagon.
g=0.15	v=0.05	√	√	X	X (76%)	X (15%)	Neki
	v=0.10	√	√	X	X (80%)	X (40%)	Neki
	v=0.15	√	√	X	X (81%)	X (39%)	Neki
	v=0.20	√	√	X	X (82%)	X (36%)	Neki
g=0.30	v=0.05	√	√	X	X (91%)	X (14%)	Neki
	v=0.10	√	√	X	X (95%)	X (33%)	Neki
	v=0.15	√	√	X	X (93%)	X (37%)	Neki
	v=0.20	√	√	X	X (106%)	X (42%)	Neki
g=0.50	v=0.05	√	√	√	X (108%)	X (8.5%)	Neki
	v=0.10	√	√	√	X (108%)	X (34%)	Neki
	v=0.15	√	√	√	X (106%)	X (38%)	Neki
	v=0.20	√	√	√	X (106%)	X (43%)	Neki
g=0.75	v=0.05	√	√	√	X (130%)	X (10%)	Neki
	v=0.10	√	√	√	X (126%)	X (34%)	Neki
	v=0.15	√	√	√	X (125%)	X (40%)	Neki
	v=0.20	√	√	√	X (123%)	X (44%)	Neki
Tip "V"		S dozv. < S kidanja		čvor 14	noseći *	prednapr. *	vertikalni *
g=0.15	v=0.05	√	√	X	X (71%)	X (14%)	Neki
	v=0.10	√	√	X	X (74%)	X (14%)	Neki
	v=0.15	√	√	X	X (76%)	X (30%)	Neki
	v=0.20	√	√	X	X (78%)	X (35%)	X (35%)
g=0.30	v=0.05	√	√	X	X (91%)	X (12%)	Neki
	v=0.10	√	√	X	X (91%)	X (11%)	Neki
	v=0.15	√	√	X	X (92%)	X (29%)	Neki
	v=0.20	√	√	X	X (92%)	X (35%)	X (34%)
g=0.50	v=0.05	√	√	X	X (96%)	X (8%)	Neki
	v=0.10	√	√	X	X (96%)	X (22%)	Neki
	v=0.15	√	√	X	X (96%)	X (29%)	X (28%)
	v=0.20	√	√	X	X (96%)	X (34%)	X (33%)
g=0.75	v=0.05	√	√	√	X (96%)	X (8%)	Neki
	v=0.10	√	√	√	X (96%)	X (22%)	Neki
	v=0.15	√	√	√	X (96%)	X (28%)	X (27%)
	v=0.20	√	√	√	X (96%)	X (34%)	X (32%)

X – nije ispunjen, √ -- ispunjen

* X - sile zatezanja postoje u štapovima, tj. nema pritisnutih, nenapregnutih štapova. U zagradi je odnos učešća minimalne sile u štapovima nosećeg, tj. prednaprežućeg kabla, odnosno štapova ispune, u odnosu na stanje prednaprezanja

Analiza rezultata u pogledu ispunjenosti kriterijuma stabilnosti, prezentiranih u odeljku III-5, pokazuje razlike u ponašanju modela "D" i "V" usled statičkog opterećenja.

Model "D", usled dejstva usvojenih kategorija sopstvene težine krova (odeljak VII-2), za četiri različita nivoa prednaprezanja (odeljak VII-8), predstavlja konstrukciju kablovske rešetke koja ispunjava uslove u pogledu:

- maksimalnih sila u kablovskim elementima ($S_{dozv.} < S_{kidanja}$),

- nema nenapregnutih pojasnih štapova, tj. i noseća (76% do 123%) i prednaprežuća (8.5% do 44%) užad su zategnuta minimalnim silama u odnosu na silu prednaprezanja u referentnom položaju (faza prednaprezanja),
- pomeranja u odnosu na projektovani položaj (faza opterećenja 1 – odeljak VII-7.1), ali samo za kategoriju opterećenja “lakih” i “srednje teških” krovova, tj. za veće preseke nosećih kablova, koji imaju veću nosivost pa samim tim utiču i na smanjenje pomeranja).

Model “D” ne ispunjava uslove u pogledu:

- pomeranja u odnosu na projektovani položaj za kategoriju opterećenja “ultra lakih” i “vrlo lakih” krovova, ali se taj problem može vrlo jednostavno rešiti povećanjem preseka nosećih kablova,
- dijagonalni štapovi su opušteni u manjoj ili većoj meri u zavisnosti od nivoa prednaprezanja i faze opterećenja. Evidentirano je da se veći broj opuštenih štapova javlja za nivo prednaprezanja $v=0.05kN/m^2$, tj. minimalne sile u prednaprežućem užetu su do 15% u odnosu na sile u fazi prednaprezanja.

Model “V” usled dejstva usvojenih kategorija sopstvene težine krova (odeljak VII-2), za četiri različita nivoa prednaprezanja (odeljak VII-8), predstavlja konstrukciju kablovske rešetke koja ispunjava uslove u pogledu:

- maksimalnih sila u kablovskim elementima ($S_{dozv.} < S_{kidanja}$),
- nema nenapregnutih pojasnih štapova, tj. i noseća (71% do 96%) i prednaprežuća (8% do 35%) užad su zategnuta minimalnim silama u odnosu na silu prednaprezanja u referentnom položaju (faza prednaprezanja),
- pomeranja u odnosu na projektovani položaj (faza opterećenja 1 – odeljak VII-7.1), ali samo za kategoriju opterećenja “srednje teških” krovova, tj. za veće preseke nosećih kablova, koji imaju veću nosivost pa samim tim utiču i na smanjenje pomeranja.

Model “V” ne ispunjava uslove u pogledu:

- pomeranja u odnosu na projektovani položaj za kategoriju opterećenja “ultra lakih”, “vrlo lakih” i “lakih” krovova, ali se taj problem može vrlo jednostavno rešiti povećanjem preseka nosećih kablova,
- vertikalni štapovi su opušteni u manjoj meri u zavisnosti od nivoa prednaprezanja i faze opterećenja. Evidentirano je da se opušteni štapovi javljaju za nivoa prednaprezanja $v=0.05kN/m^2$, $0.10kN/m^2$ i $0.15kN/m^2$, i to kada su minimalne sile u prednaprežućem užetu do 30% u odnosu na sile u fazi prednaprezanja.

Razlike, koje se uočavaju paralelnom analizom odgovarajućih elemenata, pokazuju da su:

- apsolutna pomeranja u odnosu na referentni položaj modela “V” neznatno su manja od apsolutnih pomeranja modela “D”,
- sile u štapovima nosećeg kabla (Tabele VII-12 i VII-13) skoro su identične za oba modela (neznatno su veće kod modela “D” u odnosu na model “V”),

- sile u štapovima prednaprežućeg kabla (Tabele VII-12 i VII-13) skoro su identične za oba modela (neznatno su veće kod modela "V" u odnosu na model "D"),
- sile u vertikalnim štapovima modela "V" su ujednačenog intenziteta. Za faze opterećenja, kada je sila u prednaprežućem užetu manja od 30% u odnosu na sile u fazi prednaprezanja, najkraći vertikalni štapovi su opušteni ili u njima vladaju sile jako malog intenziteta,
- dijagonalni štapovi modela "D" nisu svi zategnuti. Zavisno od faze opterećenja veći ili manji broj dijagonala je opušten, i to kod svih kategorija krovnog opterećenja i za sve nivoe prednaprezanja.

VII-10.3 Zaključna analiza odgovora modela za statička opterećenja

Analizom svakog modela ponaosob i uporedno, nameću se zaključci o ispunjenosti kriterijuma stabilnosti definisanih u odeljku III-5. Postavljeni kriterijumi, ispunjeni u celosti ili delimično, daju odgovor na rešenje problema stabilnosti kablovskih rešetki za statička opterećenja. Pri tome neki od analiziranih modela:

- mogu se uslovno prihvatiti kao "stabilne" strukture, sve dok se dinamičkom analizom ne utvrdi nivo treperenja i frekventnog odziva, kao i mogućnost pojave rezonance za vremenski zavisna opterećenja (U),
- mogu se prihvatiti kao stabilne strukture za dejstvo statičkog opterećenja (StSt - statički stabilne).

Tabela VII-15 daje očiglednu predstavu statički stabilnih modela prema kategorijama krovnog opterećenja i nivoima prednaprezanja. Ni jedan model ne može se smatrati nestabilnom strukturom u odnosu na statička opterećenja (0).

Svoju potvrdu sveobuhvatne stabilnosti, modeli označeni kao uslovno statički stabilni (U) i statički stabilni (StSt), moraju dobiti ispunjenjem uslova dinamičke stabilnosti, kroz analizu modalnih oblika, svojstvenih frekvencija, superpozicije modalnih i harmonijskih vibracija, kao i odgovora usled vremenski zavisnog opterećenja.

TABELA VII-15

Ispunjenost kriterijuma statičke stabilnosti

Tip modela	Nivoi prednaprezanja	Kategorije krovnog opterećenja			
		g=0.15	g=0.30	g=0.50	g=0.75
Tip "D"	v=0.05	U	U	U	U
	v=0.10	U	U	StSt	StSt
	v=0.15	U	U	StSt	StSt
	v=0.20	U	U	StSt	StSt
Tip "V"	v=0.05	U	U	U	U
	v=0.10	U	U	U	StSt
	v=0.15	U	U	StSt	StSt
	v=0.20	StSt	StSt	StSt	StSt

U – uslovno ispunjen,

StSt – statički stabilan

VII-10.4 Dinamička analiza

Dinamička analiza usvojenih modela kablovskih rešetki, kao struktura koje imaju geometrijski nelinearan odgovor za naneta opterećenja, bila je moguća upotrebom nekoliko programskih paketa koji se koriste u svetu. Međutim, jedino programski paket „AnSys-MultiPhysics“ daje mogućnost analize dinamičkih povremenih opterećenja (tranzijent analiza) korišćenjem punih matrica masa, krutosti i prigušenja za nelinearne postavke modela. Modalna i harmonijska analiza, kod svih programa po metodi konačnih elemenata, sprovodi se u linearizovanoj proceduri, koja se smatra dovoljno tačna za sprovođenje proračuna.

Svaki od analiziranih modela (tip „D“ i tip „V“) prvobitno je prethodno napregnut, tj. uneti su u AnSys model - sračunati početni parametri po analitičkoj metodi profesora Balgača (predprocesor CABL-TP i programski modul CABL-T).

Logika AnSys-a podrazumevala je upotrebu predprocesora pre nego što se pristupi samom proračunu modela.

Predprocesor podrazumeva izgradnju modela definisanjem elemenata konstrukcije (LINK10 – zategnuti kablovski element sa mogućnošću prednaprezanja), materijala, poprečnih preseka kablova, unošenje inicijalne dilatacije elemenata, konfiguraciju modela i povezivanje štapova sa čvorovima sistema. Inicijalna dilatacija štapova ispune i nosećeg užeta definisana je kao nepostojeća, dok je sila prednaprezanja dobijena programskim modulom CABL-T u prednaprežućem kابلu uvećana za 30% do 35% i prevedena u promenu dužine usled delovanja sile prednaprezanja, prema sledećem izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F1}{EA} = \frac{F1}{165 * 10^6 * 0,000555} = \frac{F1}{91575}$$

Gde je:

F1 [kN] sila prednaprezanja dobijena programskim modulom CABL-T u prednaprežućem kابلu, multiplikovana konstantom 1,3 do 1,35 jer se rad sile prednaprezanja troši na energiju za uspostavljanje ravnoteže modela kroz preraspodelu sila u štapove ispune i nosećeg pojasa

E [kN/m²] Jungov moduo elastičnosti, prema katalogu proizvođača kablova iznosi 1,65x10⁶

A [m²] Poprečni presek prednaprežućeg užeta, Φ29mm i iznosi 555mm², tj. 0,000555m².

Na ovaj način uneta sila prednaprezanja u neopterećeni model konstrukcije potpuno se približava realnom fizičkom modelu.

Statički proračun programskim paketom AnSys, ovako definisanog modela u predprocesoru, sproveden je kao:

- prethodno napregnut (PSTRES,ON)
- sa mogućnošću pojave velikih deformacija i nelinearnog odgovora modela (NLGEOM,ON)
- kao konstrukcija koja prednaprežanjem dobija na krutosti (SSTIF,ON)
- procedura proračuna sa promenljivom matricom krutosti (odeljak IV-4) (NROPT,FUL)

Opterećenja na model nisu nanosena, da bi se uspostavili identični početni uslovi kao kod statičkog proračuna, tj. poklapanje konfiguracije modela i sila u štapovima za referentni položaj (faza prednaprezanja).

Dinamička opterećenja, koja deluju na modele, definisana su u odeljku VII-7.2 tako da sama konstrukcija prolazi kroz faze opterećenja koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju.

Analiza uticaja spoljašnjeg opterećenja na modele („D“ i „V“), za predviđene nivoe prednaprezanja i za vremenski zavisna opterećenja u skladu sa *Sl.VII-4 i VII-5*, sprovedena je prema Tabeli VII-15.

TABELA VII-15

Faze dinamičkog opterećenja koje deluju na prethodno zategnutu stabilnu konstrukciju

Nivo prednaprezanja	Faza dinamičkog opterećenja modela tip „D“	Faza dinamičkog opterećenja modela tip „V“
$V_p = 0.05 \text{ kN/m}^2$	7, 8, 9, 10	7, 8, 9, 10
$V_p = 0.10 \text{ kN/m}^2$	7, 8, 9, 10	7, 8, 9, 10
$V_p = 0.15 \text{ kN/m}^2$	7, 8, 9, 10	7, 8, 9, 10
$V_p = 0.20 \text{ kN/m}^2$	7, 8, 9, 10	7, 8, 9, 10

Svaki model proračunat je za četiri nivoe prednaprezanja, a svaki nivo prednaprezanja opterećen je sa četiri dinamička opterećenja. Dinamičkom analizom obuhvaćeno je ukupno 8 ravnotežnih proračuna programom AnSys, a zatim su, takodje, programom AnSys, analizirane 32 faze opterećenja koje deluju na modele „D“ i „V“.

Pribavljanje dinamičkog odgovora modela sastoji se iz nekoliko koraka (*odeljak IV-5*):

1. Uspostavljanje statičke ravnoteže usled prednaprezanja, bez uticaja spoljašnjeg opterećenja, kao model sa geometrijski nelinearnim odgovorom,
2. Modalna analiza, tj. pribavljanje svojstvenih frekvencija i svojstvenih oblika, kako je to ranije objašnjeno *metodom inverznih iteracija*, bez uticaja spoljašnjeg opterećenja, kao prethodno napregnut sistem,
3. Harmonijska analiza opterećenog modela (g+w i g+s+w) sa harmonijskom silom pobude usled vetra (*odeljak VII-5; sl.VII-4*), *metodom superpozicije tonovih formi*, tj. slaganjem tonovih formi svojsvenih i harmonijskih formi oscilovanja,
4. Tranzijent analiza ili analiza trenutne pobude opterećenog modela (g+w i g+s+w) sa silom pobude usled vetra koja se menja u funkciji vremena (*odeljci VII-5, sl.VII-5 i VII-6 i Tabela VII-5*), *potpunim metodom*, te se kao rezultat dobijaju pomeranja modela, sile u štapovima i frekvencije oscilovanja modela za definisani vremenski period.

VII-10.4.a Modalna analiza

Modalnom analizom pribavljaju se osnovne dinamičke osobine konstrukcije, koje ne zavise od opterećenja, niti pomeranja oslonaca, kao ni prigušenja, ali su u funkciji inicijalnih parametara: konfiguracije sistema (položaja čvorova u prostoru i njihovo povezivanje štapovima), osobina materijala i unutrašnjih sila koje su posledica prednaprezanja.

Osnovne dinamičke osobine su svojstvene (prirodne) frekvencije i svojstveni oblici oscilovanja. Metod inverznih iteracija (Subspace Method) je izabran za pribavljanje modalnih parametara jer je vrlo tačan (koristi pune matrice $[K]$ i $[M]$). Iz istog razloga

metod inverznih iteracija je i sporiji od redukovanog metoda. Ovaj metod se uglavnom koristi u slučajevima gde se zahteva visoka tačnost rezultata. Takodje, u programskom smislu otvara mogućnost superpozicije tonovih formi u daljoj dinamičkoj analizi (Harmonijska superpozicija tonova i Tranzijent superpozicija tonova).

Modalnom analizom prvih deset tonovih oblika dobijeni su rezultati prikazani u Tabeli VII-17. Normalizacija u postupku iterativnih ciklusa postignuta je u odnosu na matricu masa [M], kako bi se iskoristila mogućnost superpozicije svojstvenih i harmonijskih tonova. Od deset "razvijenih" svojstvenih tonovih formi, samo dva do četiri tona su u vertikalnoj ravni, ostali tonovi su u pravcu z-ose.

Procedura *modalnog proračuna* programskim paketom AnSys usvojenog modela:

- Statički proračun, sa opcijama datim na str.102
- Modalni proračun (ANTYPE,MODAL),
- Izbor metode inverznih iteracija za 10 svojstvenih vrednosti (MODOPT,SUBSP,10),
- Zbog efekata prednaprezanja primenjuje se parcijalno rešenje svojstvenih vrednosti i svojstvenih vektora (PSOLVE, EIGFULL),
- Razvoj modalnih oblika (EXPASS,ON),
- Upisivanje modalnih oblika u odgovarajući fajl (PSOLVE, EIGEXP).

Opterećenja na model, ako su definisana, ne uzimaju se u proračun, kao ni prigušenja. Medjutim, kako se radi o prethodno napregnutoj strukturi koja se unutrašnjim silama suprotstavlja uticajima spoljašnje sredine, modalni parametri se razlikuju za ravnotežna stanja $g+w$ i $g+s+w$.

TABELA VII-17 Modalni parametri vertikalnih tonovih formi za $g+w$

Tip modela Kategorije sopstvene težine, nivoi prednaprezanja		Svojstvene frekvencije [Hz]				Max.relativna pomeranja normalizovana u odnosu na matricu masa			
Tip "D"		I ton	II ton	III ton	IV ton	I ton	II ton	III ton	IV ton
g=0.15	v=0.05	4.156	5.696	-	-	2.097	3.211	-	-
	v=0.10	4.357	5.634	7.255	-	2.100	3.182	2.512	-
	v=0.15	4.477	5.710	7.388	-	2.102	3.156	2.531	-
	v=0.20	4.627	5.799	7.562	-	2.103	3.114	2.548	-
	v=0.50	5.297	6.150	8.406	-	2.224	2.866	2.564	-
	v=0.60	4.491	5.745	6.794	8.182	2.054	2.116	2.372	2.142
	v=0.70	4.665	5.984	6.917	8.510	2.017	2.154	2.211	2.163
g=0.30	v=0.05	4.325	5.675	-	-	1.964	2.949	-	-
	v=0.10	4.486	5.778	7.400	-	1.967	2.923	2.436	-
	v=0.15	4.627	5.860	7.562	-	1.970	2.894	2.452	-
	v=0.20	4.761	5.934	7.725	-	1.973	2.861	2.462	-
	v=0.30	5.021	6.067	8.051	-	2.011	2.787	2.470	-
	v=0.40	5.261	6.185	8.364	-	2.062	2.710	2.469	-
	v=0.50	4.475	5.669	6.869	8.138	1.970	2.039	2.224	2.054
g=0.50	v=0.05	4.633	5.923	-	-	1.866	2.702	-	-
	v=0.10	4.761	5.991	7.703	-	1.870	2.676	2.409	-
	v=0.15	4.887	6.055	7.861	-	1.874	2.649	2.414	-
	v=0.20	5.009	6.114	8.017	-	1.878	2.621	2.415	-
	v=0.30	4.829	5.941	7.163	-	2.008	2.192	2.679	-
g=0.75	v=0.05	4.888	6.103	-	-	1.741	2.462	-	-
	v=0.10	4.658	5.678	7.058	-	1.869	2.102	2.428	-
	v=0.15	4.284	5.190	6.867	-	1.887	1.935	2.082	-
	v=0.20	4.363	5.312	6.927	7.794	1.870	1.940	2.012	1.863
Tip "V"		I ton	II ton	III ton	IV ton	I ton	II ton	III ton	IV ton
g=0.15	v=0.05	3.144	4.198	5.760	-	1.583	2.009	1.595	-
	v=0.10	3.237	4.353	5.993	-	1.576	2.027	1.600	-
	v=0.15	3.330	4.503	6.221	6.899	1.583	2.045	1.603	1.928
	v=0.20	3.433	4.658	6.450	6.971	1.587	2.061	1.612	1.868

g=0.30	v=0.05	3.130	4.259	5.872	-	1.522	1.935	1.531	-
	v=0.10	3.234	4.422	6.116	-	1.527	1.952	1.537	-
	v=0.15	3.334	4.572	6.339	-	1.530	1.968	1.543	-
g=0.50	v=0.05	3.214	4.457	6.183	-	1.489	1.901	1.492	-
	v=0.10	3.315	4.603	6.401	-	1.491	1.916	1.498	-
	v=0.15	3.417	4.746	6.614	-	1.492	1.930	1.508	-
	v=0.20	3.519	4.884	6.823	7.109	1.491	1.944	1.527	1.693
g=0.75	v=0.05	3.283	4.621	6.447	-	1.433	1.840	1.435	-
	v=0.10	3.384	4.757	6.651	-	1.433	1.853	1.446	-
	v=0.15	3.487	4.894	6.857	-	1.432	1.866	1.467	-
	v=0.20	3.586	5.022	7.051	-	1.431	1.879	1.526	-

TABELA VII-18 Modalni parametri vertikalnih tonovih formi za $g+s+w$

Tip modela Kategorije sopstvene težine, nivoi prednaprezanja		Svojstvene frekvencije [Hz]				Max.relativna pomeranja normalizovana u odnosu na matricu masa			
Tip "D"		I ton	II ton	III ton	IV ton	I ton	II ton	III ton	IV ton
g=0.15	v=0.05	3.862	5.302	-	-	1.916	2.272	-	-
	v=0.10	3.972	5.452	-	-	1.923	2.279	-	-
	v=0.15	4.039	5.541	-	-	1.926	2.283	-	-
	v=0.20	4.124	5.652	7.316	-	1.930	2.289	2.041	-
g=0.30	v=0.05	3.898	5.390	-	-	1.814	2.177	-	-
	v=0.10	3.989	5.513	-	-	1.818	2.182	-	-
	v=0.15	4.070	5.621	7.353	-	1.822	2.186	1.942	-
	v=0.20	4.148	5.723	7.395	-	1.825	2.189	1.938	-
g=0.50	v=0.05	4.033	5.569	-	-	1.744	2.129	-	-
	v=0.10	4.109	5.669	-	-	1.748	2.132	-	-
	v=0.15	4.184	5.766	7.470	-	1.751	2.134	1.869	-
	v=0.20	4.257	5.859	7.512	-	1.754	2.136	1.865	-
g=0.75	v=0.05	4.133	5.711	-	-	1.649	2.045	-	-
	v=0.10	4.203	5.800	-	-	1.652	2.046	-	-
	v=0.15	4.271	5.887	7.579	-	1.655	2.047	1.773	-
	v=0.20	4.340	5.972	7.621	-	1.657	2.047	1.769	-
Tip "V"		I ton	II ton	III ton	IV ton	I ton	II ton	III ton	IV ton
g=0.15	v=0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
	v=0.10	3.402	-	-	-	1.586	-	-	-
	v=0.15	3.509	5.027	-	-	1.591	2.094	-	-
	v=0.20	3.734	5.295	-	-	1.602	2.099	-	-
g=0.30	v=0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
	v=0.10	3.472	-	-	-	1.532	-	-	-
	v=0.15	3.577	5.142	-	-	1.535	2.022	-	-
	v=0.20	3.689	5.282	-	-	1.537	2.039	-	-
g=0.50	v=0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
	v=0.10	3.595	-	-	-	1.493	-	-	-
	v=0.15	3.697	5.320	-	-	1.495	1.985	-	-
	v=0.20	3.798	5.442	-	-	1.496	1.999	-	-
g=0.75	v=0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
	v=0.10	3.700	-	-	-	1.434	-	-	-
	v=0.15	3.800	5.467	-	-	1.435	1.919	-	-
	v=0.20	3.895	5.577	-	-	1.435	1.931	-	-

Analiza modalnih rezultata


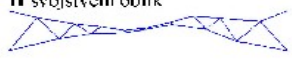

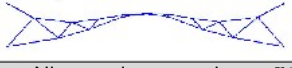


Od dobijenih 10 svojstvenih oblika, samo prvi do četvrti su tonovi u vertikalnoj ravni (xOy), dok su ostali u horizontalnoj ravni (xOz) ili su svojstveni vektori zanemarljivo mali (reda veličine $1 \cdot 10^{-7}$).

Očigledno je da se povećanjem nivoa prednaprezanja, tj. povećanjem zategnutosti modela, frekvencije povećavaju, odnosno periode oscilovanja smanjuju.

Svojstvene frekvencije veće su za model „D“ nego za model „V“, kao i za kategoriju opterećenja „ $g+w$ “ u odnosu na „ $g+s+w$ “.

Faktor učešća tonovih formi, najveći je za I i II svojstveni oblik vertikalnih vibracija u ravni xOy . Analizom sličnosti tonovih formi sažeti su zajednički I i II svojstveni oblik u zavisnosti od faktora koji se menjaju: nivo prednaprezanja v i faza opterećenja $g+w$ i $g+s+w$, što je prikazano u Tabeli VII-19.

TABELA VII-19 Tipični oblici vertikalnih tonovih formi za model tipa "D" i "V"

Faza opterećenja		$g+w$							$g+s+w$			
Nivo prednaprezanja v [kN/m ²]		0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.05	0.10	0.15	0.20
I svojstveni oblik 	0.15	√	√	√	√	√	√	√				
	0.30	√	√	√	√	√	√					
II svojstveni oblik 	0.50	√	√	√	√							
	0.75	√										
Nivo prednaprezanja v [kN/m ²]		0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.05	0.10	0.15	0.20
I svojstveni oblik 	0.15						√	√	√	√	√	√
	0.30					√			√	√	√	√
II svojstveni oblik 	0.50			√					√	√	√	√
	0.75	√	√						√	√	√	√
Nivo prednaprezanja v [kN/m ²]		0.05	0.10	0.15	0.20				0.05	0.10	0.15	0.20
I svojstveni oblik 	0.15	√	√	√	√						√	√
	0.30	√	√	√	√						√	√
II svojstveni oblik 	0.50	√	√	√	√						√	√
	0.75	√	√	√	√						√	√

Zajednički svojstveni oblici koji se javljaju pri karakterističnim kritičnim fazama opterećenja ($g+w$ i $g+s+w$) ukazuju na moguće nivoe prednaprezanja pod kojima se može očekivati ispunjenje dinamičkih uslova stabilnosti (čekirana i zabojena polja u Tabeli VII-19), tj. da se usled harmonijske pobude u zadatom frekventnom opsegu ne dodje do velikih deformacija i rezonance, a da se usled povremenih pobuda vetrom model „relativno brzo“ umiri do nivoa svojstvenih frekvenci.

VII-10.4.b Harmonijska analiza

Svako ustaljeno ciklično opterećenje izazvaće harmonijski odgovor konstrukcije. Jedan od najspektakularnijih primera cikličnih (harmonijskih) vibracija dogodio se 1940.godine kada je most nad Takoma tesnacem u državi Vašington, zbog pojave rezonance usled harmonijske pobude vetrom, doživeo slom.

Harmonijskom analizom otvara se mogućnost predviđanja dinamičkog odgovora konstrukcije za stalna ciklična opterećenja, te mogućnost procene pojave oštećenja usled rezonance od prinudnih harmonijskih pobuda.

Dinamička harmonijska analiza prethodno napregnutih struktura mora biti sprovedena, kako bi se dobila slika o ponašanju strukture usled dinamičke pobude. Uslov za sprovođenje harmonijske analize je izvršena statička, kao i modalna analiza, kako bi se iz njih koristili parcijalni rezultati proračuna. Efekat prednaprezanja preuzima se iz statičke analize.

Mogućnost pojave velikih deformacija i nelinearnog odgovora modela, uslovlila je izbor modalne procedure (Metod inverznih iteracija) i harmonijske analize (Metod superpozicije tonovih formi).

Procedura harmonijskog proračuna programskim paketom AnSys usvojenog modela:

- Statički proračun, sa opcijama datim na str.102,
- Modalni proračun (odjeljak VII-10.2.a),
- Harmonijski proračun (ANTYPE,HARM),
- Izbor metode superpozicije tonovih formi za 10 svojstvenih vrednosti (HROPT,MSUP,10),
- Definisane cikličnog opterećenja koje se menja po sinusoidnoj raspodeli, pri čemu je zadata vrednost maksimalna u pravcu definisane ose (F, čvor, Y-osa, vrednost). Pri tome harmonijska pobuda deluje u kod modela „D“ u čvoru 5, dok kod modela „V“ deluje u čvoru 6 znajući da se maksimalna pobuda javlja bašu tim čvorovima u skladu sa Sl.VII-5 i VII-6,
- Normalizovana pomeranja iz modalne analize primenjuju se u harmonijskoj analizi, u skladu sa definisanim vektorom uvećenja (LVSCALE,1),
- Definisane promena vremenski zavisnog opterećenja, tj. frekvencije napadne sile, broj ciklusa ponavljanja u sekundi (HARFRQ,0.0,0.4) u skladu sa analizom datom u odeljku VII-5, slika VII-4,
- Vremenski korak integracije se sprovodi za frekventni opseg napadne sile od 0sec. do 0,4sec. u 40 koraka,
- Prigušenje je usvojeno kao konstanta od 5% (DMPRAT,0.05) u skladu sa radovima [4], [17], [46], [53], [55], [56], [57],
- Upisivanje rezultata u odgovarajući fajl (SOLVE),
- Razvoj rezultata (EXPASS,ON).

Očekivani rezultati u ovoj fazi dinamičke analize su amplitude pomeranja čvorova modela u funkciji frekvencije napadne harmonijske sile.

