Modificirana fotogrametrijska metoda u gradnji broda

Ljubenkov, Boris

Doctoral thesis / Disertacija

2006

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:219064

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

MODIFICIRANA FOTOGRAMETRIJSKA METODA U GRADNJI BRODA

DOKTORSKI RAD

MENTOR
TOMISLAV ZAPLATIĆ

BORIS LJUBENKOV

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 629.5.081

Ključne riječi: brodograđevni proizvodni proces, kontrola dimenzija i oblika, fotogrametrija, fotogrametrijski sustav

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Brodogradnja

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Mentor rada: Dr. sc. Tomislav Zaplatić, izv. prof.

Broj stranica: 163

Broj slika: 130

Broj tablica: 34

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 31

Datum obrane:

Povjerenstvo: Dr. sc. Želimir Sladoljev, prof. emeritus
Akademik Stjepan Jecić
Dr. sc. Tomislav Zaplatić, izv. prof.
Dr. sc. Nikša Fafandjel, izv. prof.
Dr. sc. Mladen Gomerčić, dipl.ing.

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem se od srca prof. dr. sc. Želimiru Sladoljevu, akademiku Stjepanu Jeciću, mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Zaplatiću, prof. dr. sc. Nikši Fafandjelu i dr. sc. Mladenu Gomerčiću na neizmjernoj stručnoj pomoći u toku izrade disertacije.

Zahvaljujem kolegama iz Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku doc. dr. sc. Janošu Kodvanju, Anti Bakiću dipl.ing., mr. sc. Nenadu Drvaru te g. Tomislavu Hercigonji iz tvrtke 'Topomatika' što su mi omogućili korištenje fotogrametrijskog sustava te sudjelovali u radu korisnim savjetima i nesebičnom pomoći.

Zahvaljujem kolegama iz brodogradilišta Split: mr. sc. Anti Čaglju, Tomi Coliću dipl.ing., Marku Vukšiću dipl.ing., Karmeli Prlac dipl.ing., Petru Buljanu dipl.ing., Matku Baliću dipl.ing., Duji Brajeviću dipl.ing. i Goranu Kovačeviću dipl.ing. na pomoći u prikupljanju potrebne dokumentacije brodogradilišta.

Velikom pomoći, podrškom i razumijevanjem zadužili su me roditelji, brat, supruga, Majstori i prijatelji kojima se posebno zahvaljujem i posvećujem im ovaj rad.

SADRŽAJ

PREDGOVOR..... iii
SAŽETAK..... iv
SUMMARY..... vi
POPIS SLIKA..... viii
POPIS TABLICA..... xi
POPIS POJMOVA..... xii

1. UVOD..... 1
1.1. DEFINICIJA PROBLEMA I CILJEVI..... 1
1.2. DOSADAŠNJE SPOZNAJE..... 3
1.3. HIPOTEZA..... 5

2. KONTROLA DIMENZIJA I OBLIKA U BRODOGRADNJI..... 6
2.1. UVOD..... 6
2.2. TRADICIONALNE METODE KONTROLE..... 6
2.2.1. ALATI MJERENJA DULJINA..... 7
2.2.2. ALATI MJERENJA KUTEVA..... 7
2.2.3. ALATI MJERENJA POLOŽAJA..... 7
2.2.4. POMAGALA KONTROLE OBLIKA..... 8
2.3. OPTIČKE METODE KONTROLE..... 8
2.4. KONTROLA U PREDMONTAŽI..... 15
2.4.1. KONTROLA UKRIJEPLJENIH PANELA..... 17
2.4.2. KONTROLA RAVNIH SEKCIJA..... 18
2.4.3. KONTROLA ZAKRIVLJENIH SEKCIJA..... 21
2.4.4. KONTROLA BLOKOVA..... 24
2.5. KONTROLA U MONTAŽI 27
2.5.1. KONTROLA MONTAŽE SEKCIJA..... 28
2.5.2. KONTROLA IZMJERA I OBLIKA BRODA..... 34
2.6. DOPUŠTENA ODSTUPANJA 36