TABELA VII-20

Amplitude superpozicije modalnih i harmonijskih tonova za silu pobude 0Hz do 0.4Hz

Tip modela, Kategorije sopstvene težine, nivoi prednaprezanja		Amplitude usled superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija [m]					Amplitude usled superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija [m]				
		<i>g+w</i>					<i>g+s+w</i>				
Tip "D"		čvor 5	čvor 10	čvor 12	čvor 14	čvor 16	čvor 5	čvor 10	čvor 12	čvor 14	čvor 16
g=0.15	v=0.05	0.003	0.001	0.076	0.167	0.135	0.126	0.204	0.096	0.053	0.19
	v=0.10	0.010	0.060	0.092	0.148	0.129	0.115	0.217	0.115	0.035	0.177
	v=0.15	0.010	0.061	0.091	0.147	0.127	0.109	0.225	0.127	0.024	0.169
	v=0.20	0.010	0.060	0.090	0.145	0.125	0.447	0.285	0.301	0.302	0.246
	v=0.50	0.011	0.060	0.084	0.136	0.114					
	v=0.60	0.073	0.065	0.100	0.170	0.150	0.384	0.285	0.288	0.304	0.245
g=0.30	v=0.05	0.004	0.016	0.113	0.211	0.165	0.137	0.207	0.094	0.059	0.198
	v=0.10	0.014	0.091	0.127	0.180	0.161	0.127	0.218	0.110	0.044	0.187
	v=0.15	0.014	0.091	0.125	0.178	0.158	0.475	0.279	0.290	0.290	0.234
	v=0.20	0.014	0.090	0.124	0.177	0.156	0.464	0.280	0.287	0.291	0.235
	v=0.30	0.015	0.090	0.120	0.175	0.151					
	v=0.40	0.015	0.090	0.117	0.172	0.147					
g=0.50	v=0.50	0.006	0.081	0.115	0.187	0.162	0.410	0.279	0.280	0.291	0.236
	v=0.05	0.007	0.055	0.170	0.267	0.205	0.145	0.245	0.122	0.05	0.208
	v=0.10	0.020	0.134	0.173	0.216	0.198	0.138	0.254	0.136	0.036	0.199
	v=0.15	0.020	0.133	0.170	0.216	0.196	0.507	0.300	0.297	0.293	0.236
	v=0.20	0.020	0.132	0.168	0.215	0.194	0.496	0.297	0.295	0.293	0.234
	v=0.30	0.099	0.092	0.144	0.229	0.192	0.491	0.292	0.291	0.29	0.234

g=0.75	v=0.05	0.010	0.097	0.225	0.315	0.238	0.153	0.274	0.143	0.042	0.215
	v=0.10	0.193	0.109	0.174	0.259	0.221	0.148	0.283	0.156	0.029	0.204
	v=0.15	0.137	0.090	0.190	0.278	0.194	0.531	0.311	0.298	0.292	0.235
	v=0.20	0.202	0.123	0.158	0.224	0.202	0.521	0.311	0.297	0.292	0.235
Tip "V"		čvor 6	čvor 14	čvor 16	čvor 18	čvor 20	čvor 6	čvor 14	čvor 16	čvor 18	čvor 20
g=0.15	v=0.05	0.190	0.071	0.123	0.144	0.133	x	x	x	x	x
	v=0.10	0.181	0.070	0.119	0.138	0.127	0.014	0.001	0.007	0.013	0.016
	v=0.15	0.143	0.075	0.134	0.174	0.169	0.048	0.108	0.083	0.028	0.031
	v=0.20	0.134	0.078	0.133	0.168	0.163	0.103	0.139	0.129	0.074	0.003
g=0.30	v=0.05	0.147	0.062	0.105	0.117	0.099	x	x	x	x	x
	v=0.10	0.141	0.063	0.103	0.112	0.094	0.034	0.003	0.016	0.038	0.038
	v=0.15	0.134	0.063	0.101	0.102	0.089	0.031	0.114	0.078	0.013	0.052
	v=0.20	0.078	0.083	0.137	0.177	0.168	0.039	0.127	0.091	0.022	0.049
g=0.50	v=0.05	0.101	0.061	0.091	0.089	0.061	x	x	x	x	x
	v=0.10	0.098	0.063	0.092	0.087	0.057	0.051	0.004	0.025	0.047	0.056
	v=0.15	0.095	0.066	0.093	0.086	0.055	0.022	0.136	0.087	0.007	0.071
	v=0.20	0.013	0.100	0.149	0.190	0.180	0.029	0.148	0.100	0.016	0.066
g=0.75	v=0.05	0.055	0.063	0.080	0.062	0.021	x	x	x	x	x
	v=0.10	0.056	0.068	0.084	0.064	0.020	0.067	0.005	0.032	0.061	0.074
	v=0.15	0.055	0.077	0.089	0.068	0.020	0.013	0.157	0.097	0.002	0.088
	v=0.20	0.050	0.078	0.099	0.077	0.022	0.021	0.169	0.110	0.012	0.082

Analiza rezultata superpozicije modalnih i harmonijskih tonova

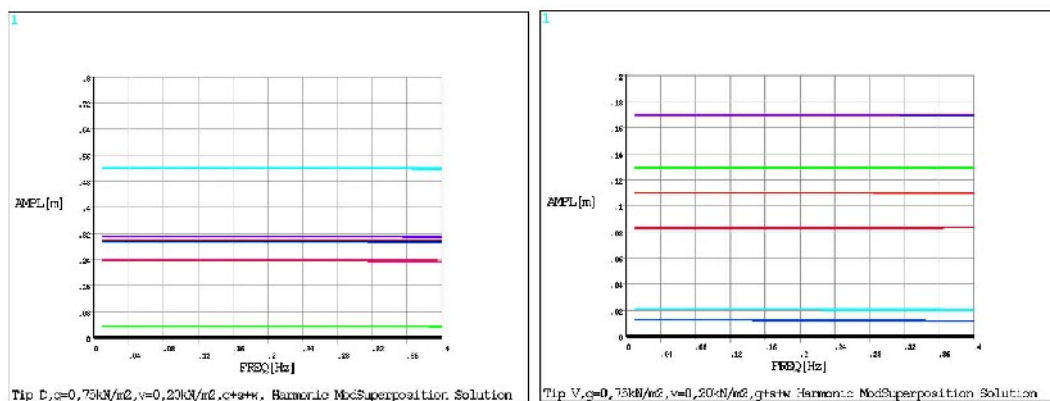
Metodom superpozicije dobijenih 10 svojstvenih oblika i oscilacija dobijenih harmonijskom pobudom u definisanom frekventnom opsegu, dobijene su amplitude oscilatornog kretanja čvorova gornjeg pojasa modela, a izabrani su karakteristični rezultati koji su prikazani u Tabeli VII-20.

Zasenčeni delovi Tabele VII-20, predstavljaju modele na nivoima prednaprezanja za koje se javljaju identične forme svojstvenih oblika pa su njihovi podaci pogodni za poredjenje.

Očigledno je da se povećanjem nivoa prednaprezanja, tj. povećanjem zategnutosti modela, smanjuju amplitude oscilovanja usled harmonijske pobude.

Maksimalne oscilacije javiće se za model „D“ pri najvećem opterećenju za „g+s+w“, dok su amplitude mnogo manje za model „V“ i za fazu opterećenja „g+w“ i za „g+s+w“.

Analizom grafika amplitudnih promena za frekventni opseg od 0Hz do 0.4Hz (Slika VII-7), jasno je da su amplitude konstantne i da neće doći do rezonance usled delovanja usvojene harmonijske pobude. Zbog velike medjusobne sličnosti izabrana su dva dijagrama sa najvećim amplitudama za modele „D“, odnosno „V“.



SLIKA VII-7 Karakteristični dijagrami amplituda čvorova gornjeg pojasa modela tipa „D“ i tipa „V“ usled superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija

VII-10.4.c Tranzijent analiza

Tranzijent analiza ili analiza trenutne pobude pribavlja odgovor modela u realnom vremenu, nanoseći na model opterećenja koja mogu biti i promenljiva po poznatoj zakonitosti ili prema datom vremenskom zapisu. Kako je zadati problem geometrijski nelinearan, preuzimanjem sračunatih vrednosti iz statičke analize, korišćenjem naredbe za prednaprezanje (PSTRES,ON) i tranzijent analiza biće izvršena kao nelinearan problem sa mogućnošću pojave deformacija modela i sila u štapovima koje će se menjati u svakom trenutku vremena.

Analizirajući fenomen vetra u odeljku VII-5, definisano je dejstvo laminarnog horizontalnog kretanja vazduha kao harmonijsko u frekventnom opsegu 0Hz do 0.4Hz (Slika VII-4) i kao udarno-turbulentno dejstvo koje se ponavlja u vremenskom intervalu od 180 sekundi, sa trajanjem od 4 sekunde u toku kojih dobija svoj dinamički maksimum, što je prikazano na slici VII-5 i u Tabeli VII-5.

Imajući u vidu prirodu problema, neophodno je bilo primeniti proceduru koja može da izvrši analizu geometrijski nelinearnih problema. Zbog toga je primenjen programski paket AnSys, *tranzijent analiza*, tzv. *punim metodom*.

Karakteristična kritična opterećenja modela su $g+w_{\text{dinamičko}}$ i $g+s+w_{\text{dinamičko}}$ sa silom pobude usled vetra koja se menja u funkciji vremena $w(t)$. Rezultat proračuna su realna pomeranja odabranih čvorova modela, sile u štapovima i frekvencije oscilovanja modela za definisani vremenski period.

Procedura tranzijent proračuna programskim paketom AnSys usvojenog modela:

- Igradnja modela kao za statičku analizu,
- Tranzijent proračun (ANTYPE,TRANS),
- Izbor metode (TRNOPT,FULL),
- Primena opcija za nelinearni proračun (PSTRESS,ON), (SSTIF,ON), (NLGEOM,ON)
- Prigušenje je usvojeno kao konstanta od 5% (DMPRAT,0.05) u skladu sa radovima [4], [17], [46], [53], [55], [56] i [57],
- Definisane početnih uslova, koji se dobijaju statičkom nelinearnom analizom za zadata statička opterećenja ($g+w_{\text{stat}}$ ili $g+s+w_{\text{stat}}$),
- Prilikom definisanja početnih uslova, ako nisu definisani, program podrazumeva pomeranja $u_0=0$ i brzine $\dot{u}_0=0$. Početna pomeranja i brzine biće pribavljeni statičkom analizom kao prvi korak opterećenja, sa definisanim vremenskim intervalom (TIME,1.0) i efektima integracije u toku vremena (TIMINT,OFF),
- Svaki sledeći korak opterećenja je definisan vremenskim intervalom, kao i intenzitetom, kao linearna funkcija u zadanom vremenskom intervalu (KBC,0). Pri tome se vrši integracija (TIMINT,ON), usvaja automatski vremenski korak (AUTOTS,ON), kao i vremenski interval integracije (DELTIM,0.01). Za slučaj turbulentnih udara vetra prikazanih na slici VII-5, definisano je 13 sukcesivnih faza opterećenja,
- Upisivanje rezultata u odgovarajući fajl (SOLVE),
- Razvoj rezultata (EXPASS,ON),
- Prikaz rezultata: postprocesing, uz pomoć generalnog postprocesora (POST1) ili uz pomoć „Time-history“ postprocesora (POST26).

Očekivani rezultati u ovoj fazi dinamičke analize su pomeranja čvorova modela, sile u štapovima modela, kao i promene frekvence oscilovanja u funkciji vremena, tj. za vremenski interval trajanja trenutne dinamičke pobude, prema slici VII-5, odnosno za vremenski interval od 185 sekundi.

TABELA VII-21 Parametri trenutne pobude vetra prema slici VII-5 i VII-6, od uticaja na stabilnost modela tipa „D“

Kategorija krovno opterećenja	Nivo prednaprezanja	$g+W_{dinamicko}$							$g+S+W_{dinamicko}$						
		Pomeranje $\delta_1(t=3s) - \delta_2(t=1s)$	amplitude titranja $\delta(t=6sec)$	“vreme umirenja”	Noseći kabl		Prednaprežujući kabl		Pomeranje $\delta_1(t=3s) - \delta_2(t=1s)$	amplitude titranja $\delta(t=6sec)$	“vreme umirenja”	Noseći kabl		Prednaprežujući kabl	
					max.sila	min.sila	max.sila	min.sila				max.sila	min.sila		
ČVOR 5:															
		m	m	sec	kN	kN	kN	kN	m	m	sec	kN	kN	kN	kN
g=0.15 kN/m ²	v=0.05	-0.0226	0.0007	33	270.57	222.71	165.09	136.5	-0.1206	0.0104	13	580.28	545.18	38.613	32.213
	v=0.10	-0.0104	0.0007	34	292.57	237.93	190.71	162.86	-0.1189	0.0098	13	601.57	559.49	70.124	58.560
	v=0.15	-0.0104	0.0007	34	306.15	256.52	210.72	179.38	-0.1255	0.0095	13	614.77	568.31	89.837	76.404
	v=0.20	-0.0104	0.0007	35	323.75	259.18	236.42	201.04	-0.1337	0.0092	13	631.95	579.76	115.68	96.717
	v=0.60	-0.0159	0.0007	34	443.26	337.36	421.05	355.86							
	v=0.70	-0.0386	0.0086	15	477.68	361.97	472.34	399.29	-0.1425	0.0069	13	783.89	679.01	353.38	296.31
g=0.30 kN/m ²	v=0.05	-0.0155	0.0006	34	335.09	286.55	160.08	135.76	-0.1176	0.0091	13	657.98	617.83	48.652	40.715
	v=0.10	-0.0100	0.0006	34	355.18	300.44	188.21	159.99	-0.1257	0.0087	13	677.69	631.16	77.535	64.930
	v=0.15	-0.0099	0.0006	35	373.33	319.77	214.48	182.15	-0.1327	0.0084	13	695.55	643.2	103.93	87.078
	v=0.20	-0.0099	0.0006	35	390.99	324.86	240.40	203.99	-0.1393	0.0081	13	713.00	654.92	129.91	108.89
	v=0.50	-0.0234	0.0150	13	497.49	395.77	402.03	339.73	-0.1394	0.0067	13	818.81	725.1	291.52	244.79
g=0.50 kN/m ²	v=0.05	-0.0097	0.0006	35	424.81	373.79	166.48	140.9	-0.1415	0.0079	13	758.05	711.57	59.203	49.598
	v=0.10	-0.0097	0.0006	35	442.85	386.13	192.76	163.02	-0.1474	0.0076	13	776.05	723.73	85.542	71.694
	v=0.15	-0.0097	0.0006	35	461.13	401.89	219.71	185.67	-0.1527	0.0074	13	794.32	736.04	112.47	94.299
	v=0.20	-0.0097	0.0006	36	479.23	410.7	246.72	208.35	-0.1479	0.0071	13	812.46	748.22	139.41	116.92
	v=0.30	-0.0161	0.0112	18	515.24	434.63	301.26	254.07	-0.1536	0.0074	13	760.52	686.63	201.63	171.34
g=0.75 kN/m ²	v=0.05	-0.0094	0.0006	39	536.71	482.23	173.17	145.85	-0.1397	0.0067	13	884.76	830.68	71.503	59.989
	v=0.10	-0.0152	0.0059	39	555.34	495.73	200.65	168.9	-0.1355	0.0065	13	903.59	843.45	98.88	82.979
	v=0.15	-0.0223	0.0083	15	574.41	509.25	227.64	191.58	-0.1316	0.0063	13	922.35	856.12	126.32	106.03
	v=0.20	-0.0316	0.0079	12	594.08	521.76	255.39	215.01	-0.1279	0.0062	13	941.69	869.15	154.8	129.97
ČVOR 12:															
		m	m	sec	kN	kN	kN	kN	m	m	sec	kN	kN	kN	kN
g=0.15 kN/m ²	v=0.05	-0.0003	0.0003	33	270.57	222.71	165.09	136.5	0.0254	0.0024	13	580.28	545.18	38.613	32.213
	v=0.10	-0.0039	0.0003	34	292.57	237.93	190.71	162.86	0.0242	0.0022	13	601.57	559.49	70.124	58.560
	v=0.15	-0.0039	0.0003	34	306.15	256.52	210.72	179.38	0.0247	0.0021	13	614.77	568.31	89.837	76.404
	v=0.20	-0.0039	0.0003	35	323.75	259.18	236.42	201.04	0.0253	0.0019	13	631.95	579.76	115.68	96.717
	v=0.60	-0.0035	0.0003	34	443.26	337.36	421.05	355.86							
	v=0.70	0.0045	0.0013	15	477.68	361.97	472.34	399.29	0.0204	0.0011	13	783.89	679.01	353.38	296.31
g=0.30 kN/m ²	v=0.05	-0.0018	0.0002	34	335.09	286.55	160.08	135.76	0.0253	0.0021	13	657.98	617.83	48.652	40.715
	v=0.10	-0.0033	0.0002	34	355.18	300.44	188.21	159.99	0.0258	0.0020	13	677.69	631.16	77.535	64.93
	v=0.15	-0.0033	0.0002	35	373.33	319.77	214.48	182.15	0.0263	0.0018	13	695.55	643.2	103.93	87.078
	v=0.20	-0.0033	0.0002	35	390.99	324.86	240.40	203.99	0.0266	0.0017	13	713.00	654.92	129.91	108.89
	v=0.50	-0.0030	0.0020	13	497.49	395.77	402.03	339.73	0.0224	0.0012	13	818.81	725.1	291.52	244.79
g=0.50 kN/m ²	v=0.05	-0.0097	0.0006	35	424.81	373.79	166.48	140.90	-0.1415	0.0079	13	758.05	711.57	59.203	49.598
	v=0.10	-0.0097	0.0006	35	442.85	386.13	192.76	163.02	-0.1474	0.0076	13	776.05	723.73	85.542	71.694
	v=0.15	-0.0097	0.0006	35	461.13	401.89	219.71	185.67	-0.1527	0.0074	13	794.32	736.04	112.47	94.299
	v=0.20	-0.0097	0.0006	36	479.23	410.70	246.72	208.35	-0.1479	0.0071	13	812.46	748.22	139.41	116.92
	v=0.30	-0.0161	0.0112	18	515.24	434.63	301.26	254.07	0.0268	0.0015	13	760.52	686.63	201.63	171.34
g=0.75 kN/m ²	v=0.05	-0.0026	0.0002	39	536.71	482.23	173.17	145.85	0.0287	0.0015	13	884.76	830.68	71.503	59.989
	v=0.10	-0.0023	0.0007	39	555.34	495.73	200.65	168.9	0.0271	0.0015	13	903.59	843.45	98.88	82.979
	v=0.15	-0.0023	0.0012	15	574.41	509.25	227.64	191.58	0.0257	0.0014	13	922.35	856.12	126.32	106.03
	v=0.20	-0.0044	0.0014	12	594.08	521.76	255.39	215.01	0.0244	0.0013	13	941.69	869.15	154.8	129.97

TABELA VII-22 Parametri trenutne pobude vetra prema slici VII-5 i VII-6, od uticaja na stabilnost modela tipa „V“

Kategorija krovnog opterećenja	Nivo prednaprezanja	$g+W$ dinamičko							$g+S+W$ dinamičko						
		Pomeranje $\delta_1(t=3s) - \delta_2(t=1s)$	amplitude titranja $\delta(t=6sec)$	vreme umirenja	Noseći kabl		Prednaprežujući kabl		Pomeranje $\delta_1(t=3s) - \delta_2(t=1s)$	amplitude titranja $\delta(t=6sec)$	vreme umirenja	Noseći kabl		Prednaprežujući kabl	
					max.sila	min.sila	max.sila	min.sila				max.sila	min.sila	max.sila	min.sila
ČVOR 6:															
		m	m	sec	kN	kN	kN	kN	m	m	sec	kN	kN	kN	kN
g=0.15 kN/m ²	v=0.05	-0.1520	0.0114	19	262.34	244.98	160.92	147.01	Ne konverg.			x	x	0	0
	v=0.10	-0.1452	0.0106	19	278.65	260.33	178.71	164.1	-0.1284	0.0067	20	565.19	536.48	11.761	10.957
	v=0.15	-0.1384	0.0074	20	295.31	276.01	197.06	181.75	-0.1221	0.0063	20	582.03	552.13	32.443	30.332
	v=0.20	-0.1318	0.0069	20	312.22	291.92	215.85	199.86	-0.1162	0.0059	21	598.96	567.63	53.402	50.082
g=0.30 kN/m ²	v=0.05	-0.1423	0.0078	19	323.68	304.26	150.88	138.62	Ne konverg.					0	0
	v=0.10	-0.1349	0.0072	19	342.53	321.96	171.45	158.26	-0.1150	0.0059	20	643.21	611.14	20.563	19.256
	v=0.15	-0.1282	0.0067	20	360.46	338.8	191.2	177.18	-0.1093	0.0055	21	661.15	627.6	42.393	39.813
	v=0.20	-0.1214	0.0063	20	379.79	356.95	212.67	197.79	-0.1037	0.0052	21	680.31	645.21	65.895	62.05
g=0.50 kN/m ²	v=0.05	-0.1285	0.0068	19	410.89	388.25	142.96	132.28	Ne konverg.			720.55	685.25	1.7321	1.6249
	v=0.10	-0.1220	0.0064	20	429.64	405.81	163.52	151.86	-0.1035	0.0051	21	739.20	702.63	24.198	22.769
	v=0.15	-0.1158	0.0060	20	448.53	423.5	184.4	171.80	-0.0974	0.0049	21	757.83	719.91	46.823	44.158
	v=0.20	-0.1100	0.0056	20	467.5	441.28	205.55	192.04	-0.0929	0.0046	21	776.44	737.04	69.586	65.76
g=0.75 kN/m ²	v=0.05	-0.1139	0.0060	20	519.69	492.99	131.99	122.89	-0.0935	0.0047	21	841.45	800.91	5.0781	4.7875
	v=0.10	-0.1081	0.0056	20	539.62	511.62	153.85	143.66	-0.0892	0.0044	21	861.00	819.14	28.449	26.878
	v=0.15	-0.1025	0.0053	20	560.26	530.94	176.67	165.40	-0.0851	0.0042	21	881.15	837.85	52.709	49.891
	v=0.20	-0.0975	0.005	21	580.25	549.64	198.94	186.68	-0.0815	0.004	22	900.59	855.78	76.282	72.323
ČVOR 16:															
		m	m	sec	kN	kN	kN	kN	m	m	sec	kN	kN	kN	kN
g=0.15 kN/m ²	v=0.05	0.0403	0.0034	19	262.34	244.98	160.92	147.01	Ne konverg.					0	0
	v=0.10	0.0388	0.0032	19	278.65	260.33	178.71	164.1	0.0351	0.0020	20	565.19	536.48	11.761	10.957
	v=0.15	0.0371	0.0022	20	295.31	276.01	197.06	181.75	0.0331	0.0018	20	582.03	552.13	32.443	30.332
	v=0.20	0.0352	0.0020	20	312.22	291.92	215.85	199.86	0.0312	0.0017	21	598.96	567.63	53.402	50.082
g=0.30 kN/m ²	v=0.05	0.0380	0.0023	19	323.68	304.26	150.88	138.62	Ne konverg.					0	0
	v=0.10	0.0362	0.0021	19	342.53	321.96	171.45	158.26	0.0313	0.0017	20	643.21	611.14	20.563	19.256
	v=0.15	0.0344	0.0020	20	360.46	338.8	191.2	177.18	0.0295	0.0016	21	661.15	627.6	42.393	39.813
	v=0.20	0.0325	0.0018	20	379.79	356.95	212.67	197.79	0.0277	0.0015	21	680.31	645.21	65.895	62.05
g=0.50 kN/m ²	v=0.05	0.0347	0.0020	19	410.89	388.25	142.96	132.28	0.0000			720.55	685.25	1.7321	1.6249
	v=0.10	0.0329	0.0019	20	429.64	405.81	163.52	151.86	0.0284	0.0015	21	739.20	702.63	24.198	22.769
	v=0.15	0.0311	0.0017	20	448.53	423.5	184.4	171.80	0.0260	0.0014	21	757.83	719.91	46.823	44.158
	v=0.20	0.0294	0.0016	20	467.5	441.28	205.55	192.04	0.0246	0.0013	21	776.44	737.04	69.586	65.76
g=0.75 kN/m ²	v=0.05	0.0310	0.0018	20	519.69	492.99	131.99	122.89	0.0253	0.0014	21	841.45	800.91	5.0781	4.7875
	v=0.10	0.0293	0.0017	20	539.62	511.62	153.85	143.66	0.0239	0.0013	21	861.00	819.14	28.449	26.878
	v=0.15	0.0276	0.0015	20	560.26	530.94	176.67	165.40	0.0226	0.0012	21	881.15	837.85	52.709	49.891
	v=0.20	0.0260	0.0014	21	580.25	549.64	198.94	186.68	0.0214	0.0011	22	900.59	855.78	76.282	72.323

Analiza tranzijent rezultata

Deo dobijenih rezultata prilikom dinamičke tranzijent analize modela „D“ i „V“, za faze opterećenja $g+w_d$ i $g+s+w_d$, prikazani su u Tabelama VII-21 i VII-22.

Rezultati pokazuju da se najveća pomeranja javljaju u čvorovima u kojima deluje dinamička sila i to u trenutku njenog maksimalnog intenziteta u trenutku $t=3sec$. Prestankom dejstva dinamičke sile, u trenutku $t=5sec$, model zbog svoje elastičnosti, nastavlja da osciluje treperenjem, tj. amplitudama oko ravnotežnog položaja koje su reda veličine od 0.6mm do 15mm.

Amplitude treperenja (titranja), vrlo brzo se približavaju ravnotežnom položaju modela, tj. model ulazi u fazu oscilovanja svojstvenim frekvencijama po I tonu ili po II tonu.

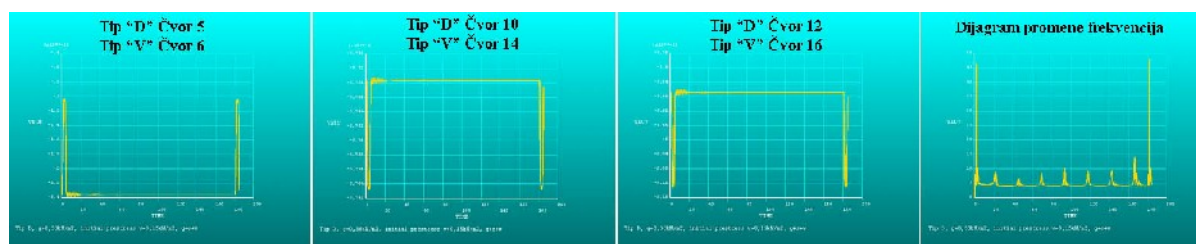
Treperenje modela „D“ nastavlja se do narednog dinamičkog udara vetra u ritmičnim intervalima od 25 do 30 sekundi, pri čemu je perioda ponavljanja fibrilacije (treperenja) duža za fazu opterećenja $g+s+w_d$.

Treperenje modela „V“ nastavlja se do narednog dinamičkog udara vetra u ritmičnim intervalima od 18 do 21 sekunde, pri čemu je perioda ponavljanja fibrilacije duža za fazu opterećenja $g+s+w_d$.

Kriterijum zadovoljenja maksimalne dozvoljene sile u analiziranim modelima zadovoljen je za sve faze opterećenja i nivoe prednaprezanja, osim za model tip „D“ sa ultra lakim krovnim pokrivačem od $g=0.15kN/m^2$ za $g+s+w_d$. U tom slučaju javlja se prekoračenje kriterijuma koji se odnosi na granično stanje nosivosti usvojenog užeta (odjeljak III-3.1 (f)) za 10.3%. Rešenje prekoračenja je usvajanje prvog narednog većeg preseka, tj. uža $\Phi 39mm$, čiji je poprečni presek $1000mm^2$.

Tranzijent analizom dobijeni su dijagrami promena frekvencija, tj. frekventni spektar modela u vremenskom intervalu delovanja dinamičke pobude (0 do 185 sekundi). Dijagram promene frekvencija na slici VII-8, prikazuje model koji osciluje u I svojstvenom obliku sa ritmičnim treptajima. Dijagram promene frekvencija na slici VII-9, prikazuje model koji „luta“ u potrazi za svojstvenim oblikom oscilovanja, pa se ne može smatrati dinamički otpornom konstrukcijom u opštem smislu.

Analizom sličnosti dijagrama pomeranja karakterističnih čvorova i dijagrama promena frekvencija, sažete su zajedničke kombinacije pomenutih dijagrama, koje su prikazane na slikama VII-8, VII-9 i VII-10. Kombinacije pomenutih dijagrama ponavljaju se u zavisnosti od faktora koji se menjaju: nivo prednaprezanja v i faza opterećenja $g+w_d$ i $g+s+w_d$, što je prikazano u Tabeli VII-23.



Slika VII-8 Kombinacija I: dijagrami pomeranja i frekventni spektar

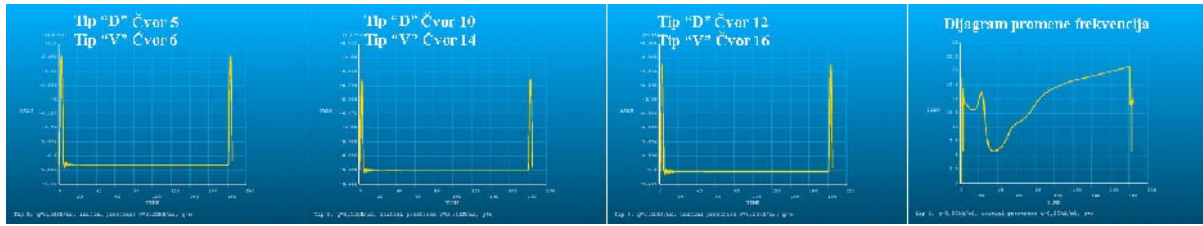
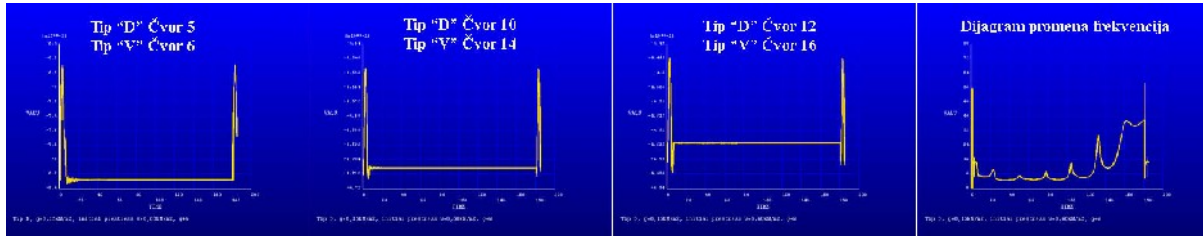

Slika VII-9 Kombinacija II: dijagrami pomeranja i frekventni spektar

Slika VII-10 Kombinacija III: dijagrami pomeranja i frekventni spektar

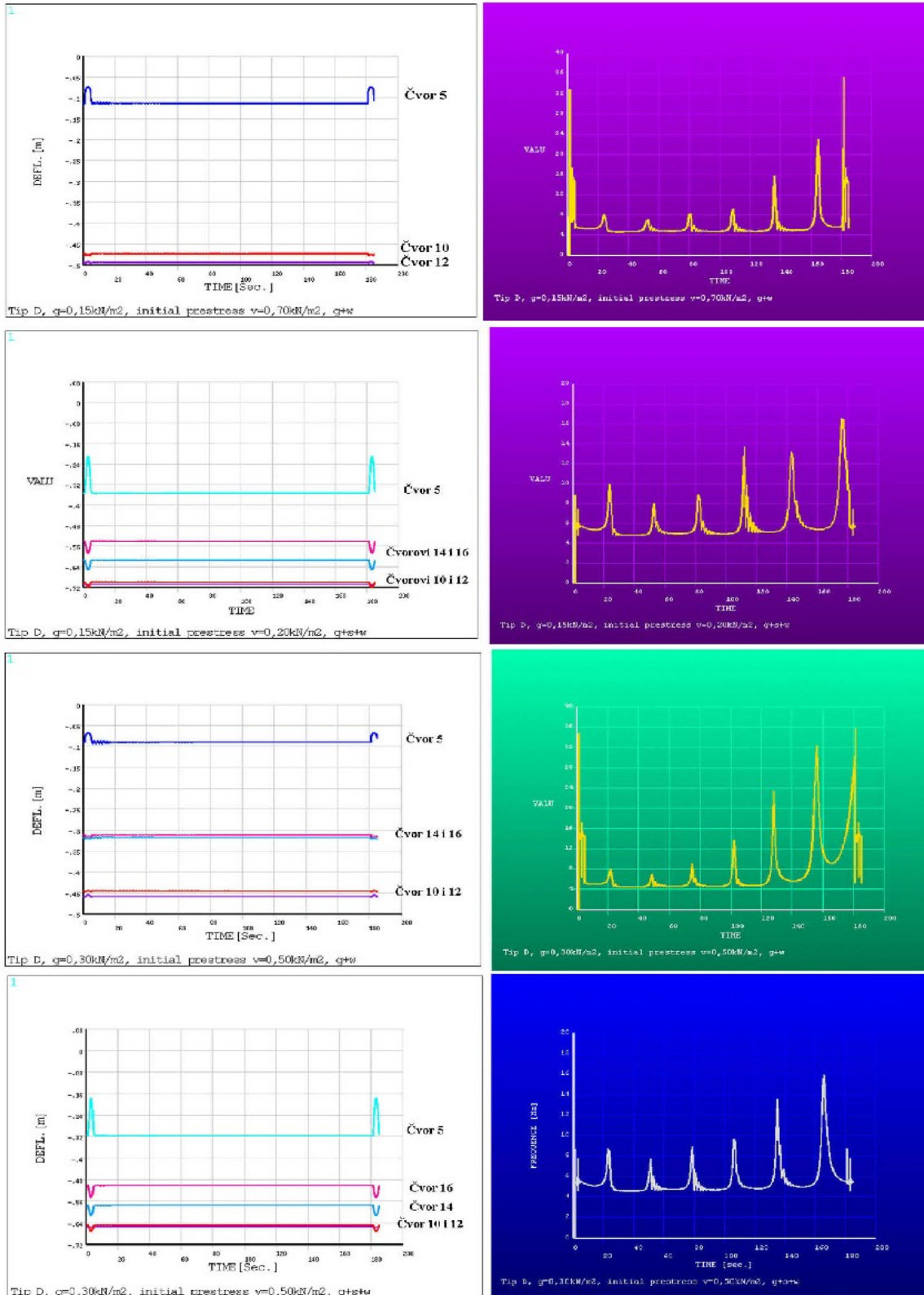
TABELA VII-23

Tipični oblici vertikalnih pomeranja čvorova modela i frekventnog spektra, razvrstani po sličnosti, za modele tipa "D" i "V"

Faza opterećenja		$g+w$							$g+s+w$			
Tip "D"												
Nivo prednapreznja v [kN/m ²]		0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.05	0.10	0.15	0.20
<i>Kombinacija II</i>	0.15	√	√	√	√	√	√	√				
	0.30	√	√	√	√	√	√					
	0.50	√	√	√	√							
	0.75	√	√									
Nivo prednapreznja v [kN/m ²]		0.15	0.20	0.30	0.35	0.50	0.60	0.70	0.05	0.10	0.15	0.20
<i>Kombinacija I:</i> √ <i>Kombinacija III:</i> *	0.15						*	√	√	√	√	√
	0.30					*√			√	√	√	√
	0.50			*	√				√	√	√	√
	0.75	*√	√						√	√	√	√
Tip "V"												
Nivo prednapreznja v [kN/m ²]		0.05	0.10	0.15	0.20				0.05	0.10	0.15	0.20
<i>Kombinacija I</i>	0.15	√	√	√	√					√	√	√
	0.30	√	√	√	√					√	√	√
	0.50	√	√	√	√					√	√	√
	0.75	√	√	√	√				√	√	√	√

Zajedničke slične kombinacije pomenutih dijagrama, koji se javljaju pri karakterističnim kritičnim fazama opterećenja ($g+w_d$ i $g+s+w_d$) ukazuju na nivoe prednapreznja pod kojima se može očekivati ispunjenje dinamičkih uslova stabilnosti (čekirana i zabojena polja Tabele VII-23), tj. da se usled tranzijent pobude - povremenih pobuda vetrom, model brzo umiri do nivoa nižih svojstvenih frekvenci (po mogućstvu I svojstvena frekvenca).

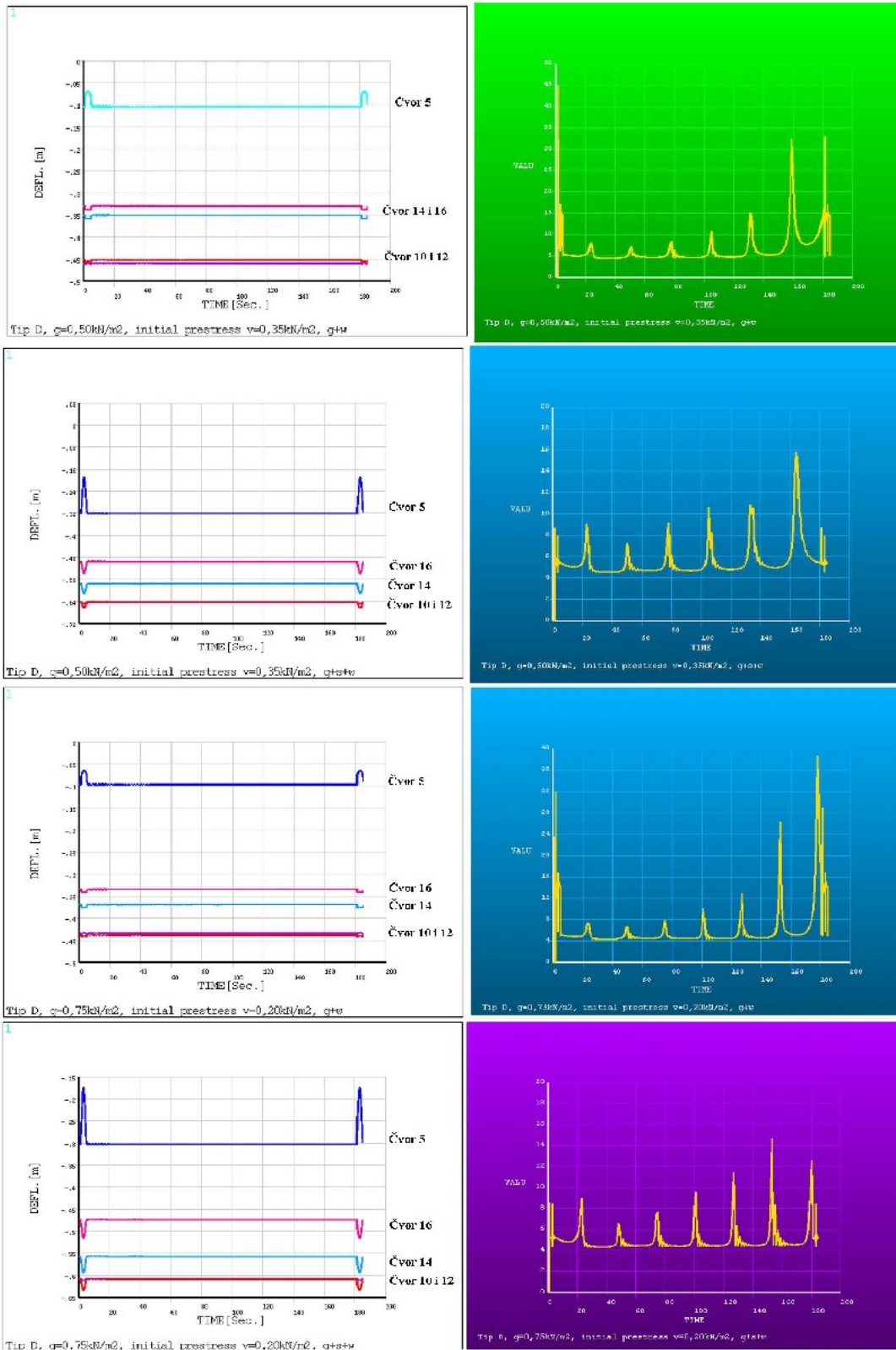
Na sledećim slikama prikazani su dijagrami pomeranja čvorova nosećeg uzeta analiziranih modela „D“ i „V“ i frekventni spektri, za sve predviđjene nivoe prednapreznja (odjeljak VII-8, Tabela VII-7) i kritične faze opterećenja, za koje se može smatrati da se brzo umire do nivoa nižih svojstvenih frekvenci.



SLIKA VII-11

Dijagrami pomeranja usled trenutne pobude vetrom (levo) i frekventnog spektra oscilovanja modela "D" (desno) za vreme delovanja vremenski promenljivih sila od 0sec. do 185sec.

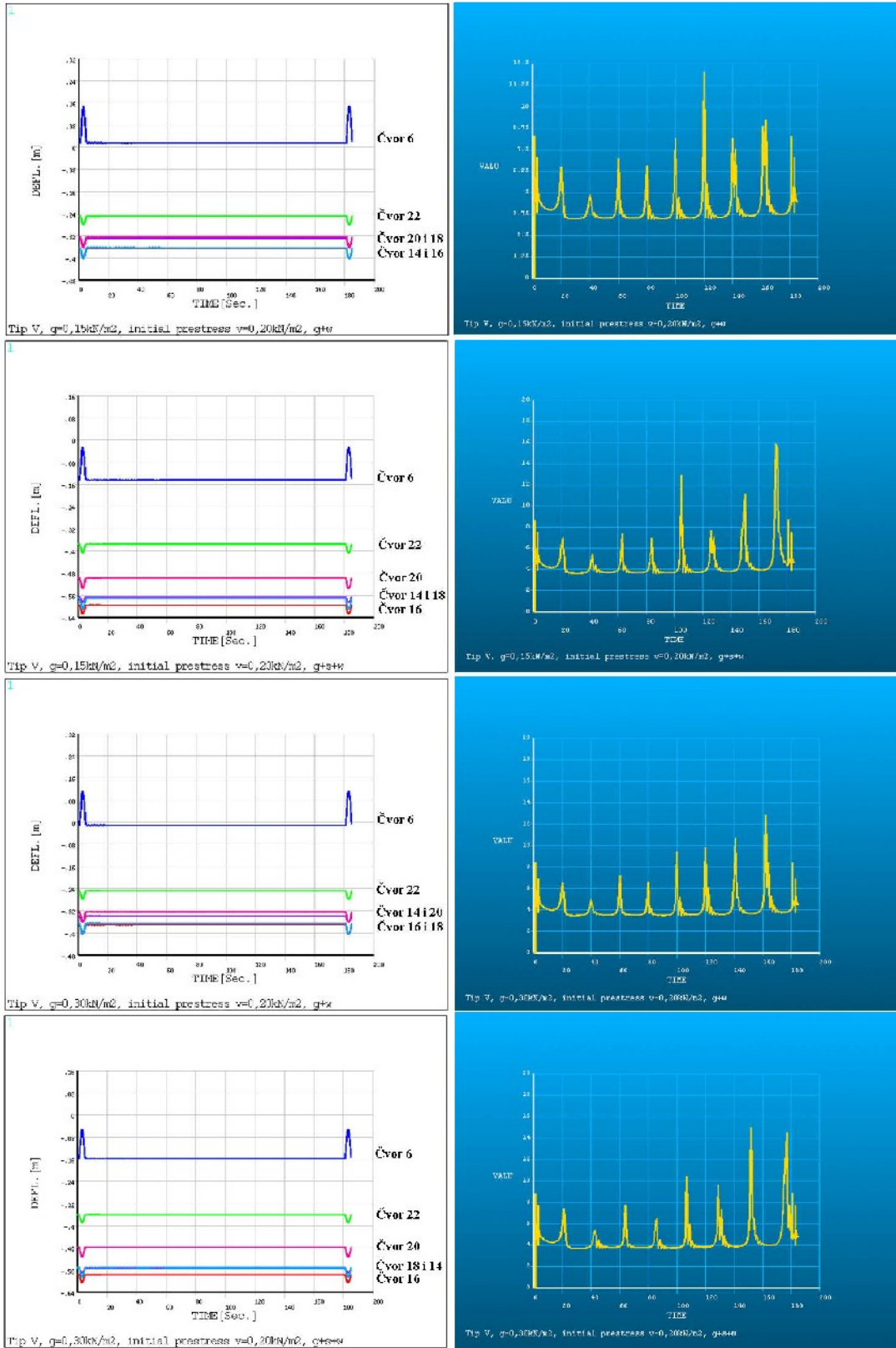
Model "D" za kritične faze opterećenja g+w i g+s+w za klasu opterećenja $g=0.15\text{kN/m}^2$ pri nivou prednaprezanja $v=0.70\text{kN/m}^2$ i $g=0.30\text{kN/m}^2$ pri nivou prednaprezanja $v=0.50\text{kN/m}^2$



SLIKA VII-12

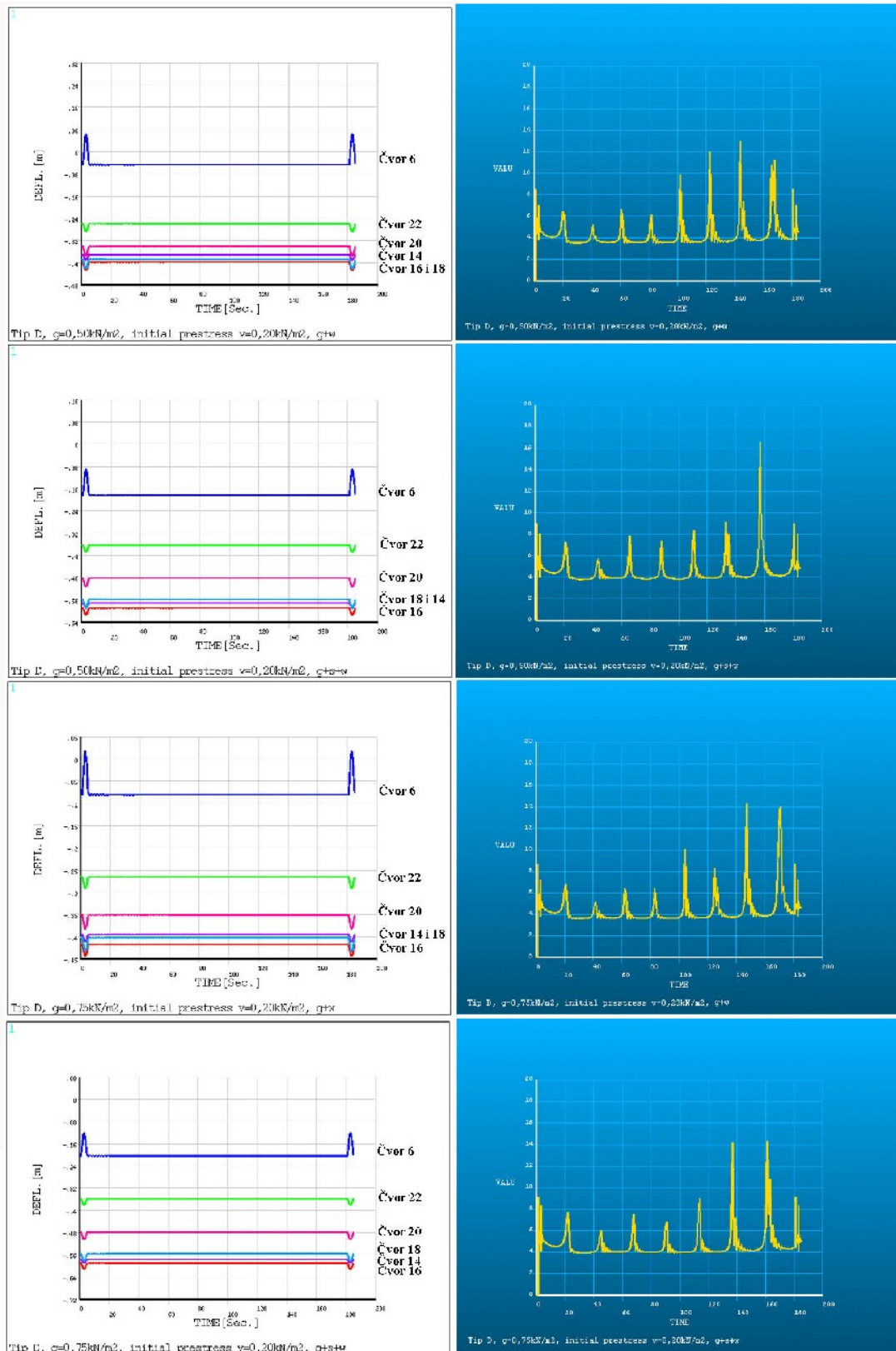
Dijagrami pomeranja usled trenutne pobude vetrom (levo) i frekventnog spektra oscilovanja modela "D" (desno) za vreme delovanja vremenski promenljivih sila od 0sec. do 185sec.

Model "D" za kritične faze opterećenja $g+w$ i $g+s+w$ za klasu opterećenja $g=0.50\text{ kN/m}^2$ pri nivou prednapreznja $v=0.35\text{ kN/m}^2$ i $g=0.75\text{ kN/m}^2$ pri nivou prednapreznja $v=0.20\text{ kN/m}^2$



SLIKA VII-13

Dijagrami pomeranja usled trenutne pobude vetrom (levo) i frekventnog spektra oscilovanja modela "V" (desno) za vreme delovanja vremenski promenljivih sila od 0sec. do 185sec. Model "V" za kritične faze opterećenja $g+w$ i $g+s+w$ za klasu opterećenja $g=0,15kN/m^2$ pri nivou prednapreznja $v=0,20 kN/m^2$ i $g=0,30kN/m^2$ pri nivou prednapreznja $v=0,20 kN/m^2$



SLIKA VII-14

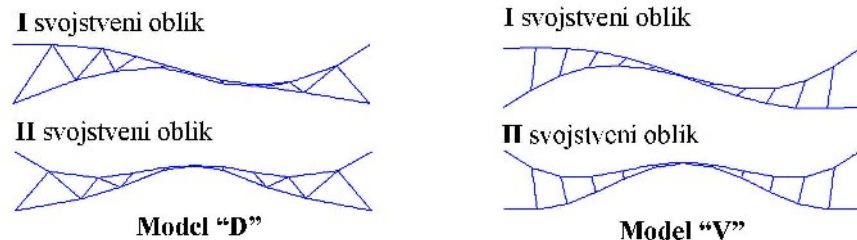
Dijagrami pomeranja usled trenutne pobude vetrom (levo) i frekventnog spektra oscilovanja modela "V" (desno) za vreme delovanja vremenski promenljivih sila od 0sec. do 185sec. Model "V" za kritične faze opterećenja $g+w$ i $g+s+w$ za klasu opterećenja $g=0.50kN/m^2$ pri nivou prednapreznja $v=0.20 kN/m^2$ i $g=0.75kN/m^2$ pri nivou prednapreznja $v=0.20 kN/m^2$

VII-10.5 Analiza odgovora modela za dinamička opterećenja

Analizom svakog modela ponaosob i uporedno, nameću se zaključci o ispunjenosti kriterijuma statičke stabilnosti, definisanih u odeljku III-5, koji moraju biti ispunjeni i za dejstva vremenski zavisnih opterećenja. Međutim, dinamičke analize modela (svojtvene oscilacije, harmonijske oscilacije i oscilacije usled trenutne pobude) ukazale su da treba definisati dinamičke kriterijume stabilnosti visećih prethodno napregnutih struktura.

Iz dosadašnjih analiza može se reći, da kriterijumi pomenuti u odeljku III-5, svakako moraju biti ispunjeni. Konstrukcija mora zadovoljiti sledeće kriterijume stabilnosti da bi bila otporna na uticaj mogućih kombinacija spoljašnjeg dinamičkog i statičkog opterećenja:

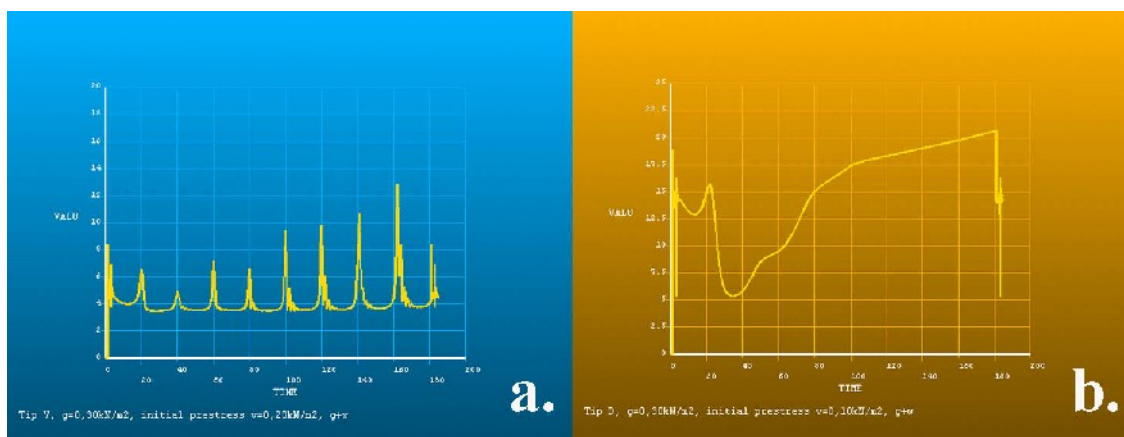
- (1) Nijedan od kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti. Minimalni intenziteti sila ne bi smeli biti manji od 20% sile koja je vladala u užetu u fazi prednaprezanja;
- (2) Svojtveni modalni oblici treba da su što jednostavniji, prikazani na slici VII-15.



SLIKA VII-15

Modalni oblici dinamički otpornih modela: I svojtveni oblik antimetričan, II svojtveni oblik simetričan

- (3) Maksimalne dozvoljene amplitude pomeranja čvorova konstrukcije, usled superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija, treba ograničiti u skladu sa dozvoljenim ugibom, na $\delta_{max}=L/200$, gde je δ_{max} , u stvari, maksimalno pomeranje konstrukcije u odnosu na projektovani položaj (faza opterećenja sopstvenom težinom g);
- (4) Uslovi za postizanje rezonance, usled harmonijske pobude koji dovode do velikih deformacija, moraju biti izbegnuti. Harmonijska pobuda nameće svoju frekvenciju oscilovanja strukturi na koju deluje, tako da će doći do rezonance i velikih deformacija ako su modalne i harmonijske frekvence bliske. Analiza grafika superponiranih modalnih i harmonijskih amplitudnih promena za frekventni opseg harmonijske pobude daće odgovor o mogućoj pojavi velikih deformacija i rezonance;
- (5) Usled tranzijent pobude - povremenih udara vetrom, model treba „brzo“ da se umiri do nivoa nižih svojtvenih frekvenci (po mogućstvu I). Punom tranzijent analizom treba pribaviti dijagrame promene frekvencija. Mogući oblici ovih dijagrama ukazuju na model koji osciluje u I svojtvenom obliku sa ritmičnim treptajima (Slika VII-16.a), i model koji „luta“ u potrazi za svojtvenim oblikom oscilovanja (Slika VII-16.b), pa se ne može smatrati dovoljno otpornom konstrukcijom u dinamičkom smislu.


SLIKA VII-16

Dijagrami promena frekvencija: a) dinamički otporan model, b) dinamički neotporan model

Stabilnost usvojenih modela usled dejstava dinamičkih opterećenja biće analizirana u odnosu na upravo definisane kriterijume dinamičke stabilnosti. Ispunjenost postavljenih kriterijuma u celosti ili delimično, daće odgovor na rešenje problema stabilnosti modela kablovskih rešetki tipa “D” i “V”.

TABELA VII-24 Ispunjenost kriterijuma dinamičke stabilnosti (√ - ispunjen)

Tip modela Kategorije sopstvene težine, nivoi prednaprezanja	Tranzijent analiza					Amplitude usled superpozicije modalnih i harmon. osc.	Jednost. modalni oblici	
	Noseće uže	Predn. uže	Amplit.	Nenapregn. štapovi	Frekventni spektar dinam. otpornog modela			
Tip “D”		S dozv. < S kidanja		čvor 5	Predn. *	g+w i g+s+w	čvor 5	I i II ton
g=0.15	v=0.15	√	√	√	X (30%)	X	√	X
	v=0.20	√	√	√	X (34%)	X	X	X
	v=0.70	X(+10%)	√	√	X (61%)	√	X(+6%)	√
g=0.30	v=0.15	√	√	√	X (33%)	X	X	X
	v=0.20	√	√	√	X (38%)	X	X	X
	v=0.50	√	√	√	X (58%)	√	X(+3%)	√
g=0.50	v=0.15	√	√	√	X (33%)	X	X	X
	v=0.20	√	√	√	X (39%)	X	X(+11%)	X
	v=0.35	√	√	√	X (49%)	√	X(+10%)	√
g=0.75	v=0.10	√	√	√	X (31%)	X	√	X
	v=0.15	√	√	√	X (36%)	X	X(13%)	√
	v=0.20	√	√	√	X (40%)	√	X(10%)	√
Tip “V”		S dozv. < S kidanja		čvor 6	Predn. *	g+w i g+s+w	čvor 6	I i II ton
g=0.15	v=0.10	√	√	√	X (5%)	√	√	X
	v=0.15	√	√	√	X (12%)	√	√	√
	v=0.20	√	√	√	X (18%)	√	√	√
g=0.30	v=0.10	√	√	√	X (8%)	√	√	X
	v=0.15	√	√	√	X (15%)	√	√	√
	v=0.20	√	√	√	X (22%)	√	√	√
g=0.50	v=0.10	√	√	√	X (9%)	√	√	X
	v=0.15	√	√	√	X (16%)	√	√	√
	v=0.20	√	√	√	X (22%)	√	√	√
g=0.75	v=0.10	√	√	√	X (10%)	√	√	X
	v=0.15	√	√	√	X (17%)	√	√	√
	v=0.20	√	√	√	X (23%)	√	√	√

* X – sile zatezanja postoje u štapovima, tj. nema pritisnutih, nenapregnutih štapova. U zagradi je odnos učešća minimalne sile u štapovima prednaprežućeg kabla u odnosu na stanje prednaprezanja.

VII-10.6 Zaključna analiza odgovora modela za dinamička opterećenja

Postavljeni kriterijumi ispunjeni u celosti ili delimično, daju odgovor na rešenje problema stabilnosti kablovskih rešetki na statička i dinamička opterećenja. Pri tome neki od analiziranih modela:

- ne mogu se prihvatiti kao stabilne strukture (N), jer je dinamičkom tranzijent analizom, za vremenski zavisna opterećenja, utvrđen nivo treperenja i frekventnog odziva kao na slici VII-16.b, modalni oblici nisu jednostavni ili je došlo do amplituda koje su veće od $\delta_{max}=L/200$, minimalne sile u prednaprežućim užadima su manje od 20% u odnosu na silu prednaprezanja;
- mogu se prihvatiti kao stabilne strukture za dejstvo vremenski zavisnog opterećenja od vetra (DynR - dinamički otporne), jer je utvrđen nivo treperenja i frekventnog odziva kao na slici VII-16.a, modalni oblici su jednostavni, a došlo je do amplituda koje su na granici $\delta_{max}=L/200$.

Tabela VII-25 daje očiglednu predstavu dinamički stabilnih modela prema kategorijama krovnog opterećenja i nivoima prednaprezanja.

TABELA VII-25 Ispunjenost kriterijuma dinamičke otpornosti

Tip modela	Nivoi prednaprezanja	Kategorije krovnog opterećenja			
		g=0.15	g=0.30	g=0.50	g=0.75
Tip "D"	v=0.15	N	N	N	N
	v=0.20	N	N	N	DynR
	v=0.35	N	N	DynR	
	v=0.50	N	DynR		
	v=0.70	DynR			
Tip "V"	v=0.10	N	N	N	N
	v=0.15	N	N	N	N
	v=0.20	DynR	DynR	DynR	DynR

N - neotporan,

DynR - dinamički otporan

VII-11 Sveobuhvatna ocena stabilnosti modela na statička i dinamička opterećenja

Sveobuhvatna ocena stabilnosti na dejstvo primenjenih statičkih i dinamičkih opterećenja, može se oceniti upoređivanjem Tabele VII-15 i Tabele VII-25. Neke, uslovno statički stabilne strukture tipa "V" pokazale su se kao dinamički otporne, a sa druge strane, statički stabilne pokazale su se kao dinamički neotporne konstrukcije.

Praktično, Tabela VII-25 predstavlja sveobuhvatnu ocenu stabilnosti svih ispitivanih modela na dejstvo statičkih i dinamičkih opterećenja, definisanih u odeljcima VII-2 do VII-9.

Eksperimentalna analiza dvopojasne lančanice

VIII-1 Uvod

Sportsko rekreacioni centar "Zdravlje" u Leskovcu objedinjuje dve konstruktivno nezavisne, a funkcionalno povezane dvorane od kojih je jedna za male sportove, a druga sadrži plivačke bazene (*odjeljak II-6.3*). Obe dvorane su raspona 60m, pa je krovna konstrukcija formirana od sistema dvopojasnih lančanica u vertikalnoj ravni (kablovska prethodno napregnuta rešetka). Projekat konstrukcije krova i većinu elemenata viseće konstrukcije (užad sa fiksnim kotvama zalivenim rastopljenim cinkom) izradila je i dopremila korporacija "TensoTeci" iz Milana. Isporučena žičana užad $\Phi 50\text{mm}$ i $\Phi 26\text{mm}$, atestirane su na osnovu ispitivanja probnih uzoraka u Laboratoriji milanske Politehnike [33], [43], [72] i [100].

Krov dvorane za male sportove montirali su stručnjaci "TensoTeci"-ja 1987. godine. Tada je ta dvorana i stavljena u funkciju. Oslonačka konstrukcija visećeg krova za dvoranu sa plivačkim bazenima završena je 1992, ali je izvođač radova zbog sankcija prema SRJ odbio da dokompletira konstrukciju sa odgovarajućom dokumentacijom i izvrši njenu montažu. Tadašnji "Fond za fizičku kulturu" i JP "Direkcija za građevinsko zemljište i puteve" opštine Leskovac želeli su da objekat pokriju pa je angažovano privatno preduzeće "Mikroprocesor" iz Surdulice. U leto 1993. izvršena je montaža krovnih lančanica, koje su formirane od elemenata koje je isporučio prvi izvođač radova i elemenata koji su izrađeni u Srbiji. Iste godine izvršena je delimična montaža krovne konstrukcije.