3. FOTOGRAMETRIJA..... 41
3.1. UVOD..... 41
3.2. TEORIJSKA OSNOVA METODE..... 42
3.3. FOTOGRAMETRIJSKI SUSTAV..... 44
3.3.1. UVJETI KORIŠTENJA..... 48
3.3.2. OSNOVNE OPERACIJE PROGRAMA..... 49
3.4. POSTUPAK MJERENJA..... 52
3.4.1. ZADATAK MJERENJA I STRATEGIJA SNIMANJA..... 53
3.4.2. POSTAVLJANJE MJERNIH TOČAKA I MJERNIH MOTKI..... 53
3.4.3. PRIPREMA FOTOAPARATA..... 54
3.4.4. SNIMANJE..... 56
3.4.5. OBRADA FOTOGRAFIJA..... 59
3.4.6. ANALIZA REZULTATA..... 60
3.5. RAZVOJ FOTOGRAMETRIJSKOG SUSTAVA..... 63

4. PRIMJENA FOTOGRAMETRIJE U BRODOGRADNJI..... 67
4.1. FOTOGRAMETRIJA U OBRADI ELEMENATA..... 68
4.2. FOTOGRAMETRIJA U PREDMONTAŽI SEKCIJA..... 70

4.3. FOTOGRAMETRIJA NA MEĐUSKLADIŠTU SEKCIJA..... 72
4.3.1. KONTROLA OBLIKA DIJELOVA SEKCIJE..... 75
4.3.2. KONTROLA MEĐUSOBNOG POLOŽAJA DIJELOVA SEKCIJE..... 76
4.3.3. USPOREDBA REZULTATA MJERENJA I CAD MODELA..... 77
4.4. FOTOGRAMETRIJA U MONTAŽI TRUPA..... 79
4.4.1. VIRTUALNO SPAJANJE MJERENJA SEKCIJE I MJERENJA TRUPA..... 80
4.4.2. VIRTUALNO SPAJANJE CAD MODELA SEKCIJE I MJERENJA TRUPA..... 82

5. MJERENJA FOTOGRAMETRIJSKIM SUSTAVOM U BRODOGRADNJI..... 83
5.1. KONTROLA DIMENZIJA I OBLIKA PREDMONTIRANE SEKCIJE..... 84
5.1.1. KONTROLA OBLIKA DIJELOVA SEKCIJE..... 89
5.1.2. KONTROLA POLOŽAJA DIJELOVA SEKCIJE..... 94
5.1.3. USPOREDBA DIMENZIJA I OBLIKA SEKCIJE S TEHNOLOŠKOM UPUTOM..... 98
5.1.4. USPOREDBA DIMENZIJA I OBLIKA SEKCIJE SA CAD MODELOM..... 100
5.2. KONTROLA DIMENZIJA I OBLIKA SEKCIJE PRI MONTAŽI..... 104
5.2.1. MJERENJE SEKCIJE..... 106
5.2.2. MJERENJE SVJETLOG OTVORA NA TRUPU BRODA..... 109
5.2.3. ODSTUPANJA SEKCIJSKOG SPOJA OD SVJETLOG OTVORA..... 112
5.2.4. USPOREDBA PREDLOŽENIH I IZVEDENIH KOREKCIJA..... 123
5.2.5. DODATNI ZADACI KONTROLE SEKCIJE I SVJETLOG OTVORA..... 124
5.2.6. PREKLAPANJE CAD MODELA SEKCIJE I SVJETLOG OTVORA..... 126
5.2.7. USPOREDBA PREDLOŽENIH KOREKCIJA RUBOVA SEKCIJE I CAD MODELA..... 134

6. PRIKLADNOST FOTOGRAMETRIJSKE METODE ZA BRODOGRADNJU..... 142
6.1. POTREBE I MOGUĆNOSTI..... 142
6.2. RAZVOJ..... 144
6.3. UVJETI PRIMJENE..... 145
6.3.1. MJERNO MJESTO..... 145
6.3.2. MJERITELJSKI TIM..... 146
6.3.3. FOTOGRAMETRIJSKI SUSTAV..... 147
6.3.4. ORGANIZACIJSKO-TEHNOLOŠKI UVJETI PRIMJENE..... 154

7. ZAKLJUČAK..... 157

LITERATURA..... 160
KRATKI ŽIVOTOPIS..... 162
SHORT BIOGRAPHY..... 163

PREDGOVOR

Brod je djelo ljudskog uma i ruku koje nikoga ne ostavlja ravnodušnim. Svi, pa čak i njegovi začetnici, stvaratelji i graditelji ostaju iznenađeni pred simbiozom njegove ljepote, snage i veličine. Naša je planeta pokrivena u više od 2/3 svoje površine morima, pa je brod neophodan u razvoju civilizacije. Na brodogradilištima je da ga tehnički osmisle, kvalitetno i racionalno izrade i ponude korisnicima.