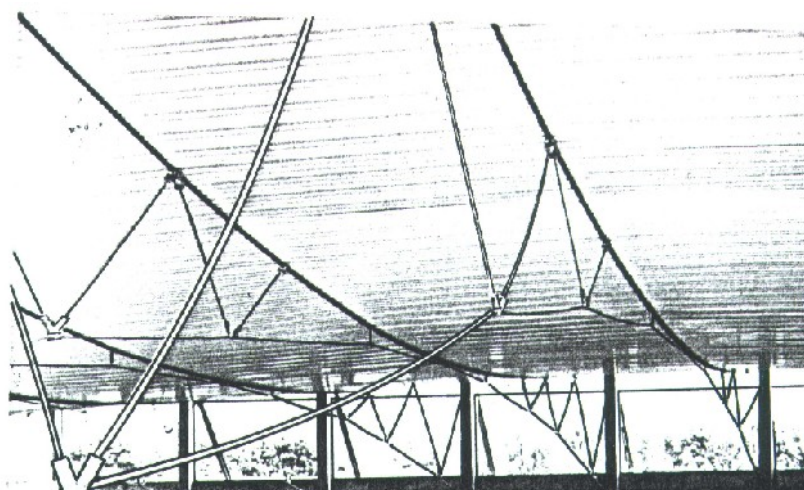
Nedovoljne sile prednaprezanja krovnih lančanica prouzrokovale su nestabilnost kablovskih rešetki (*Slika VIII-1*), pa je investitor angažovao Institut za građevinarstvo i arhitekturu GAF iz Niša da uradi ekspertizu, Institut za materijale i konstrukcije GF iz Beograda za superkontrolu i PP "Mikroprocesor" da okonča radove na prednaprezanju dvopojasnih lančanica i time konstituiše sistem krovne konstrukcije.

VIII-2 Analiza zatečenog stanja

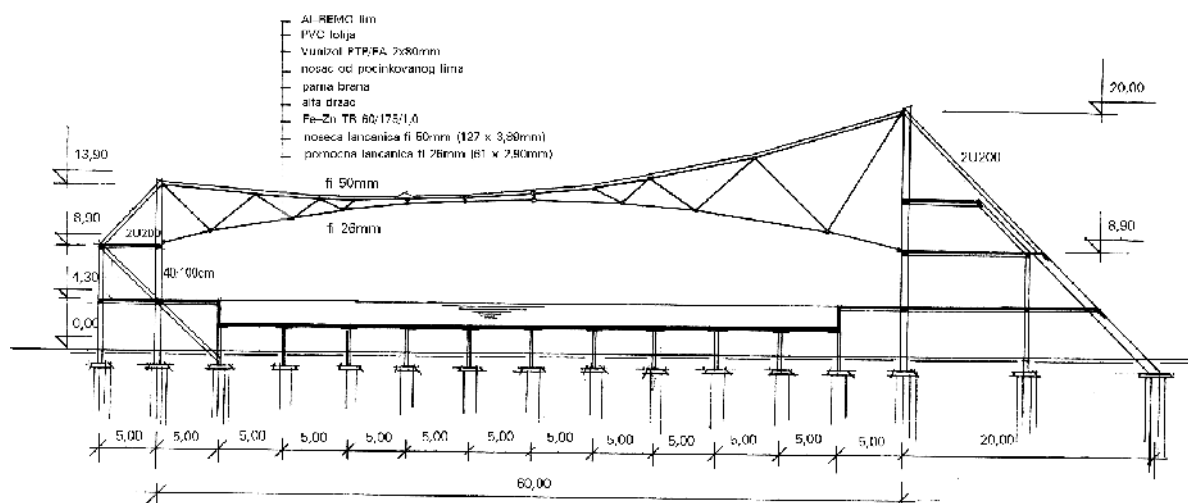
Na osnovu pregleda dostupne dokumentacije i naknadno sprovedene teorijske analize, na osnovu pregleda konstrukcije i merenja na licu mesta, utvrđeno je da je sistem dvopojasnih lančanica opušten-nestabilan. Štapovi ispune (dijagonale) i štapovi donjeg pojasa nisu imali dovoljnu silu zatezanja, pa je cela konstrukcija oscilovala pod uticajem malih spoljašnjih opterećenja veoma malog intenziteta. S obzirom da se radi o konstrukciji kod koje treba da su svi štapovi zategnuti, čak i

usled delovanja najvećeg gravitacionog opterećenja, bilo je očigledno da krov nije stabilan, što je bilo uslovljeno nepostojanjem sile zatezanja u kابلu donjeg pojasa. Pored toga, izvršen je detaljan pregled krovnih lančanica i njenih vitalnih elemenata u dvorani i tom prilikom je ustanovljeno:

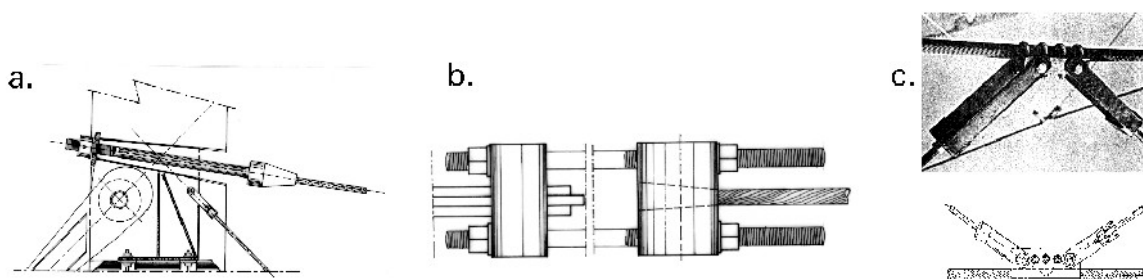
- čelična užad su u odličnom stanju, fabrička zaštita žica cinkom nije oštećena, a naknadna zaštita temeljnom bojom sasušila se i otpada sa kablova zbog slabog prijanjanja uz žice kablova,
- ankeri, tj. fiksni završeci užadi, nisu pokazali nikakve znake oštećenja,
- zavrtnji sa maticama M80 za fino podešavanje dužine nosećih kablova ($\Phi 50\text{mm}$) nisu korodirali zbog površinske zaštite cinkom, koji je nanesen elektrohemijskim postupkom (Sl.VIII-3a),
- dugi zavrtnjevi deklarirani kao M30 za zatezanje donjih (prednaprežućih, stabilizujućih) kablova ($\Phi 26\text{mm}$) oštećeni su korozijom, s obzirom da nisu bili zaštićeni od delovanja atmosferskih uticaja (Sl.VIII-3b). Pored toga, merenjem je konstatovano da su ovi zavrtnji M27 i da su oni izrađeni od materijala nepoznatog porekla. Nakon probnog utezanja jednog krovnog nosača, navoji su popustili, te je bilo neophodno zameniti ih elementima u skladu sa "Projektom za izgradnju sportskog centra".
- zavrtnjevi čvornih elemenata, za vezu štapova ispune sa pojasnim kablovima, slabijeg su kvaliteta (klase 5.6 umesto 8.8). Navoj duž celog tela zavrtnja izazvao je na pojedinim mestima eliptično proširenje otvora na čvornim elementima (Sl.VIII-3c). Svi zavrtnjevi su zamenjeni, tako da i po geometriji i po vrsti materijala odgovaraju projektu.
- na armiranobetonskoj oslonjačkoj konstrukciji nisu zapažena nikakva oštećenja, pa je konstatovano da je ona sposobna da primi uticaje iz lančanica,
- čelične zatege od toplo valjanih profila 2U200 propisno su ankerovane i zaštićene bojom odgovarajućeg kvaliteta, pa se nije ni sumnjalo u njihovu ispravnost.



SLIKA VIII-1 Izgled srednjih lančanica pre zatezanja



SLIKA VIII-2 Presek kroz dvoranu sa plivačkim bazenima



SLIKA VIII-3 Skice čvornih elemenata

VIII-3 Način i metod ispitivanja konstrukcije

Ovakav konstruktivni sistem visećeg krova, u obliku kablovske rešetke između nepokretnih oslonaca, mora biti prethodno napregnut dovoljno velikim silama zatezanja, da bi konstrukcija bila stabilna za uticaj nesimetričnog opterećenja i da bi se dinamički efekti sveli na najmanju moguću meru.

Sila prethodnog napreznja ostvaruje se zatezanjem donjeg kabla i njihovim ankerovanjem preko specijalne kotve. Žice gornje i donje lančanice su patentirane, a računski prekidni napon užeta iznosi 1570MPa. Formiranje užeta izvršeno je mašinski. Kablovska rešetka kao glavni krovni vezač sastoji se iz dva užeta, nosećeg $\Phi 50\text{mm}$ i stabilizujućeg $\Phi 26\text{mm}$, koja su međusobno povezana dijagonalama i vertikalama. Na krajevima kablova su fiksni ankeri, preko kojih se ostvaruje veza sa betonskim delom konstrukcije. Oni su snabdeveni maticama za podešavanje (gornji kabl) i dugim visokovrednim zavrtnjevima klase 10.9 za unošenje sila prednapreznja (donji kabl). Zatezanje donjih užadi vrši se obostrano, ravnomernim uvrtanjem matica na duge visokovredne zavrtnje M30 klase 10.9 sa uvaljanim navojima, površinski zaštićenim cinkom, koji je nanesen elektrohemijskim postupkom. Zatezanju užadi pristupilo se pošto su geodetskim putem izmerene koordinate čvorova u nultom položaju konstrukcije.

Parametri konstrukcije koji su proveravani na licu mesta kod svih kablovskih rešetki KR-1 do KR-8, su: izduženje donjeg stabilizujućeg kabla, sile u krajnjim štapovima stabilizujućeg kabla merene specijalnim mehaničkim instrumentom, vertikalno pomeranje srednje tačke kablovske rešetke u odnosu na "nulti položaj".

Upoređivanjem izmerenih sila u krajnjim štapovima stabilizujućeg kabla svih dvopojasnih kablovskih rešetki (KR-1 do KR-8) i izmerenih vrednosti odgovarajućih vertikalnih pomeranja njihovih središnjih čvorova, sa odgovarajućim teorijski dobijenim veličinama, ustanovljena je podudarnost koja se kretala od 95% do 100%.

Posebna pažnja posvećena je središnjoj kablovskoj rešetki, sa oznakom KR-5, jer od svih osam kablovskih rešetki ima najmanju strelu, ali najveću silu prednaprezanja u stabilizujućem kablu. Zbog toga su izvršena merenja sila u stabilizujućem kablu, snimanje geometrije samog nosača kablovske rešetke, kao i svojstvene vibracije nosača.

Parametri konstrukcije koji su mereni na kablovskoj rešetki KR-5 su:

- skraćenje zatezanjem donjeg, stabilizujućeg kabla, tj. relativni položaj matice na dugačkom visokovrednom zavrtnju u odnosu na cilindar ankera. Skraćenje je mereno graduisanim čeličnim razmernikom,
- sile u štapovima stabilizujućeg kabla merene specijalnim mehaničkim instrumentom za debljinu užadi do $\Phi 26\text{mm}$,
- vertikalno pomeranje tačaka kablovske rešetke u odnosu na "nulti položaj". Pomeranja su registrovana geodetskim postupkom,
- dinamičko ispitivanje kablovske rešetke KR-5 inercijalnim dinamičkim instrumentima u cilju dobijanja frekvencije slobodnih oscilacija nosača.

VIII-4 Instrumenti

Za pribavljanje statičkih i dinamičkih karakteristika izabranog nosača korišćeni su raspoloživi odgovarajući instrumenti.

VIII-4.1 Instrumenti za statičko ispitivanje

Odredjivanje sila u kablovskim konstrukcijama moguće je uz pomoć mehaničkih instrumenata. Ovakvi instrumenti postoje za različite debljine užadi i merne opsege. Prednost mehaničkih instrumenata je u jednostavnom rukovanju i direktnom očitavanju izmerenih vrednosti.

Princip rada mehaničkih instrumenata zasniva se na ravnoteži opruge poznate krutosti. Delovanjem koncentrisane sile u sredini baze instrumenta, kabl se previja. Previjanje kabla pri merenju je uvek konstantna veličina, $a = \text{const}$. Elastična sila iz kabla na prevoju u sredini baze preko opruge i sistema poluga, stvara otklon kazaljke instrumenta. Sila u kablu dobija se očitavanjem sa dijagrama ili iz tabele za posebno kalibrisan tip i poprečni presek kabla. Tako dobijeni rezultati merenja sila u kablovima su sa tačnošću od $\pm 1\%$.

Merenje na prototipu konstrukcije kablovske rešetke objekta sa bazenima, izvršeno je aparatom "Seilspannungsmesser" proizvođača "Amsler" iz Nemačke (*Slika VIII-5*). Konstrukciona šema instrumenta prikazana je na *Sl. VIII-6*. Instrument se sastoji iz

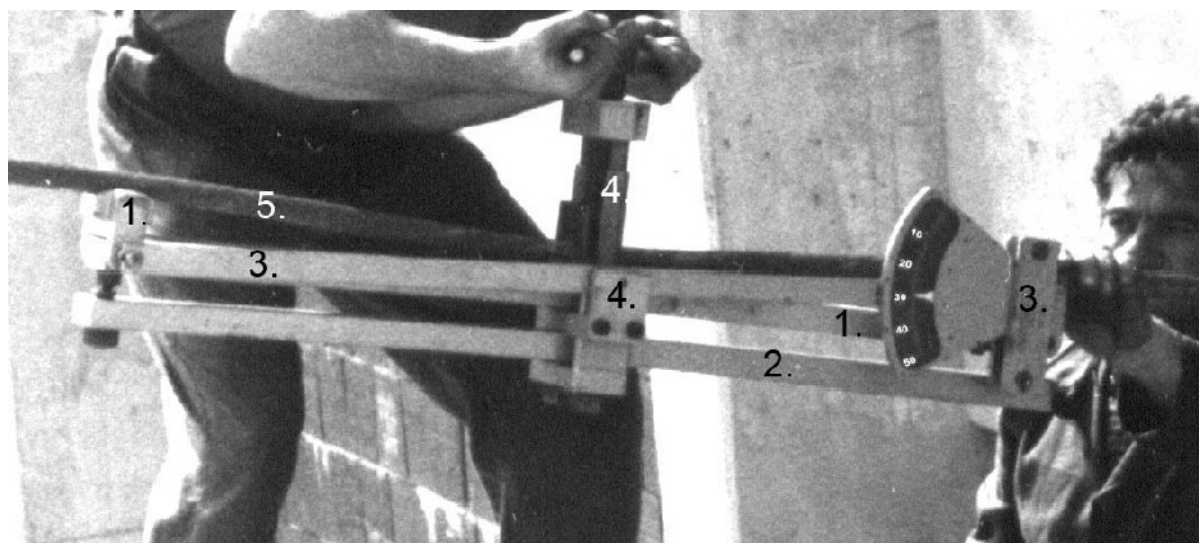
tela (1), elastične metalne poluge ili opruge poznate krutosti (2), sistema poluga (3) i mehanizma za delovanje na užu u sredini baze instrumenta (4).

Kinematička šema instrumenta (Slika VIII-6), preko sličnosti trouglova i poznatih fizičkih konstanti, daje izraze za određivanje uvećanja tenzometra U_t , kao i sile u kablu S .

Uvećanje tenzometra dato je izrazom: $U_t = \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3}$, gde su h_1 do h_4 odgovarajuće visine poluga. Otklon kazaljke instrumenta je $\Delta \check{c}$, tako da pomeranje elastične poluge (2) označeno sa Δl_2 možemo izraziti kao $\Delta l_2 = \frac{\Delta \check{c}}{U_t}$. Kalibrisanje instrumenta za različite poprečne preseke kablova, zahteva uspostavljanje odnosa Δl_2 u funkciji A i E za jediničnu dilataciju u užetu, tj:

$$U_t = \frac{\Delta \check{c}}{\Delta l_2} = \frac{\Delta \check{c}}{\frac{l}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{16(aAE)^2}{l^2 K^2 \left[\left(\frac{l}{2}\right)^2 + a^2 \right]}} \right]} = \frac{2 \cdot \Delta \check{c}}{l \cdot T_k} \quad \text{VIII-1}$$

Gde je T_k = konstanta tenzometra za jediničnu dilataciju u kablu.

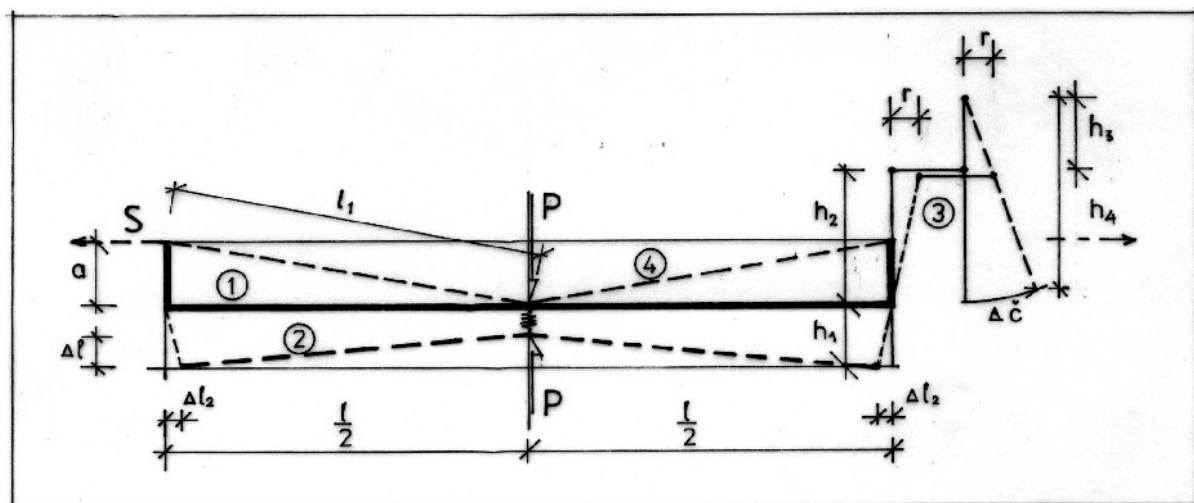


SLIKA VIII-5 Instrument "Amsler" za merenje sila u kablovima

TABELA VIII-1

Tehničke karakteristike instrumenta "Amsler" za merenje sila u kablovima

Tip – Model	Amsler
Prečnik kabla	½" – 1"
Merni opseg	50 kN – 275 kN
Dimenzije instrumenta	150 x 30+20 x 12 cm
Težina instrumenta	22kg
Tačnost	±1%


SLIKA VIII-6

Instrument "Amsler" za merenje sila u kablovima – Kinematička šema instrumenta

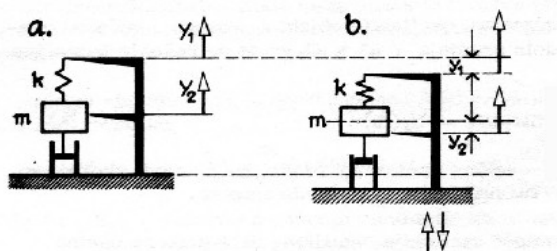
Ravnoteža elastične sile u kablu, čija je reakcija sila P u mehanizmu za savijanje kabla i elastične sile opruge koja se suprotstavlja sili P , daje izraz za silu S u užetu u funkciji krutosti opruge (K), uvećanja tenzometra za odgovarajući presek užeta i moduo elastičnosti i očitane vrednosti na skali instrumenta (izraz VIII-2).

$$S = \frac{K}{2a} \sqrt{\frac{\Delta \check{c}}{U_t} \cdot \left[\frac{\Delta \check{c}}{U_t} - l \right]} \quad \text{VIII-2}$$

VIII-4.2 Instrumenti za dinamičko ispitivanje

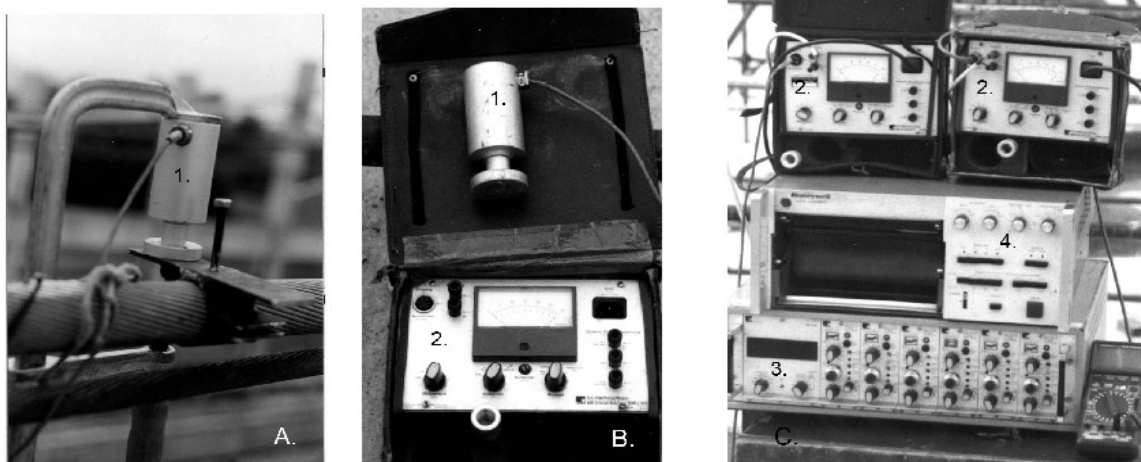
Svaki konstruktivni sistem ima sopstvene oscilacije sa odgovarajućom učestalošću koje su svojstvene tom statičkom sistemu, a zavise od njegove konfiguracije, mase, dilatacije, elastičnosti i karaktera oslanjanja. Oscilacije prethodno napregnutih kablovskih sistema zavise i od njihove zategnutosti. Osnovni dinamički parametar svojstvenih vibracija, koji se može izmeriti, je perioda oscilacija.

Dinamička ispitivanja zasnivaju se na principima inercije. Inercijalni instrumenti sadrže osetljive elemente (masa učvršćena za oprugu, odnosno za telo pribora) koji se čvrsto povezuju za telo koje osciluje (Slika VIII-7). Kretanje mase se amortizuje pomoću uređaja koji apsorbiraju energiju oscilovanja. Mehanička energija oscilovanja se preko posrednika pretvara u električne veličine pogodne za prikaz na ekranu mernog instrumenta i beleži na pokretnoj traci pomoću oscilografa (Slika VIII-8).


SLIKA VIII-7

Šema uređaja za merenje oscilacija objekta

Dinamički zapis oscilacija kablovske rešetke KR-5 dobijen uz pomoć dva dinamička, inercijalna, električna merna instrumenta SMU 300, koji su bili povezani za konstrukciju. Električni impulsi sa davača (1) i (2), pojačavani su (3) i registrovani na oscilografu (4) sa osetljivom foto hartijom koja se kreće konstantnom brzinom (Slika VIII-8).



SLIKA VIII-8

a) Davač impulsa instrumenta SMU 300 pričvršćen za konstrukciju, b) Inercijalni merni instrument SMU 300, c) Baza instrumenta, pojačivač impulsa i oscilograf

VIII-4.3 Dobijeni rezultati

VIII-4.3.a Rezultati statičkog ispitivanja

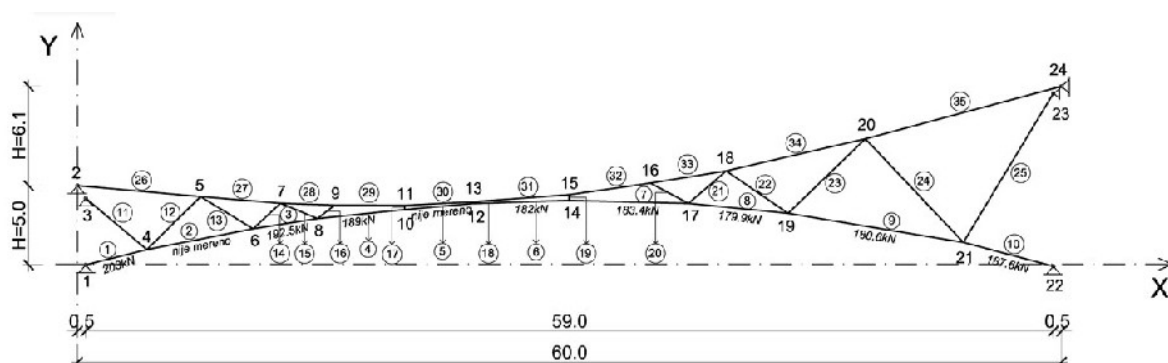
Numeričke vrednosti merenja na KR-5 date su u *Tabeli VIII-2* i *Tabeli VIII-3* i na samoj dispoziciji modela (Slika VIII-9). Merenja na konstrukciji izvršili su dr Ljubomir Vlajić (Institut za materijale i konstrukcije GF iz Beograda) i mr Dragan Kostić (Institut za građevinarstvo i arhitekturu GAF iz Niša).

Merenja su vršena u vreme zatezanja stabilizujućeg kabla, što znači da je bilo moguće geometriju nosača dobiti za rasterećeno stanje nosača (nulta faza opterećenja) i fazu prednaprezanja (I faza opterećenja, tj. referentni položaj konstrukcije).

Sile u štapovima merene su samo u stabilizujućem kablu na mestima do kojih je fizički bilo moguće prići pokretnom skelom. Sile u štapovima nosećeg kabla nisu mogle biti merene jer je instrument predviđen za merenja na kablovima preseka manjeg od $\Phi 26\text{mm}$. Sile u štapovima ispune, takodje, nisu mogle biti merene jer su štapovi izradjeni od visokovrednog čelika punog kružnog poprečnog preseka.

TABELA VIII-2 Ordinate čvorova gornjeg - nosećeg kabla

RASTEREĆEN NOSAČ	11,12	10,84	10,75	10,72	10,85	11,27	Nije mereno	Nije mereno	Nije mereno	ostonac
PRETHODNO NAPREGNUT NOSAČ	11,10	10,72	10,56	10,52	10,67	11,12	Nije mereno	Nije mereno	Nije mereno	ostonac
POMERANJE	-0,02	-0,12	-0,19	-0,20	-0,18	-0,15	-	-	-	0,00
ČVOR	5	7	9	11	13	15	16	18	20	24



SLIKA VIII-9 Dispozicija KR-5 sa merenim silama u štapovima stabilizujućeg kabla

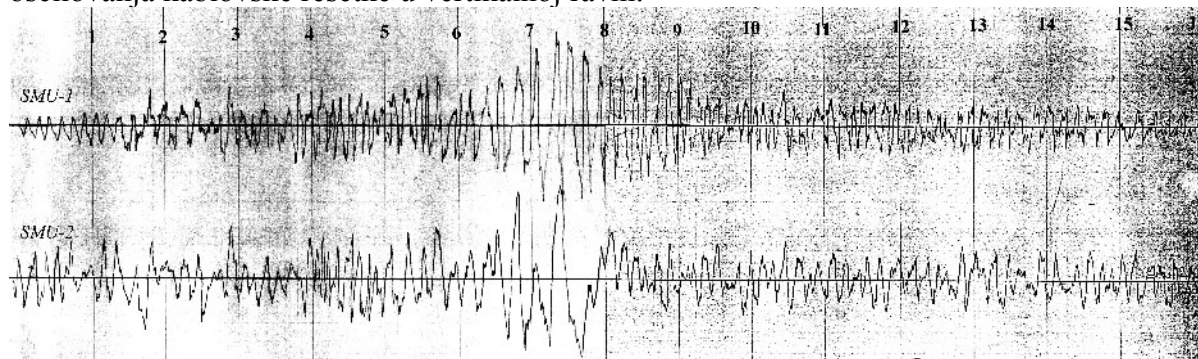
TABELA VIII-3 Ordinate čvorova donjeg - stabilizujućeg kabla

RASTEREĆEN NOSAČ	mereno/nije										
PRETHODNO NAPREGNUT NOSAČ	Nije mereno	9.33	9.97	10.51	10.80	10.97	10.65	10.00	8.31	oslonac	
POMERANJE		-0.15	-0.21	-0.20	-0.195	-0.15	-0.07	-0.025	-0.025	0.00	
ČVOR		4	6	8	10	12	14	17	19	21	22

VIII-4.3.b Rezultati dinamičkog ispitivanja

Dinamičko ispitivanje izvršeno je sa dva inercijalna električna aparata tip SMU300, pričvršćena za konstrukciju kablovske rešetke KR-5 i to SMU-1 u čvoru 13, a SMU-2 u čvoru 9. Takođe, pored inercijalnih aparata, zalepljene su i merne trake, ali zbog lošeg kvaliteta zapisa u kasnijem radu podaci dobijeni mernim trakama nisu korišćeni. Merenja na konstrukciji izvršili su mr Dragan Kostić (Institut za građevinarstvo i arhitekturu GAF iz Niša) i Radošević Mirko, dipl.inž.gradj. (Laboratorija za ispitivanje konstrukcije "Mostogradnja" iz Beograda).

Dinamičkim ispitivanjem dobijen je grafički zapis treperenja kablovske rešetke KR-5, istovremenim beleženjem impulsa sa aparata SMU-1 i SMU-2. Grafički zapis je prikaz oscilacija čvorova 9 i 13 konstrukcije i njihovih relativnih pomeranja u funkciji vremena za vremenski interval od 16 sekundi, pobudjen trzajem otpuštenog tereta od 75kg. Matematičkom analizom zapisa pribaviće se periode dominantnih svojstvenih oblika oscilovanja kablovske rešetke u vertikalnoj ravni.