Kroz povijest brodogradnje bilo je vremena kada se gradilo skupo i loše, zatim se gradilo skupo i dobro, a današnje vrijeme nalaže graditi jeftino i dobro. Ovaj zahtjev postavlja pred brodograditelje zadatak iznalaženja novih tehnologija i interdisciplinarni pristup problemima koji će omogućiti smanjenje troškova i povećanje kvalitete. Ispunjenje ovog cilja bila je glavna misao vodilja kod odabira teme disertacije koja bi morala predstavljati kamenčić u mozaiku poboljšanja brodograđevne tehnologije.

Brodogradnja je dugo godina bila zasnovana na isprekidanom tehnološkom procesu i ako posljedica toga na pojedinačnoj gradnji ili relativno malim serijama vrlo vrijednih proizvoda. Unapređenjem brodograđevne tehnologije s vremenom su dijelovi procesa poprimali značajke ponavljajuće proizvodnje. Da bi to bilo moguće, između ostalog, nužno je postići veliku točnost izrade u svim dijelovima procesa, pa je potrebno ustanoviti brzu i jednostavnu metodu kontrole točnosti oblika i dimenzija.

Disertacijom razmatrana metoda fotogrametrije i njena primjena u brodogradnji jedan je od pokušaja primjene alata koji bi na učinkovit način utvrđivao razlike u obliku i dimenzijama izrađenog od zamišljenog. Obrađena problematika i izvedeni zaključci pokušaj su uvođenja fotogrametrije u kontrolu točnosti izrade proizvoda velikih dimenzija kakvi se susreću u brodogradnji, s ciljem brže, bolje i racionalnije proizvodnje.

SAŽETAK

Tema disertacije odnosi se na poboljšanje kontrole dimenzija i oblika u brodograđevnom proizvodnom procesu fotogrametrijskom metodom. Točnost izrade međuproizvoda ključ je veće proizvodnosti sastavljanja brodskog trupa. Fotogrametrijska metoda omogućuje brže mjerenje oblika i dimenzija, te rano otkrivanje netočnosti kada se ispravci mogu jednostavnije izvesti.

U prvom, uvodnom poglavlju disertacije, definiran je problem i svrha rada, dosadašnje spoznaje o problemima točnosti dimenzija i oblika i postavljena je hipoteza rada.

Drugo poglavlje prikazuje postojeće stanje metoda kontrole dimenzija i oblika u brodograđevnom procesu. Razmatrane su tradicionalne i optičke metode, te alati i uređaji. Primjerima su ilustrirani postupci kontrole u predmontaži kao i postupci mjerenja koji se obavljaju prije porinuća. Prikazan je i standard dopuštenih odstupanja koji propisuju klasifikacijske ustanove.

Treće je poglavlje posvećeno fotogrametrijskoj metodi. Prikazana je teorijska osnova metode, te odgovarajući fotogrametrijski sustav. Razmatrane su osnovne operacije i uvjeti koji moraju biti ispunjeni da bi se mjerenje kvalitetno obavilo, a rezultati mjerenja bili točni i pouzdani. Opisane su sve faze postupka mjerenja od izbora objekta, definiranja zadataka mjerenja do analize i prikazivanja mjernih rezultata. Izložen je i trend razvoja fotogrametrijskog sustava koji omogućuje brže i efikasnije mjerenje.

Četvrto poglavlje odnosi se na mogućnosti primjene fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika u svim fazama brodograđevnog proizvodnog procesa, odnosno na kontrolu oblika dijelova, njihovog međusobnog položaja te usporedbu rezultata mjerenja sa CAD modelom u fazama obrade elemenata, predmontaže i montaže trupa na dilju.

U petom poglavlju prikazane su specifičnosti fotogrametrijske metode u brodograđevnoj primjeni pomoću mjerenja u fazama predmontaže i montaže sekcija brodske strukture.

U fazi predmontaže sekcija razmatrana je kontrola oblika i međusobnog položaja dijelova sekcije, kontrola mjera zadanih tehnološkom uputom, te kontrola oblika i dimenzija sekcije usporedbom sa CAD modelom.

U fazi montaže sekcija prikazane su analize odstupanja sekcijskih spojeva metodom preklapanja mjerenja sekcije i mjerenja pozicije na brodu temeljem čega se predlažu korekcije spojnog ruba. Vrijednosti predloženih i izvedenih korekcija uspoređuju se da bi se ocijenila točnost metode i pouzdanost rezultata mjerenja. Isto tako se preklapa CAD model sekcije i rezultati mjerenja njene buduće pozicije na brodu. Temeljem ovih rezultata ocijenjuje se točnost sekcijskog spoja.