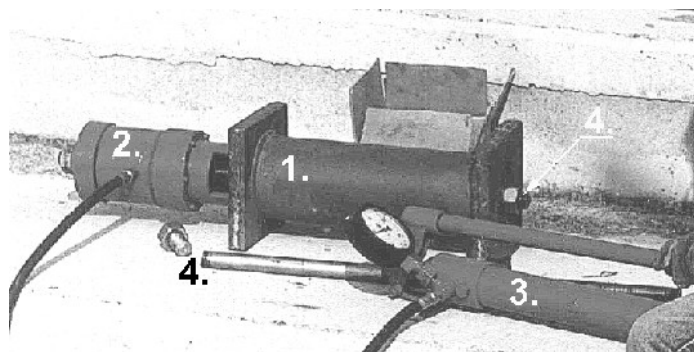
SLIKA VIII-10 Grafički zapis vibracija kablovske rešetke KR-5

VIII-5 Metod provere kritičnih elemenata

Analiza problema i probno zatezanje jedne krovne lančanice, pokazali su da nije moguće izvršiti prethodno naprezanje u zatečenom stanju usled nedostataka koji su napred navedeni. Iz tih razloga izvršena je nabavka novih visokovrednih zavrtnjeva i matica M30 kvaliteta 10.9 sa uvaljanim navojima, površinski zaštićeni elektrohemijskim postupkom. S obzirom da je proizvođač potvrdio samo kvalitet materijala, neophodno je bilo pre ugradnje izvršiti proveru koeficijenta sigurnosti zavrtnjeva u odnosu na maksimalnu silu zatezanja. Sama provera izvršena je za sve dopremljene zavrtnjeve i matice. Metod provere sastojao se u zatezanju zavrtnjeva silom koja je bar dvostruko veća od očekivane sile u krajnjim štapovima donjeg pojasa za fazu prednaprezanja (200kN). U fazi prednaprezanja donji kabl ($\Phi 26\text{mm}$) izložen je najvećim silama, pa je ta faza opterećenja merodavna za uticaje u visokovrednim zavrtnjevima. Svaki novougradjeni zavrtnj, proveren je za silu od 200kN, a u skladu sa kriterijumom opisanim u odeljku III-3.3.1.

SLIKA VIII-11

Aparat za proveru kritičnih elemenata



Aparat za proveru zavrtnjeva sastojao se iz čelične cevi sa odbojnicima (1) i specijalno konstruisane hidraulične prese (2), nominalne sile 250kN sa baždarenim manometrom (Sl.VIII-11) [104]. Hidraulička presa povezana je sa ručnom pumpom (3) preko armiranog gumenog creva. Svaki zavrtnj (4) izlagan je sili od 200kN u šest ciklusa opterećenja zatezanjem i rasterećenjem. Inače, maksimalna sila koju jedan zavrtnj na konstrukciji u fazi prednaprezanja preuzima je 90kN.

Provera kritičnih elemenata pokazala se opravdanom, jer je prilikom njihovog zatezanja došlo do kidanja četiri od trideset dva zavrtnja, pa su oni naknadno isporučeni, ispitani i montirani.

Poglavlje IX

Teorijsko - eksperimentalna analiza rezultata

IX-1 Dijagnostika statičkih parametara

IX-1.1 Uvod

Model konstrukcije kablovske rešetke KR-5 prikazan je na slici VIII-9. Pri tome oslonci nosećih kablova su na +13,90m, odnosno na +20,00m, a za stabilizujući kabl oba oslonca su na +8,90m. Zbog velikih horizontalnih sila u osloncima lančanica, izvršeno je rasterećenje stubova ubacivanjem kosih čeličnih zatega 2UP200mm. Oslonci lančanica su na AB ramovima pa se smatra da su oslonci kablova nepokretni.

Krovni vezač prima opterećenje od konstrukcije lakog krovnog pokrivača $g=0,45\text{kN}/\text{m}^2$ i povremenog opterećenja od snega $s=1,00\text{kN}/\text{m}^2$ i vetra $w=-0,48\text{kN}/\text{m}^2$. Tako se ukupno gravitaciono opterećenje javlja u iznosu $q=1,45\text{kN}/\text{m}^2$.

Ulazni podaci o konfiguraciji sistema, za proračun po metodi konačnih pomeranja, dobijeni su direktnim snimanjem geodetskim instrumentom na objektu u trenutku kada na kablove ne deluju nikakva spoljašnja opterećenja. Proračun po metodi konačnih pomeranja izvršen je za sve karakteristične faze opterećenja konstrukcije, koje su definisane kao: I faza -prednaprezanje; II faza - prednaprezanje i sopstvena težina krova $g=0,45\text{kN}/\text{m}^2$; III faza-prednaprezanje, sopstvena težina krova i opterećenje od snega $g+s=0,45+1,00=1,45\text{kN}/\text{m}^2$. S obzirom da su merenja na kablovske rešetke KR-5 izvršena u samo dve karakteristične faze opterećenja: 0-ta faza (neopterećen nosač) i I faza (prethodno napregnut nosač, uz uticaj skoro zanemarljive sopstvene težine nosača), teorijski, tj. računski rezultati za pomenute faze opterećenja (0-ta i I) su uporedjivani sa odgovarajućim eksperimentalnim. Teorijski rezultati dobijeni su primenom programskih modula CABL-T, CABL-TP i CABL-N čije su blok šeme date u poglavlju V.

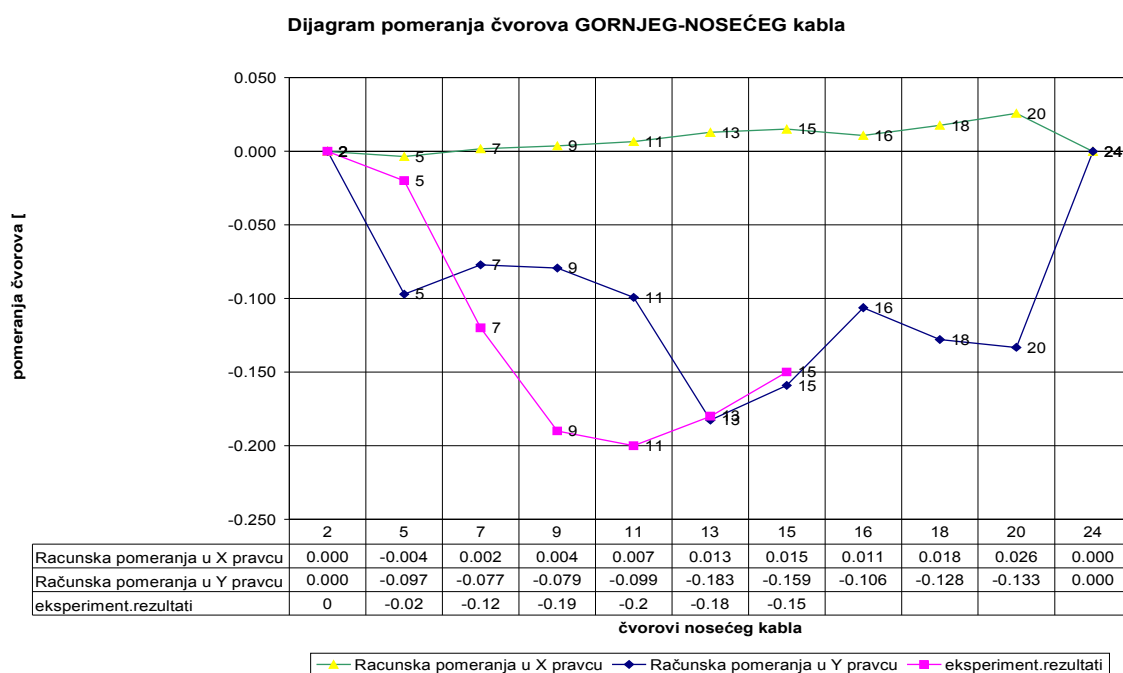
Dijagnostika stanja i približavanje računskog modela sa realnom konstrukcijom čiji je „odgovor na prednaprezanje“ dobijen merenjem na licu mesta, predstavljao je vrlo kompleksan problem iz više razloga koji su specifični za viseće prethodno napregnute konstrukcije. Problemi se mogu da definisati kao:

- geometrijska nelinearnost, koja je u funkciji opterećenja, konfiguracije nosača i poprečnog preseka kablova,
- visok stepen statičke neodređenosti, koji je posledica mnoštva štapova koji su zamenili kontinualnu membranu izmedju pojasnih kablova,
- stabilisanje konstrukcije unošenjem odgovarajuće sile prednaprezanja, tako da i usled najvećeg gravitacionog opterećenja štapovi stabilizujućeg kabla ostanu zategnuti,
- velike horizontalne sile u oslonачkim čvorovima, što je direktna posledica plitke krovne površi, nepomerljivosti oslonaca i prednaprežućih sila.

IX-1.2 Poredjenje eksperimentalnih rezultata sa teorijskim

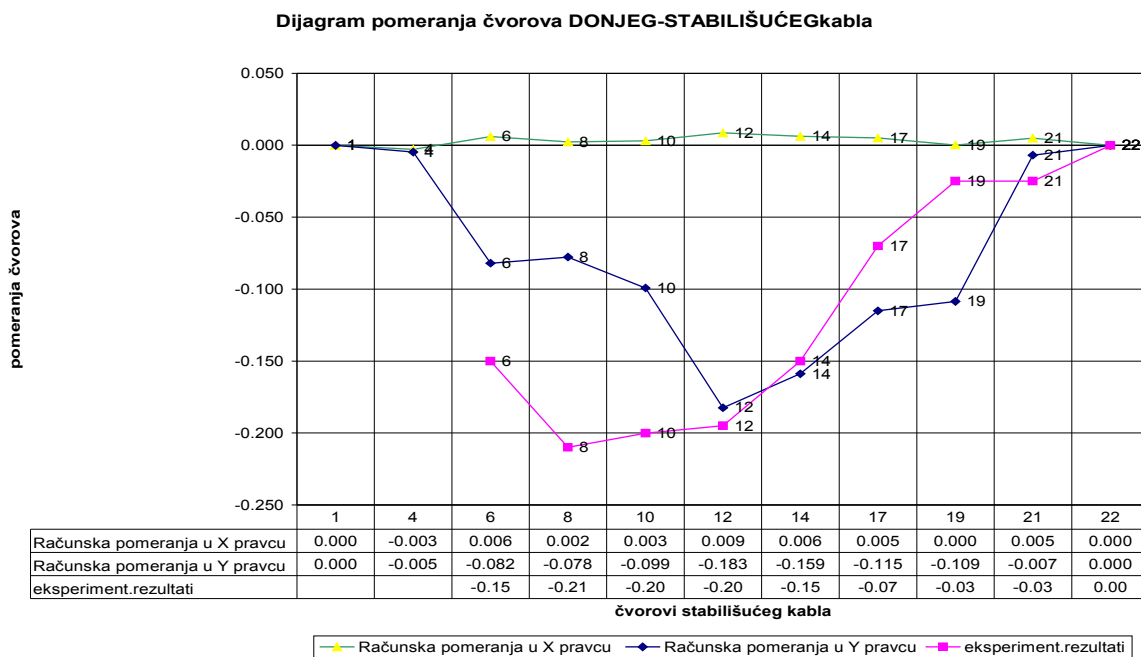
IX-1.2.a Osnovni računski model

Osnovni računski model prikazan je na slici VIII-9, a analiziran je kombinovanim analitičko-iterativnim postupkom primenom programskih blokova CABL-T, CABL-TP i CABL-N. Prethodno naprezanje nosača u matematičkom modelu izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima stabilizujućeg pojasa (donji kabl) sa intenzitetom od 250kN. Tako definisana faza opterećenja je metodom konačnih pomeranja u iterativnom postupku rešavanja sistema nelinearnih algebarskih jednačina, dovela do ravnoteže sistema. Dodeljene sile štapovima stabilizujućeg kabla su preraspodeljene na sve štapove sistema, a sam nosač je iz neopterećenog stanja (0-ta faza) prešao u prethodno napregnuto stanje (I faza). Geometrija sistema se promenila: čvorovi su se pomerili naniže (-Y osa), a takodje i u horizontalnom pravcu ($\pm X$ osa), što se vidi sa uporednih dijagrama (Slika IX-1).



SLIKA IX-1 Uporedni dijagram pomeranja čvorova nosećeg kabla (teorijski i eksperimentalni podaci)

Način aplikacije prednaprezanja na fizičkom modelu sastoji se u skraćivanju stabilizujućeg kabla pomoću posebno modeliranih zavrtnjeva u čvorovima 1 i 22. Skraćivanjem stabilizujućeg kabla, preko štapova ispune, dolazi do prenošenja sila i u sve ostale štapove sistema. U pogledu načina prednaprezanja postignuta je podudarnost izmedju računskog i fizičkog modela.



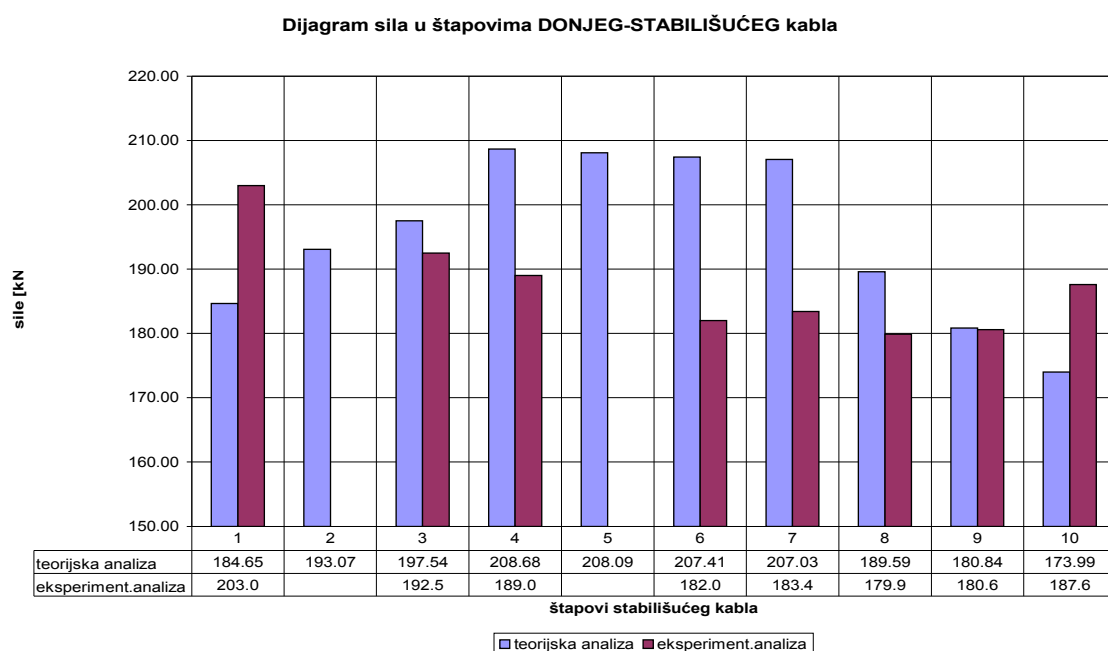
SLIKA IX-2 Uporedni dijagram pomeranja čvorova stabilizujućeg kabla (teorijski i eksperimentalni podaci)

Analizom uporednih dijagrama prikazanih na slikama IX-1 i IX-2 vidi se da čvorovi 7, 9 i 11 nosećeg kabla kao i čvorovi 8 i 10 stabilizujućeg kabla imaju mnogo manja pomeranja od merenih vrednosti. Takodje, i čvorovi nosećeg i stabilizujućeg kabla pomerili su se u pravcu pozitivnog smera X-ose. Čvorovi 18 i 20 nosećeg kabla i čvorovi 17 i 19 stabilizujućeg kabla imaju mnogo veća pomeranja od očekivanih i merenih.

Sile u štapovima stabilizujućeg kabla trebalo bi da opadaju od oslonaca prema sredini nosača, dok je u analiziranom modelu obrnuto.

TABELA IX-1 Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski i eksperimentalni podaci)

NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	5	7	9	11	13	15	16	18	20	24
Odstupanja %		385.0	-35.8	-58.4	-50.5	+1.7	+6.0				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	4	6	8	10	12	14	17	19	21	22
Odstupanja %			-0.45	-0.63	-0.51	-8.5	+5.9	+64.3	263.3	-76.7	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odstupanja %	-10		+2.6	+10.4		+14.0	12.9	+5.4	+0.1	-7.3	



SLIKA IX-3

Uporedni dijagram sila u štapovima stabilizujućeg kabla (teorijski i eksperimentalni podaci)

IX-1.2.b Korekcija osnovnog računskog modela

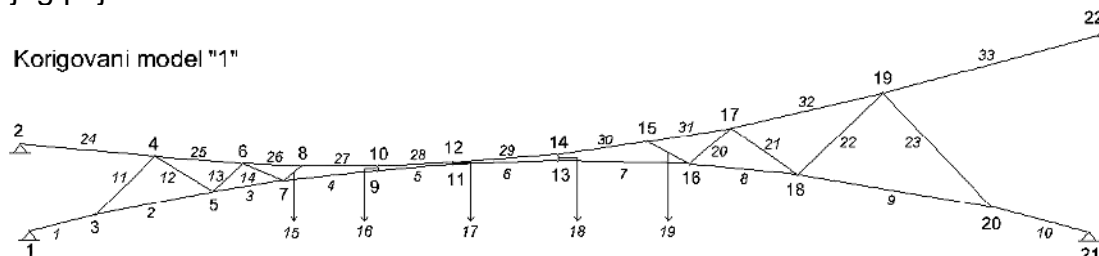
Osnovni računski model je svojom konfiguracijom i geometrijom preslikan realni model u neopterećenom stanju. Međutim, prostor bazena je ovom konstrukcijom bio pokriven par godina pre njenog ispitivanja i ponovnog utezanja. Za vreme eksploatacije konstrukcija je bila izložena statičkim, dinamičkim i temperaturnim promenama, što je najverovatnije izazvalo povećanja zazora u otvorima za zavrtnjeve na čvornim elementima od legiranog aluminijuma kojima se štapovi ispune (dijagonale) povezuju sa pojasnim kablovima. Pregledom konstrukcije, ova odstupanja nisu mogla biti otkrivena, ali se kroz uporedjenje merenih i računskih rezultata jasno vidi da su **neke od dijagonalnih veza „neaktivne“**, pa pomeranja čvorova ne daju glatku očekivanu krivu, ni na nosećem ni na stabilizujućem kablju.

Zbog geometrijske nelinearnosti „odgovora“ konstrukcije, njene mnogostruke statičke neodređenosti, pretpostavljene sile prednaprezanja, formirano je nekoliko korigovanih računskih modela. Svaki od korigovanih modela sadrži štapove koji ne učestvuju u preraspodeli sila prednaprezanja koje se unose u stabilizujući kabl. Izmenjeni modeli analizirani su i upoređivani sa merenim vrednostima. Kriterijum usvajanja računskog modela je poklapanje sa eksperimentalnim podacima u granicama od 85% do 100%. Zbog preglednosti, u radu će biti prezentirano pet karakterističnih modela koji su postepeno navodili na pravac razmišljanja i moguće štapove koji ne učestvuju u konstrukciji.

Prema prethodno analiziranim dijagramima, teško je sa sigurnošću pretpostaviti koji bi od štapova trebalo isključiti da bi se približili realnom modelu. Zbog pomeranja u pravcu X-ose, kao i zbog skokovitih promena u pomeranjima krajnjih čvorova, formiran je model koji ne sadrži štapove br.11 i br.25.

IX-1.3 Korigovani računski model I

Na slici IX-4 prikazan je korigovani matematički model I. Prethodno naprezanje nosača, u matematičkom modelu, izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima donjeg pojasa sa intenzitetom od 250kN.



SLIKA IX-4 Konfiguracija korigovanog računskog modela I

IX-1.3.a Analiza korigovanog računskog modela I

Analiza uporednih dijagrama pomeranja i sila, ukazala je na potrebu uspostavljanja veze izmedju čvorova 20 i 22 koja će ograničiti pomeranja čvorova 18, 19 i 20, a da izmedju nosećeg i stabilizujućeg kabla postoji veza u levom delu nosača koja ograničava očekivana pomeranja čvorova oba pojasa, pa je dijagram pomeranja i dalje skokovit.

Sile u štapovima stabilizujućeg kabla trebalo bi da opadaju od oslonaca prema sredini nosača, dok je u analiziranom modelu obrnuto.

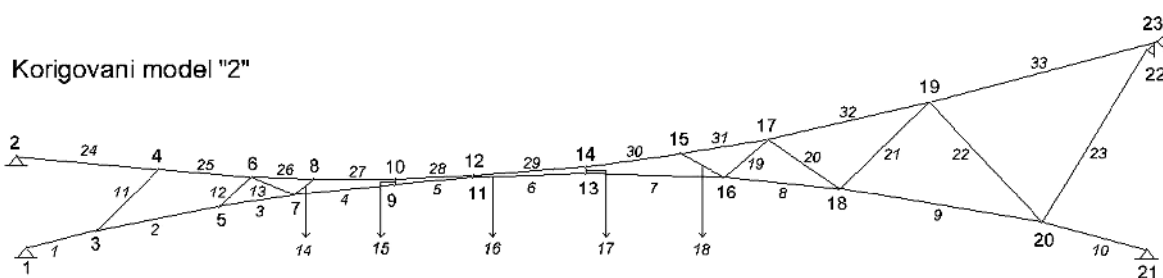
TABELA IX-2 Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski / eksperimentalni podaci)

NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	4	6	8	10	12	14	15	17	19	22
Odstupanja %		518.5	-30.8	-61.6	-64.2	-20.9	-25.2				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	21
Odstupanja %			-36.7	-64.3	-64.0	-29.0	-25.3	+40.0	+420	1097.	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
odstupanja	-12.		-3.9	+2.5		+5.4	+4.2	-6.0	-11.9	-13.5	

Prema analiziranim dijagramima, teško je sa sigurnošću pretpostaviti koji bi od štapova trebalo isključiti, da bi se približili realnom modelu. Zbog velikih vertikalnih pomeranja desnih bočnih čvorova vraća se veza izmedju čvorova 20 i 22. Zbog skokovitih, a malih pomeranja levih čvorova isključuje se štap 12.

IX-1.4 Korigovani računski model II

Na slici IX-5 prikazan je korigovani matematički model II. Prethodno naprezanje nosača, u matematičkom modelu, izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima donjeg pojasa sa intenzitetom od 250kN.



SLIKA IX-5 Konfiguracija korigovanog računskog modela II

IX-1.4.a Analiza korigovanog računskog modela II

Analiza uporednih dijagrama pomeranja i sila, ukazala je da izmedju nosećeg i stabilizujućeg kabla još uvek postoji veza u levom delu nosača koja ograničava očekivana pomeranja čvorova oba pojasa pa je dijagram pomeranja i dalje skokovit. Moguće je da, usled nelinearnog odgovora, ukidanjem štapa 14, dodje do ujednačavanja pomeranja i njihovog približavanja merenim vrednostima. Veća pomeranja čvorova 17 i 19 nosećeg kabla i čvorova 16 i 18 na desnoj strani nosača ukazuju na eventualno smanjenje sile prednapreznja u tom delu nosača.

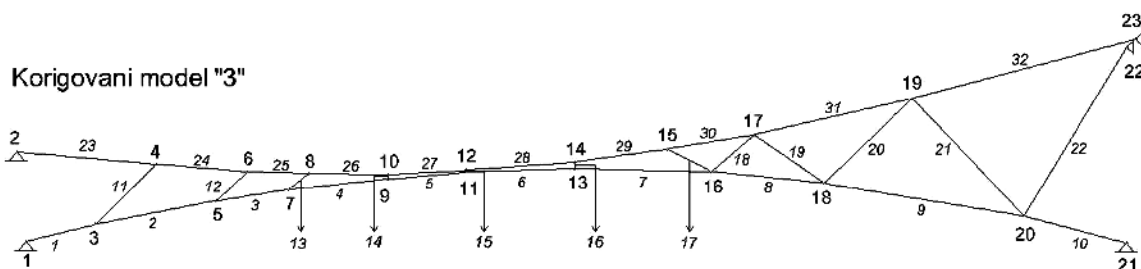
Sile u štapovima stabilizujućeg kabla trebalo bi da opadaju od oslonaca prema sredini nosača, dok je analiziranom modelu obrnuto.

TABELA IX-3 Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski / eksperimentalni podaci)

NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	4	6	8	10	12	14	15	17	19	23
Odstupanja %		560.0	+28.5	-50.0	-0.46	+1.0	0.0				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	21
Odstupanja %			+30.0	-46.0	-46.0	-9.0	0.0	+47.1	+226.	-76.7	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odstupanja %	-0.4		-2.5	11.9		11.6	15.0	+8.2	+2.7	-4.8	

IX-1.5 *Korigovani računski model III*

Na slici IX-6 prikazan je korigovani matematički model III. Prethodno napreznje nosača, u matematičkom modelu, izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima stabilizujućeg pojasa sa intenzitetom od 250kN.



SLIKA IX-6 Konfiguracija korigovanog računskog modela III

IX-1.5.a Analiza korigovanog računskog modela III

Analiza uporednih dijagrama pomeranja i sila ukazuje da između nosećeg i stabilizujućeg kabla još uvek postoji veza u levom delu nosača koja ograničava očekivana pomeranja čvorova oba pojasa, pa je dijagram pomeranja i dalje skokovit. Moguće je da usled nelinearnog odgovora, povezivanjem čvorova 4 i 5, dodje do ujednačavanja pomeranja i njihovog približavanja merenim vrednostima. Pomeranja čvorova stabilizujućeg kabla u horizontalnom pravcu (-X osa) ukazuju da treba smanjiti sile prednapreznja.

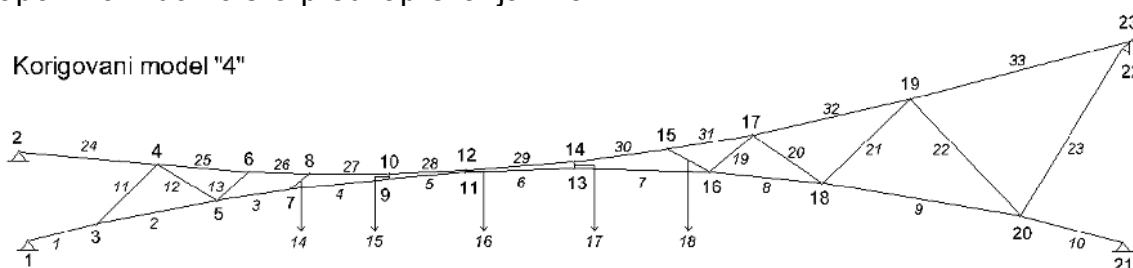
Sile u štapovima stabilizujućeg kabla prilično su ujednačene sa merenim vrednostima, ali još uvek variraju oko merenih vrednosti.

TABELA IX-4 *Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski / eksperimentalni podaci)*

NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	4	6	8	10	12	14	15	17	19	23
Odstupanja %		+630.	+51.7	+2.1	-21.0	+7.8	-9.3				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	21
Odstupanja %			58.7	20.0	-21.5	-4.5	-9.3	32.9	143.3	-76.7	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odstupanja %	1.6		0.8	-2.3		2.3	1.7	-0.6	-3.4	-10.4	

IX-1.6 Korigovani računski model IV

Na slici IX-7 prikazan je korigovani matematički model IV. Prethodno naprezanje nosača, u matematičkom modelu, izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima stabilizujućeg pojasa sa intenzitetom od 230kN u štapovima 1 do 6, dok je u štapovima 7 do 10 sila prednapreznja 215kN.



SLIKA IX-7 *Konfiguracija korigovanog računskog modela IV*

IX-1.6.a Analiza korigovanog računskog modela IV

Analiza uporednih dijagrama pomeranja i sila navodi na potrebu formiranja trougaone figure povezivanjem čvorova 2 i 3 čime bi se smanjila pomeranja čvorova 3, tj. 4. Čvor 10 nosećeg kabla i čvor 9 stabilizujućeg kabla imaju i dalje manja pomeranja od merenih vrednosti, a "testerasti" dijagram pomeranja ukazuje na vezu u okolini čvorova koja ograničava njihovo očekivano pomeranje. Logično je da isključenjem štapa 12 dodje do povećanja pomeranja u čvorovima 5, 6, 9 i 10.

Moguće je da usled nelinearnog odgovora, i smanjenjem sile prednaprezanja i čvorovi na desnoj strani, čvorovi 18 i 19 pretrpe pomeranja koja će se približiti merenim vrednostima. Takodje, pomeranja čvorova stabilizujućeg kabla u horizontalnom pravcu (-X osa) ukazuju na smanjenje sile prednaprezanja.

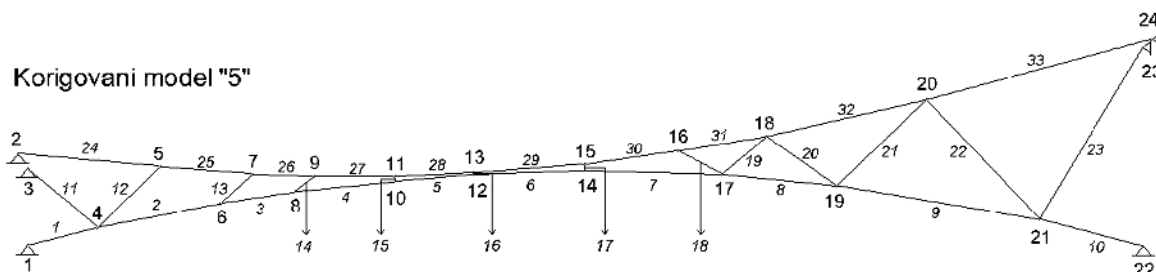
Sile u štapovima stabilizujućeg kabla prilično su ujednačene sa merenim vrednostima, ali još uvek variraju oko merenih vrednosti.

TABELA IX-5 Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski / eksperimentalni podaci)

NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	4	6	8	10	12	14	15	17	19	23
Odstupanja %		744.5	-20.8	-26.8	-37.0	-0.6	-12.7				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	21
Odstupanja %			-20.7	-17.6	-37.0	-10.5	-12.6	14.4	166.7	-80.0	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odstupanja %	-13.0		-4.1	-6.9		-3.3	-4.0	-8.7	-13.0	-19.4	

IX-1.7 Korigovani računski model V

Na slici IX-8 prikazan je korigovani matematički model V. Prethodno naprezanje nosača, u matematičkom modelu, izvršeno je dodeljivanjem zatežućih sila štapovima stabilizujućeg pojasa sa intenzitetom od 230kN u štapovima 1 do 3, dok je u štapovima 4 do 10 sila prednaprezanja 215kN.