Uspoređuju se i predložene korekcije ovih analiza da bi se ocijenila točnost dimenzija i oblika sekcija te metode preklapanja rezultata mjerenja u programskom paketu.

U šestom poglavlju razmatra se prikladnost fotogrametrijske metode u brodogradnji. U razmatranje su uključene potrebe i mogućnosti, razvoj mjerne metode te uvjeti primjene.

Zaključno su istaknute prednosti primjene fotogrametrijske metode u brodograđevnom proizvodnom procesu.

KLJUČNE RIJEČI

brodograđevni proizvodni proces, kontrola dimenzija i oblika, fotogrametrija, fotogrametrijski sustav

SUMMARY

Topic of this dissertation is improvement of dimensional and shape control in shipbuilding production process by using photogrammetric method. Accuracy of building units is the key of larger productivity of the ship hull assembly. Photogrammetric method enables fast measurement of dimensions and shape and early detection of possible inaccuracies in a stage when all corrections of structures can be done simply.

First chapter, introduction, defines the following: problem, aim of the topic and describes up-to-date cognitions about problems of dimension and shape accuracy in the shipbuilding process. Hypothesis is set at the end of chapter.

Second chapter elaborates actual activities of dimensional and shape control in the shipbuilding process. Both traditional and optical methods and devices are examined. The methods of control are illustrated by examples at subassembly and assembly stage. The standard of allowable tolerances, set by classification societies, is presented.

Third chapter focuses on the photogrammetric method. Theoretical basic of method and photogrammetric system are presented. Basic activities and demands for correct measurement are also defined. Phases of measurement procedure are described, including selection of measuring object, defining measurement tasks, results analysis and presentation. Ways of development of the photogrammetric system, which would enable faster and more effective measurement, is presented.

Fourth chapter elaborates possibilities of implementation of the photogrammetric method in dimensional and shape control in the shipbuilding production process. It contains implementation possibilities for shape control of elements, control of elements positions and comparison of measurement results with CAD model in stages of elements work, subassembly and assembly in the building berth.

In the fifth chapter, peculiarities of photogrammetric method in the shipbuilding are presented, with measurements in the ship structures subassembly and assembly stages.

For section in subassembly stage, section elements shape and positions control, control of measures determined with technological documentation and control of shape and dimensions of sections in comparison with CAD model are examined.

For section in assembly stage, analyses of section joint aberrance are presented. Measurement results of the section and position on the ship are overlapped. Corrections of the section edge based on measurement results are suggested. Values of suggested and real corrections are compared and the accuracy of method and measurement results reliability is reviewed.

CAD model of the section and measurement results of ship are also overlapped. Accuracy of the section joint on the ship based on measurement results is reviewed.

Comparison of suggested corrections is performed after analyses. Results are used to review accuracy of section dimensions and shape. The results are also used to review the method of measurement results overlapping in program package.

In the sixth chapter, suitableness of the photogrammetric method in the shipbuilding is examined. The examination involves needs, possibilities, development and conditions of use.

Conclusions contain advantages of using the photogrammetric method in the shipbuilding process.

KEY WORDS

shipbuilding production process, dimensional and shape control, photogrammetry, photogrammetric system