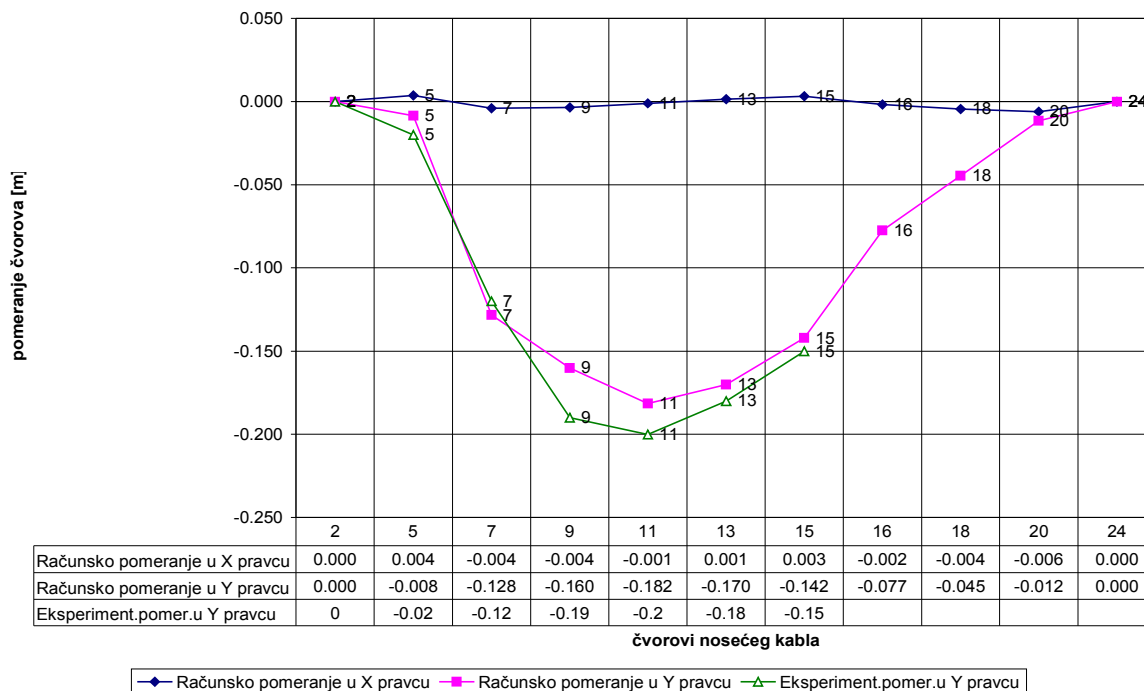


SLIKA IX-8 Konfiguracija korigovanog računskog modela V

TABELA IX-6 Uporedni prikaz odstupanja pomeranja čvorova i sila u odnosu na merene vrednosti (teorijski/eksperimentalni podaci)

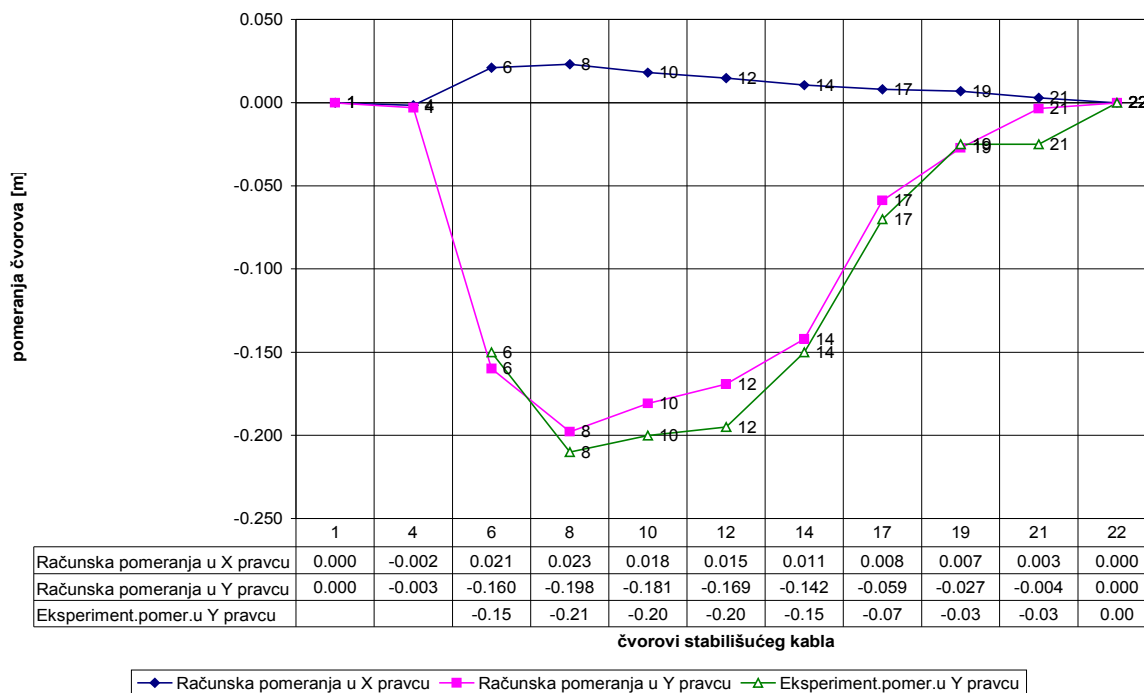
NOSEĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	2	5	7	9	11	13	15	16	18	20	24
Odstupanja %		-60.0	6.7	-15.7	-9.0	-5.6	-5.3				
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merena pomeranja čvorova											
Čvorovi	1	4	6	8	10	12	14	17	19	21	22
Odstupanja %			6.6	-5.7	-9.5	-15.5	-5.3	-15.7	-10.0	-86.7	
STABILIZUJUĆE UŽE - odstupanja u odnosu na merene sile u štapovima											
Štapovi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odstupanja %	-6.8		-5.2	-7.6		-3.7	-4.4	-2.0	-5.9	-8.5	

Dijagram pomeranja čvorova NOSEĆEG kabla

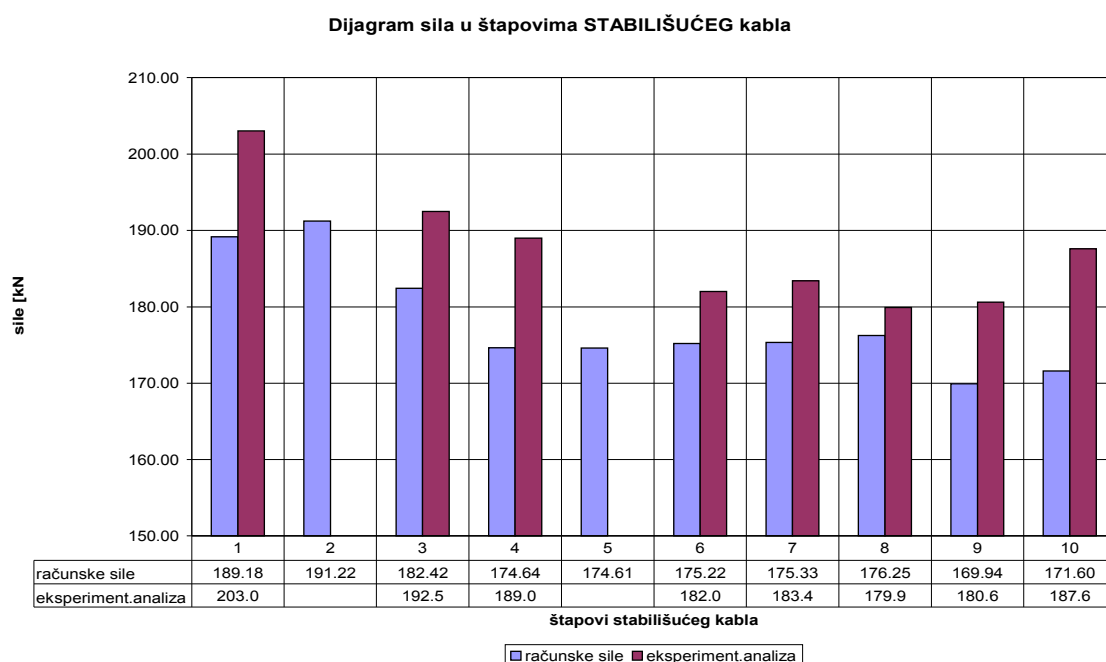


SLIKA IX-9 Korigovani računski model V: Uporedni dijagram pomeranja čvorova gornjeg kabla (teorijski / eksperimentalni podaci)

Dijagram pomeranja čvorova STABIŠUĆEG kabla



SLIKA IX-10 Korigovani računski model V: Uporedni dijagram pomeranja čvorova donjeg kabla (teorijski, eksperimentalni podaci)



SLIKA IX-11 *Uporedni dijagram sila u štapovima donjeg kabla (teorijski / eksperimentalni podaci)*

IX-1.7.a Analiza korigovanog računskog modela V

Analizom uporednih dijagrama pomeranja, prikazanih na slikama IX-9 i IX-10, vidi se da su pomeranja merena na realnom modelu vrlo bliska računskim pomeranjima korigovanog modela V za zadate sile prethodnog naprezanja. Takođe, i sile u štapovima donjeg pojasa su u prethodno definisanim granicama. Računske sile nešto su manje od merenih, što nije na strani sigurnosti, ali su odstupanja mala što predstavlja red veličine od oko 15kN u odnosu na maksimalnu silu u kابلu od 203kN.

Prema prethodno analiziranim dijagramima, očigledno je da analizirani model V svojim odgovorom najbliži realnom modelu na terenu, što je u daljoj analizi iskorišćeno za pribavljanje dinamičkog odgovora konstrukcije računskim putem i njegovo upoređenje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima.

IX-2 Dijagnostika dinamičkih parametara

IX-2.1 Dešifrovanje akcelorograma

Merni instrumenti i metoda za pribavljanje osnovnih parametara dinamičkog odgovora konstrukcije prilagodjeni su programu ispitivanja i fizički dostupnim delovima konstrukcije. Grafički zapis oscilovanja kablovske rešetke za period od 16 sekundi, urađen je sa dva merna instrumenta koji su na osnovnom modelu postavljeni na čvorovima 13 i 9 nosećeg kabla. Dobijeni akcelorogram, daje podatke o titrajima u periodu za koji je vršeno merenje, kao i o ubrzanjima čvorova 13 i 9 na kojima su bili pričvršćeni merni instrumenti.

Osnovni zadatak prepoznavanja dominantne frekvencije merenog sistema, izvršice se primenom matematičkog modela tzv. *brze Furijeove metode*.

Sintaksa diskretizovane Furijeove transformacije je $Y = \text{fft}(X)$.

Definicije Furijeove transformacije jesu funkcije $X = \text{fft}(x)$ i $x = \text{ifft}(X)$ koje uključuju transformaciju i inverznu transformaciju para podataka dodeljenih vektorima, čije je polje veličine N .

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \cdot \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \cdot \omega_N^{-(j-1)(k-1)}$$

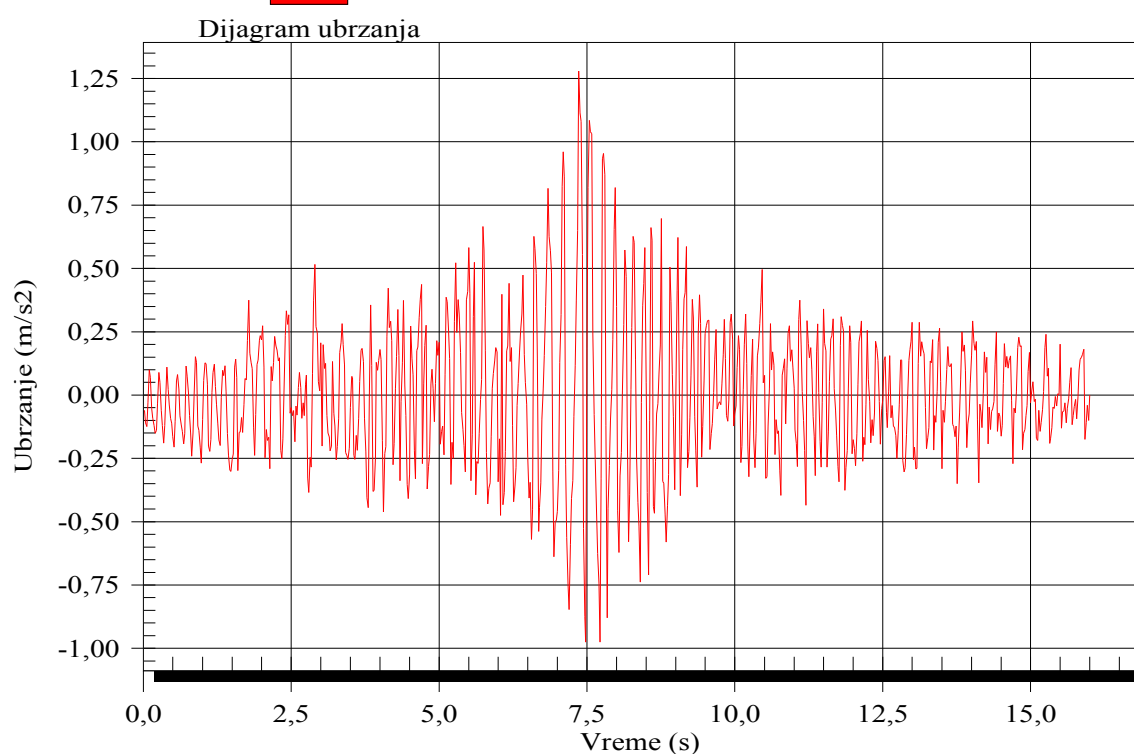
gde je: $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$ N je koren vektorskog polja.

IX-2.2 Priprema podataka

Grafički zapis sa slike VIII-10, neophodno je prevesti u numeričke vrednosti, očitavanjem sa dijagrama. Posebnost očitavanja podataka sastojala se u očitavanju apscisa i ordinata za jednake vremenske intervale. Kako je u jednoj sekundi zabeleženo 4 do 5 punih poprečnih talasa, i 20 do 30 titraja sa lokalnim pikovima, svaka sekunda je podeljena na 50 jednakih delova. Na taj način pripremljena je baza podataka za 800 tačaka (800x2), za svaki instrument ponaosob.

VIBRACIJE LANČANICE

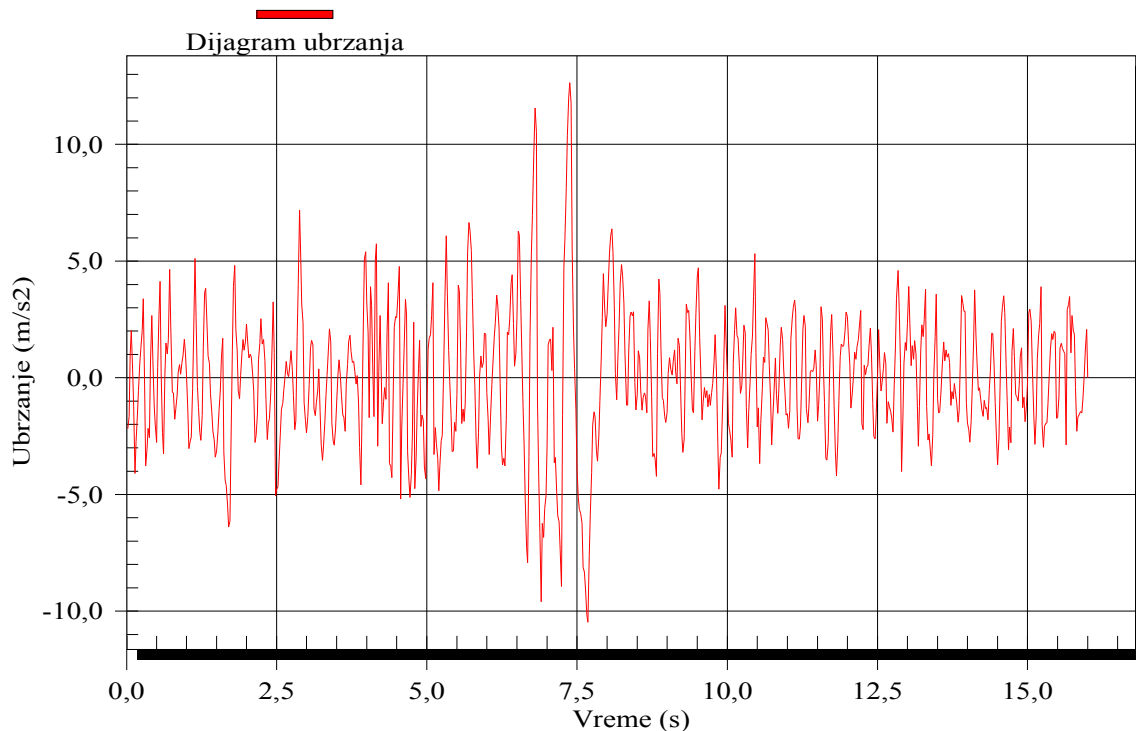
Merni instrument SMU 1



SLIKA IX-12 Vibracije lančanice isctane po dešifrovanim podacima sa grafičkog zapisa akcelerometra SMU-1 u čvoru 13 nosećeg kabla

VIBRACIJE LANČANICE

Merni instrument SMU 2



SLIKA IX-13 Vibracije lančanice isctane po dešifrovanim podacima sa grafičkog zapisa akcelerometra SMU-2 u čvoru 9 nosećeg kabla

Tako pripremljeni podaci su kontrolisani isctavanjem dijagrama (*slike IX-12 i IX-13*), da bi se utvrdila podudarnost sa grafičkim zapisom sa terena. Po utvrđenoj podudarnosti očitanih i zapisanih akcelerogramama, aktiviran je modul programa MATLAB-7 Release 14 za brzu Furijeovu transformaciju.

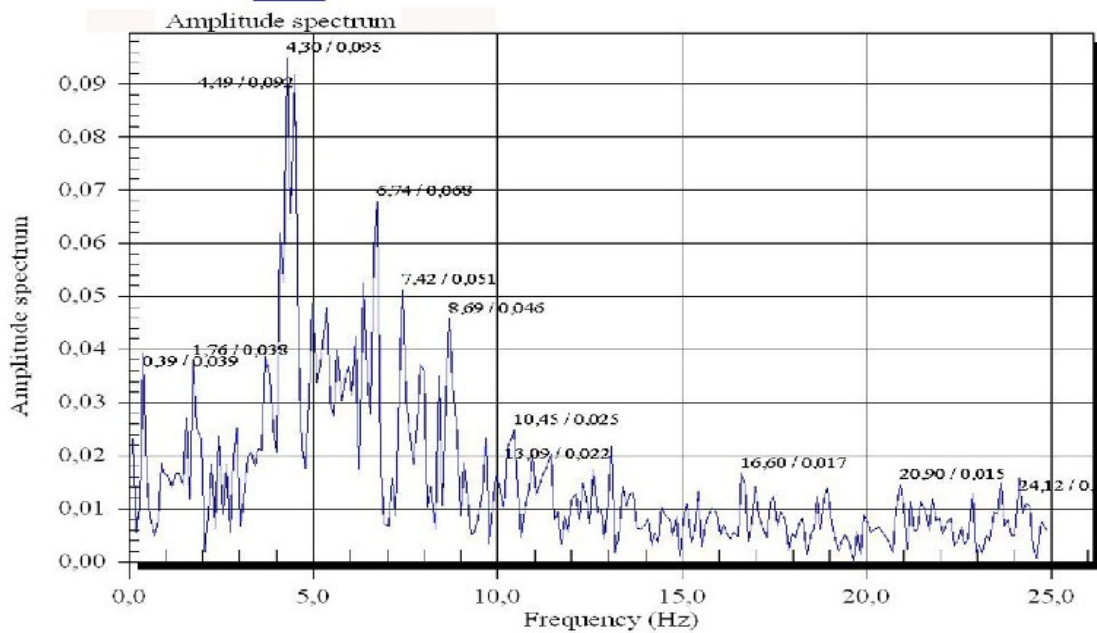
IX-2.3 Analiza podataka

Brza Furijeova transformacija sračunava energiju spektralne gustine korišćenjem kompleksne konjugacije, tj. daje vrednosti energije različitih frekvencija. Grafičkim prikazom amplitudnog spektra u funkciji frekvencija, jasno se razlučuju dominantne frekvencije oscilovanja (*slike IX-14 i IX-15*).

IX-2.4 Poredjenje eksperimentalnih rezultata sa teorijskim

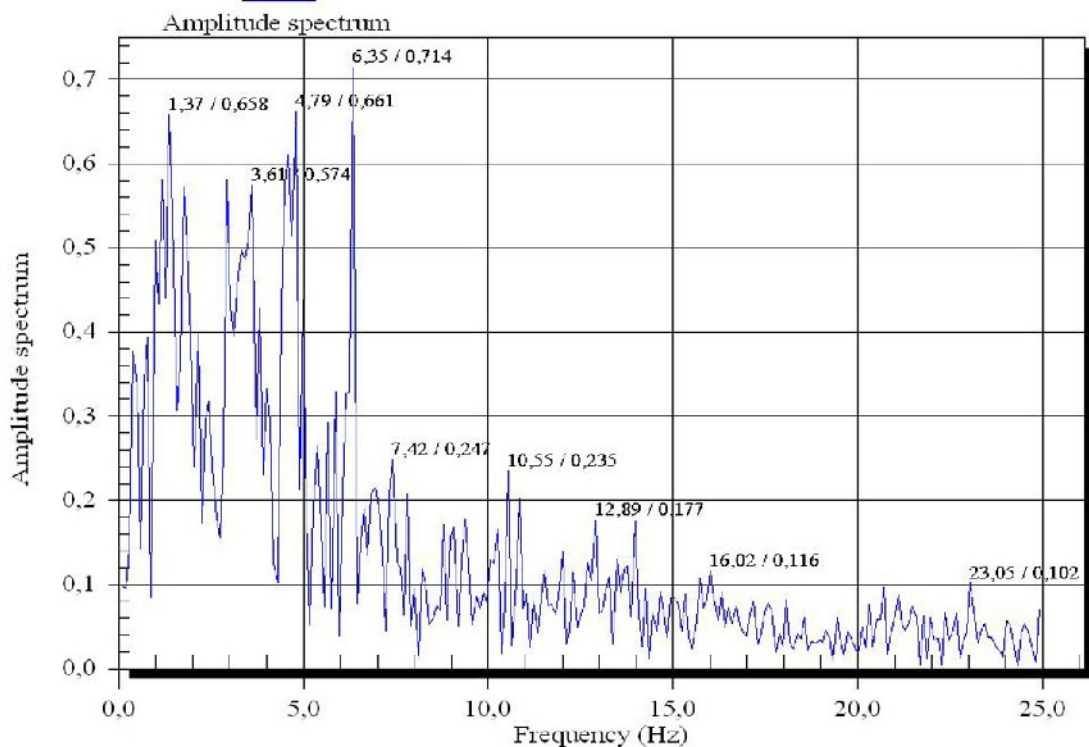
Matematički model V (*slika IX-8*) analiziran je kombinovanim analitičko-iterativnim postupkom primenom programskih blokova CABL-T, CABL-TP i CABL-N. Svojim statičkim odgovorom ovaj model najbliži je realnom modelu na terenu, pa je u daljoj analizi iskorišćen za pribavljanje dinamičkog odgovora konstrukcije računskim putem i njegovo uporedjenje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima prikazanim na *slici IX-14 i IX-15*.

FFT ANALIZA



SLIKA IX-14 Frekventni spekter dobijen FFT analizom akcelorograma SMU 1 u čvoru 13 nosećeg kabla

FFT ANALIZA



SLIKA IX-15. Frekventni spekter dobijen FFT analizom akcelorograma SMU 2 u čvoru 9 nosećeg kabla

Dinamička analiza matematičkog modela 5 izvršena je programskim paketom **ANSYS Release 8**. Ulazni podaci za proračun u ANSYS-u, identični su kao za proračun po programskom modulu CABL-N. Element konstrukcije je LINK10, koji može da se prednapregne unošenjem početnog skraćivanja u štapove stabilizujućeg kabla koje odgovara sili prednapreznja i fizičkim konstantama užeta (E , A , F). Analiza se sastoji iz statičkog i dinamičkog dela. U statičkom delu očekuje se nelinearni odgovor modela (NLGEOM ON). Model je prethodno napregnut (PSTRES ON). Mogućnost velikih deformacija postoji i ojačanje konstrukcije sa preraspodelom unetih sila prednapreznja (SSTIF ON). Program ANSYS rešava sistem nelinearnih jednačina korišćenjem Njutn-Rafsonovog postupka sa promenljivom matricom krutosti zadajući opterećenje u 20 koraka (inkrementalna šema). Rezultati statičke analize koriste se u modalnoj analizi (PSTRES ON). Metod ekstrakcije svojstvenih vektora je *Metod inverznih iteracija*, za broj tonovih formi koji mogu biti od značaja za analizu (MODEPT, SUBSP,10).

Dinamički odgovor konstrukcije računskim putem, tj. programskim paketom ANSYS, prikazan je na slici IX-16.

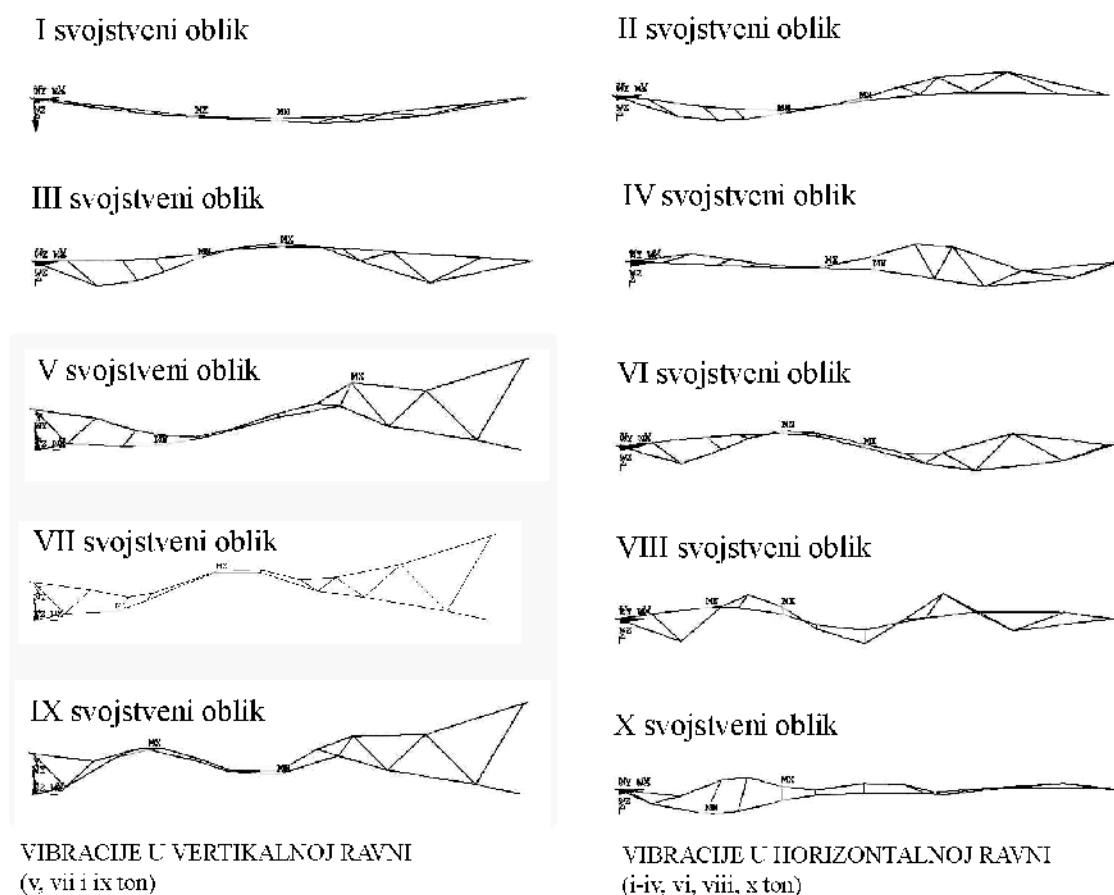
Sa slike IX-14 i IX-15, iz frekventnog spektra dobijene su vrednosti dominantnih vibracija kablovske rešetke po tonovima.

TABELA IX-7 *Frekvencije i periode dominantnih tonovih formi dobijenih FFT analizom i računskom analizom*

	Tonova forma	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
SMU-1	Frekvencija <i>Hz</i>					4.30		4.49		6.74	
	Perioda <i>sec.</i>					0.23		0.22		0.15	
SMU-2	Frekvencija <i>Hz</i>					3.61		4.79		6.35	
	Perioda <i>sec.</i>					0.28		0.21		0.16	
Računska analiza RA	Frekvencija <i>Hz</i>	1.15	2.03	2.89	3.76	3.91	3.94	5.16	5.22	5.98	6.06
	Perioda <i>sec.</i>	0.87	0.49	0.35	0.27	0.26	0.25	0.19	0.19	0.17	0.16
Odstupanje % RA / SMU-1	%					-9.1		14.9		-11.3	
Odstupanje % RA / SMU-2	%					8.3		7.7		-5.8	
Pravac oscilovanja	Z ²⁶ Y ²⁷	Z	Z	Z	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z

26 Pravac Z je upravan na vertikalnu ravan nosača

27 Pravac Y je u vertikalnoj ravni nosača



SLIKA IX-16 *Tonove forme svojstvenih vibracija kablovske rešetke bazena „Zdravlje“, dobijene računskim postupkom - programskim paketom ANSYS*

Sa slike IX-16 vidi se da kablovska rešetka osciluje u pravcu koji je upravan na ravan konstrukcije (Z-pravac), a iz analize relativnih sila i pomeranja, ti svojstveni oblici nemaju dominantno učešće u dinamičkom odgovoru konstrukcije. Najveće učešće imaju modalni oblici oscilovanja u vertikalnoj ravni (Y-pravac): V, VII i IX ton oscilovanja. Iz Tabele IX-7 vidi se da su eksperimentalno dobijeni rezultati i rezultati dobijeni računskim putem dovoljno bliski.

IX-3 *Analiza pouzdanosti primenjene metode proračuna*

Eksperimentalno dobijeni rezultati (sile, pomeranja i frekvencije) predstavljale su polaznu osnovu za teorijsku analizu matematičkog modela koji će prema svojim geometrijskim i fizičkim karakteristikama imati skoro potpunu sličnost sa realnim modelom – prototipom konstrukcije koja je ispitivana. Statički i dinamički odgovor usvojenog matematičkog modela, u poredjenju sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, poklapa se u granicama statističke pouzdanosti (90% do 100%). Samim tim može se reći da je usvojena i primenjena metodologija proračuna koja je

prikazana u poglavlju V na slikama V-8 do V-10, lako primenljiva na klasu problema koji je rešavan u ovom poglavlju.

Uprkos problemima, koji su definisani u uvodnom odeljku IX-1.1, primenjeni kombinovani analitičko-iterativni postupak pokazao je da se njegovom primenom može brzo i pouzdano sprovesti analiza sličnih modela, sa korekcijom pojedinih ulaznih parametara. Rezultati statičkih parametara (sile u štapovima i pomeranja) i upoređivanje karakterističnih maksimalnih i minimalnih vrednosti, dobijaju se primenom programskih modula CABL-T, CABL-TP i CABL-N, dok se dinamičke karakteristike konstrukcije (svojsvene i prinudne frekvencije) dobijaju primenom programskog paketa ANSYS ili nekog drugog sa sličnim karakteristikama (ESA-Prima Win, STRAUS, LUSAS, DIANA...).