POPIS SLIKA

	Naziv slike	str.
Slika 1	Kontrola oblika lima šablonom	8
Slika 2	Kontrola oblika profila inverznom krivuljom	8
Slika 3	Osnovni dijelovi i glavni pravci mjernog uređaja	10
Slika 4	Mjerni dio uređaja i skala za očitanje optičkog teodolita	11
Slika 5	Mjerni dio uređaja i ekran elektroničkog teodolita	11
Slika 6	Nivelir	12
Slika 7	Elektronski tahimetar	13
Slika 8	Mjerenje volumenskih objekata tahimetrom	15
Slika 9	Aktivnosti kontrole u predmontaži	16
Slika 10	Kontrola okomitosti elemenata strukture	19
Slika 11	Kontrola ravnine opločenja sekcije	20
Slika 12	Kontrola ravnine šavova i okomitost ravnine stikova	20
Slika 13	Elementi kolijevke	22
Slika 14	Kontrola prostornih dijagonala traserskim koncem	23
Slika 15	Kontrola ravnine stika	23
Slika 16	Kontrola ravnine stika	23
Slika 17	Kontrola ravnine šava	25
Slika 18	Kontrola ravnine stika	25
Slika 19	Kontrola poluširine broda	26
Slika 20	Kontrola okomitosti sekcije uzdužne pregrade	27
Slika 21	Stavke kontrole dimenzija i oblika na navozu	28
Slika 22	Postavljanje sekcije	29
Slika 23	Postavljanje sekcije	29
Slika 24	Hidraulička pumpa za pozicioniranje sekcije	29
Slika 25	Mehanički pritezač za pozicioniranje sekcije	29
Slika 26	Kontrola centriranja sekcije	30
Slika 27	Kontrola poprečnog nagiba sekcije	31
Slika 28	Kontrola okomitosti poprečnog presjeka broda	32
Slika 29	Kontrola uzdužnog nagiba sekcije	33
Slika 30	Postavljanje teodolita	34
Slika 31	Postavljanje mjerne točke u simetralu sekcije	34
Slika 32	Skice kontrole oblika trupa broda	35
Slika 33	Mjerenje progibne linije dna broda	35
Slika 34	Kontrola visine broda	36
Slika 35	Veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orjentirane kamere	42
Slika 36	Princip triangulacije	44
Slika 37	Fotogrametrijski sustav	45
Slika 38	Kodirana mjerna točka	47
Slika 39	Nekodirana mjerna točka	47
Slika 40	Čvrste mjerne točke (ravna, pod kutem 45°, okomita, sferična)	48
Slika 41	Izgled ekrana programskog paketa	52
Slika 42	Postavljanje kodiranih i nekodiranih mjernih točaka na mjerni objekt	54
Slika 43	Postupak snimanja ravnih objekata	56
Slika 44	Postupak snimanja manjih volumenskih objekata	57
Slika 45	Postupak snimanja volumenskih objekata s preklapanjem	58
Slika 46	Postavljanje dodatnih mjernih točaka	59

Slika 47	Oblak mjernih točaka sekcije palube	60
Slika 48	Izdvojene mjerne točke i konstrukcija elementa mjerenja	60
Slika 49	Mjerenje udaljenosti točke od linije	61
Slika 50	Primjer grafičkog prikazivanja mjernih rezultata u programskom paketu	62
Slika 51	Izgled tablice mjernih rezultata za usporedbu teorijskih i izmjerenih vrijednosti	63
Slika 52	Izgled tablice mjernih rezultata za mjerenje udaljenosti	63
Slika 53	Uređaj za bežični prijenos snimljenih fotografija	64
Slika 54	Mjerni objekt i adapter za definiranje ruba	65
Slika 55	Grafički prikaz definiranja ravnina adaptera u programskom paketu	66
Slika 56	Kontrola dimenzija i oblika fotogrametrijskim sustavom u fazama gradnje trupa	67
Slika 57	Shema interakcije službi tehnologije, dimenzijske kontrole i radionica	68
Slika 58	Preklapanje rezultata mjerenja vanjske oplate s CAD modelom	69
Slika 59	Pregled kontrole dimenzija i oblika u tokovima privarivanja i zavarivanja sekcije	71
Slika 60	Postavljanje mjernih točaka i samoljepljive trake na oplatu sekcije	72
Slika 61	Pomična skela	73
Slika 62	Teleskopski stativ za snimanje	73
Slika 63	Postupak prepoznavanja samoljepljive trake u programskom paketu	74
Slika 64	Pregled analize rezultata mjerenja gotovih sekcija	74
Slika 65	Grafički prikaz rezultata kontrole ravnoće palube	75
Slika 66	Pregled kontrole međusobnog položaja dijelova sekcije	76
Slika 67	Dijagram toka kontrole dimenzija i oblika gotove sekcije	77
Slika 68	Preklapanje rezultata mjerenja i CAD modela sekcije	78
Slika 69	Postavljanje mjernih točaka na sekciji	79
Slika 70	Postavljanje mjernih točaka na navozu	79
Slika 71	Pregled kontrole dimenzija i oblika na dilju	80
Slika 72	Postavljanje ruba pregrade u ravninu platforme	81
Slika 73	Postavljanje ruba pregrade u ravninu platforme u programskom paketu	81
Slika 74	Dijagram toka aktivnosti mjerenja fotogrametrijskim sustavom	83
Slika 75	Aksonometrijski prikaz sekcije	84
Slika 76	Sekcija na okvirnim potkladama	85
Slika 77	Postavljanje kodiranih mjernih točaka i samoljepljive trake na vanjsku oplatu sekcije	86
Slika 78	Snimanje sekcije s pomične skele	87
Slika 79	Prijelaz vanjske oplate i druge platforme sekcije	88
Slika 80	Oblak mjernih točaka dijelova sekcije i rub vanjske oplate	89
Slika 81	Kontrola ravnoće uzdužne pregrade sekcije	90
Slika 82	Kontrola ravnoće poprečne pregrade sekcije	91
Slika 83	Kontrola ravnoće druge platforme sekcije	92
Slika 84	Uzdužni presjek platforme na grednim potkladama	92
Slika 85	Kontrola oblika vanjske oplate sekcije	94
Slika 86	Kontrola okomitosti dijelova sekcije	95
Slika 87	Kontrola udaljenosti dijelova sekcije	96
Slika 88	Kontrola položaja okvirnih rebara i uzdužne pregrade	98
Slika 89	Mjerne skice dimenzijske kontrole sekcije	99
Slika 90	Mjerenje udaljenosti zadanih mjernim skicama dimenzijske kontrole	100