Sprovedene analize u ovom poglavlju nedvosmisleno ukazuju na praktične etape rada pri proračunu i analizi kablovskih rešetki:

- (1) Usvajanje globalne geometrije nosača, fizičkih konstanti i dimenzija nosećih elemenata (odeljak VII-3) i opterećenja koja će delovati na konstrukciju (odeljak VII-2, VII-4 i VII-5), tzv. pripremni inženjerski rad,
- (2) Prethodni proračun kablovskih rešetki uz upotrebu programskih blokova CABL-T i CABL-TP,
- (3) Statički proračun uz upotrebu programskog bloka CABL-N,
- (4) Dinamički proračun modalnih, harmonijskih i tranzijent vibracija upotrebom ANSYS-a ili nekog drugog programa sa sličnim karakteristikama.

Proračuni sprovedeni na ovaj način daju pouzdane rezultate koji su vrlo bliski statičkom i dinamičkom odgovoru prototipa konstrukcije i brzo konvergira rešenjima (faze 2, 3 i 4). Pripremna faza (1) zavisi isključivo od stepena znanja, iskustva i veštine projektanta.

Poglavlje X

Zaključci

Istraživanje, prikazano u ovom radu, odnosi se na analizu visećih prethodno napregnutih konstrukcija tipa kablovske rešetke, sa aspekta ostvarenja minimalnih uslova za stabilno ponašanje ovih geometrijski nelinearnih struktura pod dejstvom statičkih i vremenski zavisnih opterećenja od uticaja vetra.

U radu su razmatrani i analizirani svi bitni koraci za postizanje željenog cilja, koji su dostupni u domaćoj i stranoj literaturi:

- analiza nosećih elemenata od kojih se izraduju kablovske rešetke (*odeljak III-2*),
- geometrijske karakteristike i konfiguracija nosećih elemenata (*poglavlje I i II*),
- metodologija proračuna kablovskih rešetki (*poglavlje IV*),
- postojeći kriterijumi za postizanje stabilnosti visećih konstrukcija (*poglavlje III*).

Doprinos rešenju problema stabilnosti dvopojasnih lančaničnih sistema sadržan je u *poglavljima V, VI, VII i IX*, iz kojih su izvedeni sledeći zaključci.

X-1 Analitičko-numerički model statičkog proračuna

Upoznavanje i analiza izgradjenih objekata i napisanih stručnih i naučnih radova, podstaklo je autora ove disertacije, da se i sam zainteresuje za najizrazitiji problem visećih konstrukcija – ljuljanje, uznemirenost ili aerodinamički fenomen, kako se još u literaturi naziva, a odnosi se na definiciju kriterijuma koji bi u opštem smislu mogli da se podvedu pod pojam stabilnosti.

Postojeći alati za proračun visećih konstrukcija zasnovani na moćnoj tehnologiji PC računara, numeričkim iterativnim metodama, nisu rešili problem početnih uslova geometrijski nelinearnih i prethodno napregnutih elastičnih struktura. Početne uslove treba pretpostaviti na osnovu dovoljnog predznanja i odgovarajućeg analitičkog metoda, koji uz niz aproksimacija, u dalji proračun numeričkim metodama, unosi što manju grešku.

U radu je posebna pažnja posvećena pronalaženju početnih uslova analitičkim postupkom profesora Balgača, koji je autor disertacije dopunio, proširio za primenu na klasu problema kablovskih rešetki i prilagodio za primenu na računaru. Primenom analitičke metode i programskih modula za PC računar (*poglavlje V*) CABL-T i CABL-TP, postiže se brže definisanje geometrijske konfiguracije i početnih sila prednapreznja u funkciji stabilnosti pod najnepovoljnijim opterećenjem. Na taj način se, u stvari, kontroliše krutost cele konstrukcije za opterećenja koja je realno očekivati. Nivo krutosti konstrukcije postiže se dodatnim opterećenjem nosećeg užeta uz obavezno ispunjen uslov zategnutosti prednaprežućeg užeta, tj. preostaloj sili, koja bi se mogla ostvariti u njemu pod dejstvom "sile kontakta".

Tačnost rešenja, dobijenih analitičkim metodom proračuna, kontrolisana je iterativnim numeričkim postupkom za fazu opterećenja konstrukcije na koju ne deluju spoljašnje sile, već samo sile prednapreznja - referentni položaj konstrukcije (*poglavlja VI, VII, VIII i IX*). Odstupanja, tj. korekcije dobijene numeričkim postupkom u odnosu na analitički, iznose 4.5% kod pomeranja i 7.6% kod sila, što se može smatrati malim odstupanjima.

Ovako koncipiran analitičko-numerički model statičkog proračuna predstavlja originalni doprinos unapredjenju proračuna visećih konstrukcija tipa kablovskih rešetki:

- skraćuje vreme rada računara,
- povećava tačnosti rezultata,
- omogućava kontrolu stabilnosti konstrukcije prema kriterijumima iz *poglavlja III*.

X-2 Predlog kriterijuma dinamičke stabilnosti

Analiza dva osnovna tipa kablovskih rešetki sa vertikalnim (tip "V") i sa kosim zategnutim štapovima ispune (tip "D"), sprovedena je za četiri definisane klase opterećenja (ultra laki krov, vrlo laki krov, laki krov i srednje teški krov), za nivo prednapreznja koji odgovaraju dodatnoj *sili kontakta* od 0.05kN/m² do 0.70kN/m², a za različite kombinacije statičkih i vremenski zavisnih opterećenja od vetra.

Rezultati dinamičkog proračuna pribavljeni su korišćenjem programskog paketa ANSYS, pri čemu je izvršena *modalna analiza, harmonijska analiza superpozicije modalnih i haramonijskih oscilacija i tranzijent analiza* ponašanja modela u toku vremenski zavisnog opterećenja (*poglavlje VII*). Kako u dostupnoj literaturi nisu definisani *kriterijumi za ocenu dinamičke stabilnosti*, autor ove disertacije predlaže da, model koji zadovolji sledeće kriterijume, može se smatrati stabilnom konstrukcijom (*odeljak VII-10.5*):

- (1) Nijedan od kablovskih elemenata ne sme biti nenapregnut, tj. kablovski elementi u svim fazama opterećenja moraju biti zategnuti. Minimalni intenziteti sila ne bi smeli biti manji od 20% sile koja je vladala u užetu u fazi prednapreznja;
- (2) Svojtveni modalni oblici treba da su što jednostavniji;
- (3) Maksimalne dozvoljene amplitude pomeranja čvorova konstrukcije, usled superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija, treba ograničiti na $\delta_{max}=L/200$, gde je δ_{max} maksimalno pomeranje konstrukcije u odnosu na projektovani položaj (faza opterećenja sopstvenom težinom g);
- (4) Uslovi za postizanje rezonance, usled harmonijske pobude koji dovode do velikih deformacija, moraju biti izbegnuti, tj. na modalne frekvence treba uticati nivoom prednapreznja, tako da se ne poklapaju sa frekvencom prinudnih harmonijskih pobuda;

(5) Usled tranzijent pobude - povremenih udara vetrom, model treba brzo da se umiri do nivoa nižih svojstvenih frekvenci (po mogućstvu I).

Predloženi kriterijumi, mogli bi se primenjivati na sve elastične, viseće konstrukcije.

X-3 Analiza definisanih modela po kriterijumima za dinamičku stabilnost

Tabela X-1 prikazuje očiglednu predstavu dinamički stabilnih modela, koji su analizirani u poglavlju VII, prema kategorijama krovnog opterećenja i minimalnim nivoima prednaprezanja, za koje su ispunjeni uslovi (1) do (5).

TABELA X-1

Ispunjenost kriterijuma dinamičke otpornosti modela ispitivanih u poglavlju VII

Tip modela	Kategorije krovnog opterećenja	g=0.15	g=0.30	g=0.50	g=0.75
Tip "D"	Nivo prednaprezanja	v=0.70	v=0.50	v=0.35	v=0.20
Tip "V"	Nivo prednaprezanja	v=0.20	v=0.20	v=0.20	v=0.20

X-4 Metodologija najracionalnijeg proračuna kablovskih rešetki

Metoda proračuna za najracionalnije projektovanje i proračun kablovskih rešetki, primenjena je u poglavljima V, VI i VII, a sastoji se od sledećih koraka:

- (1) Prethodni proračun po modifikovanoj analitičkoj metodi prof. Balgača, primenom programskog modula CABL-T;
- (2) Primena predprocesora za formiranje ulaznih datoteka za proračun po metodi konačnih pomeranja, primenom programskog modula CABL-TP;
- (3) Provera ravnoteže po metodi konačnih pomeranja, programskim modulom CABL-N, bez spoljašnjeg opterećenja;
- (4) Definisane realnih opterećenja: statičkih i vremenski zavisnih (vetar, seizmika, eksplozija...);
- (5) Primena programskog modula CABL-N za definisana statička opterećenja;
- (6) Primena nekog od programskih paketa, po metodi konačnih elemenata, koji sadrži proceduru za rešavanje geometrijski nelinearnih problema, svojstvenih vrednosti, dinamičke analize usled harmonijske pobude i dinamičke tranzijent analize: ESA-Prima Win, STRAUS, LUSAS, DIANA, ANSYS, itd. za pribavljanje dinamičkog odgovora modela za dinamička opterećenja;
- (7) Potrebno je sprovesti modalnu analizu da bi se dobili svojstveni oblici oscilovanja i svojstvene frekvencije. Preporučuje se *metod inverznih iteracija* (Subspace Method), a može da se primeni i redukovani metod (Reduced Method);
- (8) U sledećem koraku, potrebno je sprovesti harmonijsku analizu, *metodom superpozicije modalnih i harmonijskih oscilacija* (Mode Superposition Method), da bi se dobile amplitude usled slaganja vibracija;
- (9) Na kraju, treba izvršiti tranzijent analizu, tj. analizu trenutnih vibracija od vremenski zavisne sile, da bi se pribavila pomeranja i sile usled dejstva dinamičkih sila. Preporučuje se *potpuna tranzijent metoda* (Full Method) jer koristi sve opcije za rešenje geometrijski nelinearnih problema.

X-5 Vetar kao harmonijsko i udarno dejstvo

Dosadašnja praksa prilikom proračuna visećih konstrukcija, tretirala je vetar kao kvazi statičko opterećenje, koje deluje u horizontalnom pravcu, a na delove konstrukcije proizvodi različito veće ili manje dejstvo. Međutim, vetar kao fenomen promenljivog, udarnog i harmonijskog karaktera, u svakom trenutku vremena menja svoj intenzitet, što jasno govori o njegovoj dinamičkoj prirodi. Na osnovu proučavanja anemografskih zapisa i statističkih metoda osrednjavanja, neki strani propisi definišu vetar kao dinamičku udarnu silu koja se ponavlja u definisanim vremenskim intervalima (propisi Velike Britanije, SAD, Kanade, Australije). Međutim, vetar deluje i kao harmonijska sila sa periodom koja se kreće u opsegu od 2.5 do 10 sekundi. Preporučuje se definisanje opterećenja od vetra, prema *odjeljku VII-5*, čime se u potpunosti opravdava primena sveobuhvatnih programskih paketa, kao što je AnSys, za dinamičku analizu modela kablovskih rešetki.

X-6 Poredjenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata

Kombinovani analitičko-iterativni postupak primenjen je na obradu podataka dobijenih merenjima na prototipu kablovske rešetke na krovu bazena "Zdravlje" u Leskovcu. Statički i dinamički odgovor usvojenog matematičkog modela, u poredjenju sa eksperimentalno dobijenim rezultatima poklapa se u granicama statističke pouzdanosti (90% do 100%). Samim tim može se reći da je usvojena i primenjena metodologija proračuna koja je prikazana u *poglavlju V* na *slici V-8* do *V-10* i u ovom poglavlju tačkama (1) do (7), lako primenjiva na klasu problema koji je rešavan u *poglavljima VIII* i *IX*.

Originalni doprinos ove doktorske disertacije može se, na osnovu prethodno analiziranih rezultata, formulisati kao:

- *Analitičko-numerički model statičkog proračuna,*
- *Kriterijumi dinamičke stabilnosti visećih konstrukcija,*
- *Analiza definisanih modela tipa "D" i "V" po kriterijumima za dinamičku stabilnost i preporuke za minimalne nivoe njihovog prednaprezanja,*
- *Uspostavljanje metodologije najracionalnijeg proračuna kablovskih rešetki,*
- *Definisanje vetra kao harmonijskog i udarnog dejstva na viseće konstrukcije.*

Pravci daljeg istraživanja u oblasti unapredjenja proračuna i racionalnog projektovanja visećih konstrukcija mogu se usmeriti na:

- Analizu zamora materijala nosećih elemenata konstrukcije,
- Analizu odgovora više kablovskih rešetki koji su medjusobno spregnuti krovnim pokrivačem koji može imati manju ili veću krutost,
- Analiza ponašanja kablovskih elemenata koji se stabilišu uz pomoć tkanina, u formi šatorastih konstrukcija ...²⁸

28 NULLA DIES SINE LINEA!

Radeći i stvarajući, zasigurno će se pojaviti nešto interesantno, što ovde nije pomenuto, a zavrediće pažnju autora

Literatura

1. Ačić M., Vlajić Lj., Kostić D.: Eksperimentalna analiza dvopojasne lančanice konstrukcije visećeg krova SRC "Zdravlje" u Leskovcu, VII Simpozijum DGKM Ohrid, 1997.
2. AISI Manual for Structural Applications of Steel Cables for Buildings, 1996.
3. Antić Iva: Idejno rešenje kompleksa bazena i vežbaonica za Mediteranske igre u Splitu, Izgradnja 2/80
4. Argyris J., Scharpf D.: Large Deflection Analysis of Prestressed Networks, ASCE Journal of the Structural Division, vol.98 no.ST3, March 1972.
5. Balgač Edmund: Obešeni krov velike izložbene hale leskovačkog sajma tekstila, Betonske prednapregnute konstrukcije, Izgradnja (spec.izd.), 1969.
6. Balgač Edmund: Određivanje sila u kablovima prethodno napregnute mreže obešenih krovova oblika hiperboličkog paraboloida, Izgradnja, 1969.(11, 12)
7. Balgač Edmund: Dva slučaja primene obešenih krovova u nas, Izgradnja, 1975.(1)
8. Balgač Edmund: Die neue Ausstellungshalle der Textilmesse in Leskovac, Beton und Stahlbetonbau, 1961.(7)
9. Balgač Edmund: Obešeni krov doma omladine i sportova u Zemunu, Izgradnja, 1971.(7)
10. Balgač Edmund: Hala za sport i rekreaciju u Subotici, Izgradnja, 1988.(4)
11. Bandel H. K.: Das orthogonale Seilnetzhyperbolisch parabolischer Form unter vertikalen Lastzuständen und Temperaturänderung, Der Bauingenieur 1959. (34) Heft 10
12. BirdAir Inc: Technical Specification & Fabric Characteristics, Tensin Membrane Structures, New York, 1999.
13. Bojović Aleksandar: Poredjenje novih i starih propisa za proračun opterećenja vetrom na primeru, II Kongres DGK Srbije, Arandjelovac, 1992.
14. Božin Miloš: *Dinamika plitkih, gipkih lančanica i prethodno napregnutih mreža*, magistarski rad, Građevinski fakultet u Beogradu, 1983.
15. Christiano P., Seely G., Stefan H.: Transient Wind Loads on Circular Cocave Cable Roofs, ASCE Journal of the Structural Division, vol.100 no.ST11, November 1974.
16. Ciquini C., Contro R.: Prestressing design method for cable net structures, Engeneering Structure 1985.(july)
17. Clough W.R., Penzien J.: *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill Inc. 1993.
18. Conić Miroslav: Dom omladine i sportova u Zemunu, Izgradnja, 1975.(1)
19. Dančević Desimir: *Konstruktivni sistemi u visokogradnji*, Niš 1978.

20. Djukanović Dragomir: Meteorološko-klimatološka studija gradskog enterijera Niša, Beograd, 1970.
21. Dmitriev L. G., Kasilov A. V.: *Vantovnie pokritia*, Budiveljnik, Kiev, 1974.
22. Dovedan Z., Smilevski M., Zalokar J.: Fortran 77 s tehnikama programiranja, Zveza organizacij za tehničko kulturo Slovenije, Ljubljana, 1988.
23. EC 1-Osnove proračuna i dejstva na konstrukcije, EC 3-Proračun čeličnih konstrukcija: Opšta pravila i pravila za zgrade
24. Grujić Branimir: Strand Prestressing System SPB-IMS, Special Issue IMS, Beograd, 1989.
25. Grujić Branimir: Prestressing System IMS - Special Issue IMS, Beograd, 1989.
26. Hajdin Georgije: Neka razmatranja o opterećenju građevinskih konstrukcija vetrom, V Kongres JDGK, Budva, 1974.
27. Irvine Max: Analytical Solutions for Pretensioned Cable Nets, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976.(february)
28. Ivković M., Praščević Ž., Klem N.: Prilog analizi visećih krovova uz primenu elektronskog računara, 14. Jugoslovenski kongres racionalne i primenjene mehanike, Portorož, 1978.
29. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Konstrukcijsko rešenje novog hangara na aerodromu Beograd, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1987.
30. Ivković M., Vukelić S., Mijušković M.: Analiza problema sanacije kompleksa bazena u Splitu, DGKS I Kongres Vrnjačka banja, 1986.
31. Ivković M., Praščević Ž., Klem N.: Prilog proračunu visećih sistema od prethodno napregnutog betona, XII Jugoslovenski kongres racionalne i primenjene mehanike, 1974.
32. Ivković M., Praščević Ž., Nikola K.: Prilog proračunu visećih sistema krutih na savijanje, 15. Jugoslovenski kongres racionalne i primenjene mehanike, Kupari, 1981.
33. Ivković M., Praščević Ž.: Analiza ravnih visećih konstrukcijskih sistema, Simpozijum Teorija konstrukcija-Savremeni problemi nelinearne analize, Kopaonik, 1993.
34. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Concrete Structures With Steel Elements Outside the Concrete Section, publikacija "12-th Congress IABSE, Final Report", International Association for Bridge and Structural Engineering, Vancouver, 1984.
35. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: New Prestressed Concrete Hangar at the Belgrade Internatinal Airport in Yugoslavia, FIP notes, London, 1986/4
36. Ivković Milorad: Konstrukcijsko rešenje krova plivačkog kompleksa u Splitu, Izgradnja, 1980.(9)
37. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Konstrukcijski sistemi sa čeličnim elementima van betonskog dela preseka, Zbornik radova, I kongres DGK Hrvatske, Plitvička jezera, 1984.
38. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Demountable Concrete Structures With Steel Elements Outside the Concrete Section, Proceedings of the International Symposium "Demountable Concrete Structures, a Challenge for Precast Concrete", Rotterdam, 1985.
39. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: New Prestressed Concrete Hangar at the Belgrade Internatinal Airport in Yugoslavia, Proceodings of the 10-th FIP Congress, New Delhi 1986.
40. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: New Prestressed Concrete Hangar at the Belgrade Internatinal Airport in Yugoslavia, Proceodings of the 10-th FIP Congress, New Delhi, 1986.
41. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Konstrukcija novog hangara na aerodromu Beograd, I Kongres DGK Srbije, Vrnjačka banja, 1986.
42. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Design and Construction of the New Prestressed Concrete Hangar at the Belgrade International Airport in Yugoslavia, International Symposium on Fundamental Theory of Reinforced and Prestressed Concrete, Nanjing China, sept. 1986.
43. Ivković M., Radojičić T., Praščević Ž., Radojičić V.: Dvopojasna prethodno napregnuta lančanica plivačkog bazena "Zdravlje" Leskovac, Savetovanje: "Modeliranje, proračun i ispitivanje konstrukcija", Niš, 1993.

44. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Pakvor A.: Krovna konstrukcija nove sportske dvorane u Beogradu, V Simpozijum DGK Makedonije, Ohrid, 1993.
45. Ivković M., Ačić M., Perišić Ž., Alendar V., Marinković S., Tepavčević B.: Računarsko modeliranje i ispitivanje krovne konstrukcije objekta "Beogradska arena", Savetovanje: "Modeliranje, proračun i ispitivanje konstrukcija", Niš, 1993.
46. Jawerth D., Schulz H.: Ein Beitrag zur Eigenschwingungen, windanfahenden Krafte und aerodynamischen Stabilitat bei hangenden Dachern, Der Stalbau, Berlin, Januar 1966.
47. Jurčec Lj., Tretnjak I., Blagus F.: Realizacija konstruktivnog rešenja sportske dvorane u Ćakovcu, VII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1983.
48. JUS U. C7. 110, 111, 112 i 113/1991 Opterećenje vetrom
49. Kar A., Okazaki C.: Convergence in Highly Nonlinear Cable Net Problems, ASCE Journal of the Structural Division, vol.99 no.ST3, March 1973.
50. Kostić Dragan: *Prilog rešenju problema naponsko deformacijskih stanja visećih konstrukcija u zgradarstvu*, magistarska teza, GF Niš, 1994.
51. Kostić D., Radivojević G.: Kontrola ravnoteže visećeg krova tipa prethodno napregnute mreže u referentnom položaju metodom konačnih pomeranja, VI Simpozijum DGKM, Ohrid, 1995.
52. Kostić D., Samardžioska T., Lazarov Lj.: Prikaz sistema prethodno napregnutih mreža za pokrivanje velikih raspona, VII Simpozijum DGKM, Ohrid, 1997.
53. Krishna Prem: *Cable-Suspended Roofs*, McGraw Hill Book Company, 1978.
54. Krunic Miloje: Zoologija invertebrata II deo, Naučna knjiga Beograd, 1986.
55. Leonard J.W.: *Tension Structures-Behavior & Analysis*, McGraw Hill Book Company, 1988
56. Leonhardt F., Schlaich J.: Structural design of roofs over the sports arenas for the 1972. Olympic games: Some problems of prestressed cable net structures, The Structural Engineer 1972.(3)
57. Leonhardt F, Schlaich J: Vorgespannte Seilnetzkonstruktionen - Das Olimpiadach in Munchen, Der Stahlbau 1972.(12)
58. Levy R., Spillers W.R.: *Analysis Of Geometrically Nonlinear Structures*, Chapman & Hall Inc. 1995.
59. Melbourne W.H.: Comfort Criteria for Wind-Induced Motion Structures, Structural Engineering International, 1/98
60. Milosavljević M., Radojković M., Kuzmanović B.: Osnovi čeličnih konstrukcija, GK, Beograd, 1978.
61. Milovanović G., Djordjević Dj.: Programiranje numeričkih metoda na Fortran jeziku, Univerzitet u Nišu, 1981.
62. Milovanović Gradimir: Numerička analiza I, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
63. Mladžov Rumen: *Viseći konstrukcii*, Tehnika, Sofija, 1987.
64. Møllman H.: *Analysis of Hanging Roofs Using the Displacement Method*, Structural Research Laboratory Technical University of Danemark Rapport Nr.R 21 1971.
65. Moskalev N. S.: *Konstrukcii visjačih pokritia*, Stroizdat 1980.
66. Murray T., Williems N.: Analysis of inelastic suspension strutures, ASCE Journal of the Structural Division, 1971.
67. Neškoski Blagoja: Slobodni (nevezani) kablovi za prednaprezanje, VII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1987.
68. Pavlović Z., Petrović-Pavlović S., Petrović M.: Priručnik za noseće čelične konstrukcije, SOUR "GOŠA", Beograd, 1987.
69. Pintarić Nedeljko: Primena BBRV kabela izvan presjeka, DGKH simpozij: Specijalni inžejerski objekti, 1988.

70. Popović G., Grozdanić D., Stajčić P.: Fortran - Zbirka rešenih zadataka, GK, Beograd, 1988.
71. Pfeifer Seil und Hebetchnik GMBH: Katalog Cable Structures, Memingen, 1999.
72. Prašćević Ž., Radojičić T.: *Analiza stanja napona i deformacija dvopojasne lančanice plivačkog bazena "Zdravlje" u Leskovcu*, 1996.
73. Pravilnik o tehničkim propisima za lake čelične građevine kod nosećih čeličnih konstrukcija, Sl.list SFRJ, 6/65
74. Pravilnik o tehničkim normativima za noseće čelične konstrukcije, Sl.list SFRJ, 61/86
75. Predlog pravilnika o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima, Beograd, 1985.
76. Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Beograd, 1981.
77. Radivojević G., Kostić D.: *Viseći konstruktivni sistemi u visokogradnji*, Univerzitet u Nišu, 1993.
78. Radivojević G., Kostić D.: Theoretical Approach To Hanging Roof Systems And The Survey Of Yugoslav Urban Structures Having Such Systems Applied, Facta Universitatis, Niš 1995.
79. Radivojević G., Kostić D.: *Viseći krovni sistemi - kablovske rešetke*, Nauka + Praksa, Institut za građ. i arh GF Niš, 1996.
80. Radivojević G., Kostić D.: Savremene dvopojasne viseće konstrukcije u vertikalnoj ravni za pokrivanje velikih raspona, Sedmi jugosl. I Prvi medjunarodni naucni skup INDIS 97, knj.1, 179-186, Novi Sad, 1997.
81. Radivojević G., Kostić D.: *Viseći konstruktivni sistemi u savremenoj jugoslovenskoj praksi*, INDIS, Novi Sad, 1994.
82. Rajačić Zoran: Neke mogućnosti ispitivanja nevazduhoplovnih objekata u aerotunelima, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat 1987.
83. Rajić Dimitrije: Prilog rešenju membranskog stanja naprezanja ljski oblika hiperboličkog paraboloida - magistarska teza, Beograd
84. Rile H., Kin E., Vajsbah K., Cajter D., Akerman G., Bekman U., Moš H., Pacelt O., Šulc R.: *Prostorne krovne konstrukcije njihove pojedinosti njihovo izvodjenje*, Gradjevinska knjiga, 1977.
85. Ristić Milorad: Teorija lančanica, Predavanja na posleddiplomskim studijama smer: Konstruktivni sistemi na Arhitektonskom fakultetu u Beogradu, 1988./89.
86. Ristić Milorad: *Prilog analizi elastičnih prethodno napregnutih mreža*, Doktorska disertacija Beograd, 1982.
87. Dachs Peter: Uticaj vetra na konstrukcije, GK Beograd, 1986.
88. Schlaich Jörg: O lakim konstrukcijama, Izgradnja, 1988.(7)
89. Scott J., O'Malley K., Guley H.: Suspended Catenary Cable Roof of Oklahoma State Fair Arena, Journal of American Concrete Institute 1965.(april)
90. Seely G., Stefan H., Christiano P.: Static Wind Loads on Circular Concave Cable Roofs, ASCE Journal of the Structural Division, vol.100 no.ST8, August 1974.
91. Sekulović Miodrag: O nekim problemima savremene teorije konstrukcija, II Kongres DGK Srbije Arandjelovac, 1992.
92. Sekulović Miodrag: *Metod konačnih elemenata*, Gradjevinska knjiga, 1984.
93. Sobotka Zdenek: *Zav[š]ené st[ře]chy*, Státní Nakladatelství Technické Literatury, Praha, 1962.
94. Stipić Lajčo: Sajamsko sportska hala u Subotici, Izgradnja, 1975.(2)
95. Stubbins Hugh: Die Kongreshalle in Berlin, Bauwelt, 1956.
96. Sulyok-Selimbegović Marta: Čelične konstrukcije, Zagreb, 2003.

97. Šušnjara Ivica: Ispitivanja gradjevinskih objekata u aerotunelima, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1987.
98. Tanev S., Todoroski G.: Preporuke za usvajanje osnovnih parametara visećih krovnih konstrukcija, II Kongres DGK Srbije, Arandjelovac 1992.
99. Tanev Simeon: *Čelični pokrivni konstrukcii so golemi rasponi*, Habilitacioni rad Skoplje, 1981.
100. Tensoteci & Co: The cabl as structural element
101. Trušev A.G.: Prostranstvenie metaličeskie konstrukcii, Stroizdat, Moskva, 1983.
102. Tsuboi Y., Kawaguchi M.: Earthquake and wind resistant design of a suspension roof structure
103. Urelius D., Fowler D.: Behavior of Prestressed Cable Truss Structures, ASCE Journal of the Structural Division, vol.100 no.ST8, August 1974.
104. Vlajić Ljubomir: *Ponašanje spojeva sa visokovrednim zavrtnjevima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju*, doktorska disertacija, GF Niš, 1993.
105. Vlajić Lj., Živković S.: Prethodna ispitivanja za izradu sanacije kompleksa bazena na Poljudu u Splitu, I Kongres DGK Srbije, Vrnjačka banja, 1986.
106. Vukelić Sava: Aproksimativno odredjivanje geometrije prednapregnute kablovske mreže, VI Kongres JDGK, Bled, 1978.
107. Žagar Zvonimir: Nosive strukture I, II; Fakultet gradjevinskih znanosti, Zagreb, 1979.
108. Zarić B., Stipanić B., Budjevac D.: Čelične konstrukcije u gradjevinarstvu, GK, 1989.
109. Zavod za prostorno i urbanističko planiranje – Niš: Generalni projekat autoputa E-80 deonica Niš-Dimitrovgrad: Studija zaštita životne sredine, Niš, 1991.
110. Zavod za prostorno i urbanističko planiranje – Niš: Generalni projekat autoputa E-80 deonica Niš-Dimitrovgrad: Studija klimatoloških, hidroloških i hidrografskih parametara, Niš, 1991.
111. Zloković Djordje: Prednapregnuti viseći krov sportske dvorane u Nišu, V Kongres JDGK, Budva, 1974.
112. Zloković Djordje: Glavna hala sportskog centra 'Morača' u Titogradu, VI Kongres JDGK, Bled, 1978.
113. Zloković Djordje: Konstruktivni sistemi, Skriptarnica OOSSO Arhitektonskog fakulteta, Beograd
114. Zloković Djordje: Bazenska hala sportskog centra 'Morača' u Titogradu, VII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1983.
115. Zurovac Jovanka: Konstruisanje armirano-betonskih zgrada, Naučna knjiga, 1988.
116. Zbirka-Katalog konkursnih radova: Idejno arhitektonsko rešenje rekonstrukcije, dogradnje i natkivanja istočne tribine Gradskog stadiona u Čairu, Direkcija za izgradnju grada Niša, februar 2000.
117. Zbirka-Katalog konkursnih radova: Idejno arhitektonsko rešenje rekonstrukcije, dogradnje i natkivanja Gradskog stadiona „Čair“ u Nišu, Direkcija za izgradnju grada Niša, decembar 2002.
118. Zbirka uputstava za primenu programskog paketa ANSYS Release 8, Swanson Analysis Systems, Inc. Houston, SAD, 2003.

WEB Sites

<http://www.archinfo.net>

<http://www.arcaro.org/tension>

<http://www.Columbia.edu/cu/gsap/BT>

<http://www.FreiOtto.com>

<http://www.ifai.com/Industrial Fabrics Asotiation International>

<http://www.ksn.com>

<http://www.Lightstructures.de>

<http://www.majowietski.com>

<http://www.sbp.de>

<http://www.sciencedirect.com>

<http://www.sportstaduims.com>

<http://www.stadiumguide.com>

<http://www.structurae.de>

<http://www.taiyokogyo.co.jp/wc-stadium>

<http://www.tensinet.com>

<http://www.triodetic.com>

<http://www.worldstadiums.com>

•

•

•

i linkovi sa pomenutih sajtova.

Prilog

PROGRAMSKI MODUL "CABL-T"

```

c      Program BALGAČ 1 (prethodni proračun)
c      Cable Trus
c-----
c      L0 i Lp0   raspon nosece i stabilisuće lančanice [m]
c      H1 i H2   visina visljeg i nizeg oslonca noseceg lančanice [m]
c      fo_ i fp_ strela nosece, tj. Stabilisuće lančanice u
c              odgovarajućoj fazi opterećenja [m]
c      g, s, w, v realna opterećenja koja deluju na kablovsku resetku
c              (sopstvena težina, sneg, vetar, "kontaktna sila") [kN/m2]
c      qn_ i qp_ opterećenja koja deluju na noseći, tj. Stabilisući kabl
c              u odgovarajućoj fazi opterećenja (sopstvena težina,
c              sneg, vetar, "kontaktna sila") [kN/m2]
c      k, k1     verovatni pritisak na noseći, tj. Stabilisući kabl
c-----
c      Program
c-----
      integer imax, ym, ss, iter, pp
      real l0, lp0, h1, h2, h, f0, fo0, fo1, fo2, fo3, fo4, fo5, fo6, fp0, fp01, fp02,
*fp03, fp04, fp05, fp06, a, fn, fp, g1, s1, w1, v1, q1, q, mg, mp, kv, klv, g, x1, xd,
*eps, qn1, qn2, qn3, qn4, qn5, qn6, qp1, qp2, qp3, qp4, qp5, qp6, k, k1
      common l0, lp0, f0, fp0, h, ym, fn, fp, g, q, ss, mp
      external fun
      print *, 'Program CABL-TP'
      print *, 'za izracunavanje geometrije sistema i sila u stapovima'
      print *, 'prethodnonapregnutih KABLOVSKIH RESETKI'
      print *
      print *, 'ULAZNI PODACI'
c
c      unosenje pocetnih vrednosti
c
      open(1, file='F1')
      open(2, file='F13', status='new')
      open(3, file='F3')
      read(1,1) ym, fn, fp, lp0, f0, fp0
1      format(i10, 6f10.6)
      read(1,20) imax, eps
20     format(i5, f10.6)
      write(2,2)
2      format(/'Program BALGAČ 1'/'za izracunavanje geometrije sistema i
*sila u stapovima'/'prethodnonapregnutih KABLOVSKIH RESETKI'//
*'ULAZNI PODACI')
      print *, 'Uneti raspon glavne nosece lančanice L0 [m]:'
      read (*,*) L0
      write(2,3) L0
3      format('Raspon glavne nosece lančanice L0 [m]   = ', f7.2)
      write(2,19) LP0
19     FORMAT('Raspon glavne pomocne lančanice LP0 [m] = ', f7.2)
      print *, 'Uneti visinu nizeg oslonca H1 [m]:'
      read (*,*) h1
      write(2,4) h1
4      format('Visina nizeg oslonca .....H1 [m]   = ', f7.2)
      print *, 'Uneti visinu visljeg oslonca H2 [m]:'
      read (*,*) h2
      write(2,5) h2
5      format('Visina visljeg oslonca .....H2 [m]   = ', f7.2)
      h=abs(h1-h2)
      write(2,6) f0
6      format('Strela nosece lanc ..... F0 [m]   = ', f7.2)
      write(2,7) fp0
7      format('Strela pomocne lanc.....FP0 [m]   = ', f7.2)
      write(2,8) h
8      format('Razlika u visini oslonaca .....H [m]   = ', f7.2)
      print *, 'Uneti rastojanje izmedju kabl.resetki A [m]:'
      read (*,*) a
      write(2,9) a
9      format('Rastojanje izmedju kabl.resetki.A [m]   = ', f7.2)
      write(2,10) ym
10     format('Yungov moduo elasticnosti ....YM [kN/m2]= ', i10)
      write(2,11) fn

```

```

11  format('Povrsina preseka nos. kabla ...FN [m2] = ',f10.6)
    write(2,12) fp
12  format('Povrsina preseka pomoc. kabla FP [m2] = ',f10.6)
    print *, 'Uneti sopstvenu tezinu krova G1 [kN/m2]:'
    read (*,*) g1
    write(2,13) g1
13  format('Sopstvena teжина krova ..... G1 [kN/m2]=' ,f7.2)
    print *, 'Uneti opterećenje od snega S1 [kN/m2]:'
    read(*,*)s1
    write(2,14) s1
14  format('Opterećenje od snega ..... S1 [kN/m2]=' ,f7.2)
    print *, 'Uneti opterećenje od vetra W1 [kN/m2]:'
    read(*,*)w1
    write(2,15) w1
15  format('Opterećenje od vetra ..... W1 [kN/m2]=' ,f7.2)
    print *, 'Uneti preostalu silu iz pomocnih kablova V1 [kN/m2]:'
    read(*,*) v1
    write(2,16) v1
16  format('Preost. sila iz pomoc.kablova V1 [kN/m2]=' ,f7.2)
100 print *, 'Uneti verovatni pritisak K i K1 [kN/m]:'
    read(*,*) kv, klv
    print *, 'Najveće gravitaciono opterećenje?   NGO=1 (q=g+s) ili
*NGO=2 (q=g+s+w) '
    read *,ngo
    gf0=f0
    gfp0=fp0
103  f0=gf0
    fp0=gfp0
    g=2.*(a*v1+kv-klv)+a*g1
    q1=g1+s1+w1+v1
    q=a*q1
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za neopterećen krov ( 0 faza opt. )
c-----
    read(3,'(2f10.2)') x1,xd
    ss=1
    call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
    fo0 = f0-df0
    fpo0 = fp0+df0
    write(2,28)
28  format(/////,'Strele osn.noseceg, osn.pomocnog kabla i opterećenja
* koja deluju na njih'/)
    write(2,29)
29  format(16x,'df0',5x,'fo_',5x,'fpo_',4x,'qn_',5x,'qp_')
    write(2,30)
30  format(15x,'[kN/m]',2x,'[kN/m]',2x,'[kN/m]',2x,'[kN/m]',2x,'[kN/m
*]',/)
    write(2,32) df0,fo0,fpo0,qn0,qp0
32  format('0 faza opt.',5(2x,f6.3))
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov pod punim gravitacionim opterećenjem
c          ( IV faza opt. )
c-----
    read(3,'(2f10.2)') x1,xd
    ss=2
    f0 = fo0
    fp0 = fpo0
    if(ngo.eq.1) go to 200
    if(ngo.eq.2) go to 205
200  q=q-a*w1
205  call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
    fo4 = fo0+df0
    fpo4 = fpo0-df0
    qn4 = q
    qp4 = a*v1
    write(2,42) df0,fo4,fpo4,qn4,qp4
42  format('IV faza opt.',5(2x,f6.3))

```



```

c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov u fazi prednaprezanja
c          ( I faza opt. )
c-----
      read(3,'(2f10.2)') x1,xd
      ss=1
      if(ngo.eq.1) go to 530
      g = a*(g1+s1+w1)
      go to 540
530  g=a*(g1+s1)
540  f0 = fo4
      fp0 = fpo4
      call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
      fo1 = fo4-df0
      fpo1 = fpo4+df0
      k = (2.*fpo4**2*df0+3.*fpo4*df0*df0)/mp
      qn1 = k+a*v1
      qp1 = k+a*v1
      write(2,52) df0,fo1,fpo1,qn1,qp1
52   format('I faza opt.',5(2x,f6.3))
      print *, 'kv =',kv,'          k =',k,'          k-kv =',k-kv
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov optercen sopstvenom tezinom
c          ( II faza opt. )
c-----
      read(3,'(2f10.2)') x1,xd
      ss=3
      g = a*g1
      f0 = fo1
      fp0 = fpo1
      call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
      fo2 = fo1+df0
      fpo2 = fpo1-df0
      k1 = fpo1*df0*(2.*fpo1-df0)/mp
      qn2 = qn1+g-k1
      qp2 = qp1-k1
      write(2,62) df0,fo2,fpo2,qn2,qp2
62   format('II faza opt.',5(2x,f6.3))
      print *, 'k1v =',k1v,'          k1 =',k1,'          k1-k1v =',k1-k1v
      if(abs(k1-k1v).le.0.001.and.abs(k-kv).le.0.001) goto 104
      k1v=k1
      kv=k
      goto 103
104  continue
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov optercen sopstvenom tezinom i snegom
c          ( III faza opt. )
c-----
      read(3,'(2f10.2)') x1,xd
      ss=3
      g = a*s1
      f0 = fo2
      fp0 = fpo2
      call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
      fo3 = fo2+df0
      fpo3 = fpo2-df0
      k1 = fpo2*df0*(2.*fpo2-df0)/mp
      qn3 = qn2+g-k1
      qp3 = qp2-k1
      write(2,72) df0,fo3,fpo3,qn3,qp3
72   format('III faza opt',5(2x,f6.3))
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov optercen snegom i sisajucim vetrom
c          ( V faza opt. )
c-----
      read(3,'(2f10.2)') x1,xd
      ss=1

```

```

g = a*w1
f0 = fo3
fp0 = fpo3
call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
fo5 = fo3-df0
fpo5 = fpo3+df0
k = (2.*fpo3**2*df0+3.*fpo3*df0*df0)/mp
qn5 = qn3+k-w1*a
qp5 = qp3+k
write(2,82) df0,fo5,fpo5,qn5,qp5
82  format('V  faza opt.',5(2x,f6.3))
c-----
c          PRORACUN STRELA I OPTERECENJA
c          za krov optercen sopst.tez. i sisajucim vetrom
c          ( VI faza opt. )
c-----

read(3,'(2f10.2)') x1,xd
ss=1
g = a*w1
f0 = fo2
fp0 = fpo2
call regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
fo6 = fo2-df0
fpo6 = fpo2+df0
k = (2.*fpo2**2*df0+3.*fpo2*df0*df0)/mp
qn6 = qn2+k-w1*a
qp6 = qp2+k
write(2,92) df0,fo6,fpo6,qn6,qp6
92  format('VI faza opt.',5(2x,f6.3))
close(1)
close(2)
close(3)
print *, 'Napisao   Dragan S.Kostic,   2006.'
stop
end

c -----
c          function fun(df0)
c-----
integer ss, ym
real 10,lp0,f0,fp0,h,fn,fp,mg,mp,x,g,q,ma,mb
common 10,lp0,f0,fp0,h,ym,fn,fp,g,q,ss,mp
if(ss.eq.1) go to 5
if(ss.eq.2) go to 10
if(ss.eq.3) go to 15
5  mg = (3.*10**4+16.*f0**2*10**2+3.*10**2*h*h)/(64.*ym*fn)
mp = (3.*lp0**4+16.*lp0**2*fp0**2)/(64.*ym*fp)
fun = (f0/mg-3.*fp0/mp)*df0**2-(2.*f0**2/mg+2.*fp0**2/mp)*df0+g
go to 20
10 continue
ma = (q*10*10)/(4.*ym*fn)
mb = 3.*(10*10+h*h)/16.
fun = df0**3+(3.*f0-ma)*df0**2+(2.*f0*f0-2.*ma*f0)*df0-(mb+f0*f0)
**ma
go to 20
15 continue
mg = (3.*10**4+16.*f0**2*10**2+3.*10**2*h*h)/(64.*ym*fn)
mp = (3.*lp0**4+16.*lp0**2*fp0**2)/(64.*ym*fp)
fun = (3.*f0/mg-fp0/mp)*df0**2+(2.*f0**2/mg+2.*fp0**2/mp)*df0-g
20 return
end

c=====
c          SUBROUTINE lagr(n, m, x, y, rx, ry)
c-----
c          Podprogram za interpolaciju pomocu
c          Lagrangeove inerpolacione formule
c
dimension x(200), y(200), rx(200), ry(200)
do 20 i=0,m-1
ry(i)=0.

```

```

do 20 j=1,n
p=1.
do 10 k=1,n
if(j.eq.k)go to 10
p=p*(rx(i)-x(k))/(x(j)-x(k))
10 continue
20 ry(i)=ry(i)+y(j)*p
return
end

C=====
      subroutine regul(x1,xd,eps,imax,df0,iter,fun)
C-----
C      Podprogram za izracunavanje korena nelinearne
C      jednacine pomocu metode Regula falsi
C
C      m = broj resenja
C      eps = tacnost proracuna
C      imax = dozvoljeni broj iteracija
C      x1 = donja granica
C      xd = gornja granica
C
C      iter = 1
C      y1 =fun(x1)
C      yd=fun(xd)
C      if(y1*yd.gt.0.)go to 300
100 if(iter.ge.imax)go to 300
C      iter=iter+1
C      df0=(xd*y1-x1*yd)/(y1-yd)
C      y=fun(df0)
C      if(y1*y.gt.0.)go to 200
C      if(abs(xd-df0).lt.eps)go to 300
C      xd=df0
C      yd=y
C      go to 100
200 if(abs(x1-df0).lt.eps)go to 300
C      x1=df0
C      y1=y
C      go to 100
300 return
      End

```

Program je zamišljen kao interaktivan programski modul, koji podatke koji su promenljivi u toku rada, preuzima sa konzole računara, dok podatke koji su usvojeni kao konstantni parametri geometrije i fizičkih veličina (Y_m , F_{n0} , F_{p0} , L_0 i L_{p0}) preuzima iz formatirane ulazne datoteke F1 i F3.

Format ulaznih podataka vidi se iz READ naredbi glavnog programa (linije 35 do 38).

Izlazna datoteka F13 sadrži podatke o opterećenjima nosećeg kabla i stabilizujućeg kabla i promene strela na prelasku iz pojedinih faza opterećenja.

Program BALGAČ 2 - II deo

```

C      proracun * geometrije sistema,
C      * sila u stapovima nosećih kablova
C      * sila u stapovima pomocnih kablova
C
C      integer imax, ym, ss, iter,pp
C      real l0,lp0,h1,h2,h,f0,fo0,fo1,fo2,fo3,fo4,fo5,fo6,fp0,fpo1,fpo2,
C      *fpo3,fpo4,fpo5,fpo6,a,fn,fp,g1,s1,w1,v1,q1,q,mg,mp,kv,k1v,g,x1,xd,
C      *eps,qn1,qn2,qn3,qn4,qn5,qn6,qp1,qp2,qp3,qp4,qp5,qp6,k,k1,LnO(200),
C      *lpo(200)
C      real lpp(200),lpI(200)
C      dimension x(200), y(200), rx(200), ry(200),CC(200), CALFA(200),
C      *fno(200), hh(200), hs(200), vs1(200), vs2(200), sk1(200),
C      *sk2(200), skn(200,200),fp1(200),hp(200),vp(200),sp(200),

```

```

*skp(200,200),fo(7),fpo(7),qn(7),qp(7)
dimension fpp(200),dfs(200),ds1(200),ds2(200),ds3(200),
*ds(200),fpI(200),sp1(200)
common l0,lp0,f0,fp0,h,ym,fn,fp,g,q,ss,mp
external fun
c-----
c      unosenje pocetnih vrednosti iz fajla F13
c-----
      open(1,file='F13',status='old')
      open(2,file='f10',status='new')
      open(3,file='f11',status='new')
      open(4,file='f12',status='new')
      read(1,10)
10      format(///// )
      read(1,11) l0
11      format(42x,f7.2)
      read(1,15) lp0
      read(1,15) h1
      read(1,15) h2
15      format(42x,f7.2)
      read(1,21)
21      format(/)
      read(1,20) h
20      format(42x,f7.2)
      read(1,15) a
      read(1,25) ym
25      format(42x,i10)
      read(1,30) fn
30      format(42x,e11.4)
      read(1,30) fp
      read(1,31)
31      format(//////////)
      read(1,35) fo0, fpo0, qn0, qp0
35      format(20x,4(f8.3))
      read(1,36) fo4, fpo4, qn4, qp4
36      format(20x,4(f8.3))
      read(1,36) fo1, fpo1, qn1, qp1
      read(1,36) fo2, fpo2, qn2, qp2
      read(1,36) fo3, fpo3, qn3, qp3
      read(1,36) fo5, fpo5, qn5, qp5
      read(1,36) fo6, fpo6, qn6, qp6
      fo(1)=fo1
      fo(2)=fo2
      fo(3)=fo3
      fo(4)=fo4
      fo(5)=fo5
      fo(6)=fo6
      fpo(1)=fpo1
      fpo(2)=fpo2
      fpo(3)=fpo3
      fpo(4)=fpo4
      fpo(5)=fpo5
      fpo(6)=fpo6
      qn(1)=qn1
      qn(2)=qn2
      qn(3)=qn3
      qn(4)=qn4
      qn(5)=qn5
      qn(6)=qn6
      qp(1)=qp1
      qp(2)=qp2
      qp(3)=qp3
      qp(4)=qp4
      qp(5)=qp5
      qp(6)=qp6
      do 40 i=1,6
      print*, fo(i), fpo(i), qn(i), qp(i)
40      continue
c*****
c      Proracun geometrije sistema i sila u stapovima
c*****

```

```

n=3
nn=10/a-1
pp=lp0/a-1
do 61 kk=1,6
write(2,55) kk
55 format(///15x,'GEOMETRIJA SISTEMA',//15x,i3,'. faza opterecenja',
*/)
write(3,56) kk
56 format(///15x,'SILE U NOSECIM KABLOVIMA SISTEMA',//15x,i3,'. faza
* opterecenja',/)
write(1,580) kk
580 format(///5x,'SILE U OSLONCIMA NOSECIH KABLOVA',//15x,i3,'. faza
* opterecenja',/)
write(1,582)
582 format(1x,'r.br.lanc.',3x,'strela',3x,'raspon',5x,'vs1(1)',3x,'vs2
*(1)',4x,'hs(1)',5x,'sk1(1)',5x,'sk2(1)')
write(1,583)
583 format(15x,'[m]',7x,'[m]',6x,'[kN]',6x,'[kN]',6x,'[kN]',6x,'[kN]'
*,6x,'[kN]',/)
c*****
c Proracun sila u stapovima nosejih kablova za
c FAZU OPTERECENJA (indikator faze opt. kk=1 do 6)
c*****
ii=0
m=pp+2
do 59 l=0,nn/2
x(1)=-((10-ii*a)/2.)
dd=sqrt((10/2.)**2+(lp0/2.)**2)
talfal=h1/dd
talfa2=h2/dd
tgalf2=h2/(10/2.)
y(1)=(dd-1*(dd/(nn/2+1)))*talfal
x(2)=0.
y(3)=(dd-1*(dd/(nn/2+1)))*talfa2
x(3)=(10-a*ii)/2.
fno(1)=(1.-2.*a*1/10)*(fo(kk)-fpo(kk)*2.*1*a/10)
y(2)=(y(1)+y(3))/2.-fno(1)
do 58 i=0,m-1
58 rx(i)=x(1)+i*a
call lagr(n, m, x, y, rx, ry)
hh(1)=h*(1-2.*a*1/10)
lno(1)=abs(x(1))+abs(x(3))
hs(1)=qn(kk)*lno(1)**2/(8.*fno(1))
vs1(1)=0.5*qn(kk)*lno(1)*(1.-hh(1)/(4.*fno(1)))
vs2(1)=0.5*qn(kk)*lno(1)*(1.+hh(1)/(4.*fno(1)))
sk1(1)=sqrt(hs(1)**2+vs1(1)**2)
sk2(1)=sqrt(hs(1)**2+vs2(1)**2)
write(1,585) l,fno(1),lno(1),vs1(L),vs2(1),hs(1),sk1(1),sk2(1)
585 format(i10,7f10.4)
do 57 i=1,m-1
cc(i) = sqrt(a*a+(ry(i)-ry(i-1))**2)
calfa(i) = a/cc(i)
skn(l,i)=hs(1)/calfa(i)
57 continue
write(2,60) (ry(i),i=0,m-1)
write(3,60) (skn(l,i),i=1,m-1)
60 format(200f10.4)
m=m-2
ii=ii+2
59 continue
61 continue
c*****
c Proracun sila u stapovima pomocnih kablova za
c FAZU OPTERECENJA (indikator faze opt. kk=1 do 6)
c*****
do 600 kk=1,6
write(1,595) kk
595 format(///5x,'SILE U OSLONCIMA POMOCNIH KABLOVA',//15x,i3,'. faza
*opterecenja',/)
write(1,597)
597 format(1x,'r.br.lanc.',2x,'strela',3x,'raspon',5x,'hp(1)',4x,'vp(1)

```

```

*)', 6x, 'sp(1)')
write(1,598)
598 format(15x, '[m]', 7x, '[m]', 6x, '[kN]', 6x, '[kN]', 6x, '[kN]', /)
write(4,700) kk
700 format(///15x, 'SILE U POMOCNIM KABLOVIMA SISTEMA [kN]', //10x, i3,
*. Faza opterećenja', /2x, ' -> Y osa', /2x, ' ^ X osa', /, 'br.lanc.'
*, 15x, 'štapovi pripadajuće lancanice', /)
ii=0
m=nn+2
do 590 l=0, pp/2
x(1)=-((lp0-ii*a)/2.)
dd=sqrt((10/2.)**2+(lp0/2.)**2)
talfal=h1/dd
talfa2=h2/dd
tgalff2=h2/(10/2.)
y(1)=(0+l*(dd/(nn/2+1)))*talfal
x(2)=0.
y(3)=y(1)
x(3)=(lp0-a*ii)/2.
fpl(1)=fpo(kk)+(a*l/10)*(4.*fo(kk)*a*l/10+h)-a*l*tgalff2
y(2)=y(1)+fpl(1)
do 592 i=0, m-1
592 rx(i)=x(1)+i*a
call lagr(n, m, x, y, rx, ry)
lpo(1)=abs(x(1))+abs(x(3))
hp(1)=qp(kk)*lpo(1)**2/(8.*fpl(1))
vp(1)=qp(kk)*lpo(1)/2.
sp(1)=sqrt(hp(1)**2+vp(1)**2)
write(1,599) l, fpl(1), lpo(1), hp(L), vp(1), sp(1)
599 format(i10, 5f10.4)
do 589 i=1, m-1
cc(i) = sqrt(a*a+(ry(i)-ry(i-1))**2)
calfa(i) = a/cc(i)
skp(1,i)=hp(1)/calfa(i)
589 continue
mk=m/2
write(4,710) l, (skp(1,i), i=mk, 1, -1)
710 format(i5, 200f10.4)
m=m-2
ii=ii+2
590 continue
600 continue
close (1)
close (2)
close (3)
close (4)
print *
print *, 'Napisao Dragan S. Kostic, 2006.'
stop
end

```

Program preuzima podatke iz ulazne datoteke F13. Pre aktiviranja programa Balgac 2, potrebno je otvoriti datoteku F13: da li odgovara formatu koji zahteva program (labela naredbe za formatiranje 10 do 36), i da li su rezultati logični?

Program će preuzeti potrebne podatke iz F13 i preko svojih računskih blokova, analitičkim postupkom prof. Balgača koji je prezentiran u poglavlju V, sračunati konfiguraciju sistema i sile u štapovima rešetke za zadata opterećenja i fizičke karakteristike modela.

Izlazni podaci smeštaju se u datoteke F10, F11, F12 i F13 koja se dopunjuje podacima o strelama u različitim fazama opterećenja i silama u štapovima sistema.

PROGRAMSKI MODUL CABL-TP

```

c=====
c      Program za numericku interpolaciju kvadratne parabole
c-----
c          ***      Parametri programa      ***
c      nk= broj kablova
c      jn(i)= redni broj tacke za koju se trazi interpolacija
c      n = broj ulaznih parova podataka (interpolacioni cvorovi,3 kom)
c      m = broj tacaka za koje se trazi interpolacija
c      x = nezavisno promenljiva (x-koordinate cvorova)
c      y = zavisno promenljiva (y-koord. cvorova)
c      rx = interpolacione tacke (m kom.)
c      A(jn,rx,ry)= neuredjeno polje trojki podataka
c-----
c      Program
c=====
      dimension x(50), y(50), rx(50), ry(50),jn(100),a(100,2),jsn(100),
*smf(4),aoc(4),temp(100)
      integer zamena,prolaz
      real lokal(3)
      open(2,file='lagr.inp')
      open(3,file='lagr.out')
      read(2,'(i5)')nk
      do 1 k=1,nk
        read(2,'(2i5)')n, m
        read(2,'(2f10.4)')(x(i), y(i), i=1,n)
      do 2 i=1,m
        read(2,'(i5,f10.4)') jn(i),rx(i)
2      continue
      call lagr(n,m,x,y,rx,ry)
      write(3,10) (jn(i),rx(i),ry(i),i=1,m)
10     FORMAT(i5,2f12.4)
      if(k.eq.1) then
        m01=m
      else
        m02=m
      endif
1     continue
      rewind(3)
      do 35 i=1,(m01+m02)
        read(3,45) jn(i),a(i,1),a(i,2)
        print*,jn(i),a(i,1),a(i,2)
45     format(i5,2f12.4)
35     continue
c-----
c      Uredjenje polja metodom mehurova 'Bubble sort'
c-----
      prolaz=0
20     zamena=0
      prolaz=prolaz+1
      do 30 i=1,(m01+m02-prolaz)
        if(jn(i).gt.jn(i+1)) then
          lokal(1)=jn(i)
          lokal(2)=a(i,1)
          lokal(3)=a(i,2)
          jn(i)=jn(i+1)
          a(i,1)=a((i+1),1)
          a(i,2)=a((i+1),2)
          jn(i+1)=lokal(1)
          a((i+1),1)=lokal(2)
          a((i+1),2)=lokal(3)
          zamena=1
        endif
30     continue
c      .. Kontrola prolaza
      if(zamena.ne.0) go to 20
c.....
c      Formiranje ulaznog fajla INPUT.DAT
c.....
c      Podaci o koordinatama cvorova i da li su oslonacki

```

```

c
write(3,11)
11 format(///,'uredjeni skup')
print*,'NSTR - Number of STRuctures'/
read(*,*) nstr
write(3,101) nstr
101 format(i4)
print*,'IPT, NDF, NOL, NOJ, NOSJ, nolsj,norsj, NOCS'
read(*,*) ipt,ndf,nol,noj,nosj,nolsj,norsj,nocs
write(3,102) ipt,ndf,nol,noj,nosj,nocs
102 format(6i6)
print*,'JSN - Joint Support Number'
do 41 i=1,m01+m02
jsn(i)=0
41 continue
do 40 i=1,nolsj
read(*,*) jsn(i)
40 continue
do 42 i=(m01+m02-norsj+1),(m01+m02)
read(*,*) jsn(i)
42 continue
jsn0=0
jsn1=1
50 format(i6,2f12.4,20x,i6)
do 13 i=1,(m01+m02)
if(jn(i).eq.jsn(i)) then
write(3,50) jsn1,a(i,1),a(i,2),jn(i)
else
write(3,50) jsn0,a(i,1),a(i,2),jn(i)
endif
13 continue
c .....
c Podaci o stapovima
c (sila prednaprezanja u referentnom poloazaju, Yungov moduo
c elasticnosti, poprecni presek, povezivanje sa cvorovima
c.....
print*,'PODACI O STAPOVIMA'
print*
print*,'Broj razlic. tipova kablova NTIP=3'
print*,' Broj stapova u preth.naprezucem kabl u NpSTAP'
print*,' Broj stapova u elementima ispune NDIJA1'
print*,' Broj stapova u nosecem kabl u NnSTAP'/'
ntip=3
read(*,*) npstap,ndijal,nnstap
do 51 j=1,ntip
print*,'Pomocni kabl: Moduo elast. YM [kN/m2], h.sila [kN],
*Popr.presek [m2]'/
read(*,*) ym,smf(j),aoc(j)
51 continue
do 60 j=1,nocs
if((j.gt.npstap).and.(j.le.(npstap+ndijal))) then
m=2
elseif((j.gt.(npstap+ndijal)).and.(j.le.nocs)) then
m=3
else
m=1
endif
print*,'IJOM(1) i (2) - povezivanje, ICPR, MTI'
read(*,*) ijom1,ijom2,icpr,mti
do 55 i=1,m01+m02
if(ijom1.eq.jn(i)) then
xx1=a(i,1)
yy1=a(i,2)
else
endif
if(ijom2.eq.jn(i)) then
xx2=a(i,1)
yy2=a(i,2)
else
endif
55 continue

```



```

        if(m.eq.2) go to 59
        sls=sqrt((xx2-xx1)**2+(yy2-yy1)**2)
        calfa=abs(xx2-xx1)/sls
        smfc=smf(m)/calfa
        go to 58
59      smfc=smf(m)
58      write(3,56) smfc,ym,aoc(m),ijom1,ijom2,icpr,mti
56      FORMAT (F14.4,f16.2,f10.6,4I6)
60      continue
C.....
c      Upisivanje intenziteta opterecenja u slobodnim cvorovima
C.....
        do 65 m=1,nol
        print*,'Faza opterecenja ',m
        print*,'Limit Numb.of Iterations LNIT, I/O Interface IOI'
        read(*,*) lnit,ioi
        print*,'% Tolerance Limit TOL, Abs.Deflection DPI'
        read(*,*) tol,dpi
        write(3,102) lnit,ioi
        write(3,'(2f12.4)') tol,dpi

        do 70 j=1,(noj-nosj)
        print*,(noj-nosj)
        print*,'Joint number JN, X-load XL, Y-load YL'
        read(*,*) jn,xl,yl
        write(3,80) jn,xl,yl
80      format(i6,2f12.4)
70      continue
        print*,'Temperature change TEMP'
        read(*,*) temp
        do 71 k=1,nocs
        write(3,75) temp(k)
75      format(6f12.4)
71      continue
65      continue
        close (2)
        close(3)

        stop
        end

C=====
        SUBROUTINE lagr(n,m,x,y,rx,ry)
C-----
c      Podprogram za interpolaciju pomocu
c      Lagrangeove inerpolicione formule
C-----
        dimension x(50), y(50), rx(50), ry(50)
        do 20 i=1,m
        ry(i)=0.
        do 20 j=1,n
        p=1.
        do 10 k=1,n
        if(j.eq.k) goto10
        p=p*(rx(i)-x(k))/(x(j)-x(k))
10      continue
20      ry(i)=ry(i)+y(j)*p
        return
        end

```

Deo ulaznih podataka smešten u datoteku LAGR.INP

Format ulaznih podataka vidi se iz READ naredbi glavnog programa.

Izlazna datoteka je LAGR.OUT koja treba da se oslobodi nepotrebnih početnih linija i proveriti u nekom od ASCII editora.

PROGRAMSKI MODUL **CABL-N** može se preuzeti iz [53] zajedno sa uputstvom za njegovu primenu.