Slika 91	Preklapanje rezultata mjerenja i CAD modela sekcije	101
Slika 92	Odstupanja mjernih točaka uzdužne pregrade od CAD modela sekcije	102
Slika 93	Odstupanja mjernih točaka druge platforme od CAD modela sekcije	103
Slika 94	Odstupanja mjernih točaka poprečne pregrade od CAD modela sekcije	104
Slika 95	Dijagram toka analize mjernih rezultata pri montaži sekcija	105
Slika 96	Mjerenje odstupanja mjernih točaka sekcije od konture svjetlog otvora	106
Slika 97	Aksonometrijski prikaz sekcije	107
Slika 98	Mjerne točke na poprečnoj pregradi na rebru 10	107
Slika 99	Mjerne točke na vanjskoj oplati na boku broda	107
Slika 100	Kontura sekcijskog spoja	108
Slika 101	Položaj fotoaparata i mjernih točaka kod snimanja sekcije	109
Slika 102	Položaj sekcije na brodu - uzdužni presjek	110
Slika 103	Položaj sekcije na brodu - pogled na glavnu palubu	110
Slika 104	Mjerne točke na sekcijama svjetlog otvora	110
Slika 105	Mjerne točke na sekcijama svjetlog otvora	110
Slika 106	Položaj fotoaparata i mjernih točaka kod snimanja na brodu	111
Slika 107	Dijagram toka aktivnosti kod preklapanja rezultata mjerenja	112
Slika 108	Elementi preklopa rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora	114
Slika 109	Preklapanje rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora	114
Slika 110	Kontrola odstupanja elemenata preklopa za prvi kriterij preklapanja	116
Slika 111	Kontrola odstupanja elemenata preklopa za drugi kriterij preklapanja	117
Slika 112	Kontura svjetlog otvora	118
Slika 113	Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku krmenog zrcala	119
Slika 114	Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku palube	120
Slika 115	Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku vanjske oplate	121
Slika 116	Odstupanja mjernih točaka sekcije na šavu vanjske oplate	122
Slika 117	Kontrola visine palube svjetlog otvora	125
Slika 118	Paluba sekcije i svjetlog otvora na poziciji mjerne točke 10	126
Slika 119	Preklapanje CAD modela sekcije i svjetlog otvora	128
Slika 120	Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu	129
Slika 121	Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi	130
Slika 122	Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate	131
Slika 123	Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate	132
Slika 124	Odstupanja krmenog zrcala sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora	135
Slika 125	Odstupanja palube sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora	137
Slika 126	Odstupanja stika vanjske oplate sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora	138
Slika 127	Odstupanja šava vanjske oplate sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora	139
Slika 128	Dijelovi fotogrametrijskog sustava	148
Slika 129	Karakteristike programskog paketa	151
Slika 130	Razdioba radnih sati dodatnih radova	154

POPIS TABLICA

	Naziv tablice	str.
Tablica 1	Vrijednosti dopuštenih odstupanja pri predmontaži sekcija	39
Tablica 2	Dosjed elemenata u fazi montaže	40
Tablica 3	Status mjernih točaka	50
Tablica 4	Glavne izmjere broda	83
Tablica 5	Geometrijske karakteristike sekcije	85
Tablica 6	Rezultati kontrole ravnoće uzdužne pregrade sekcije	90
Tablica 7	Rezultati kontrole ravnoće poprečne pregrade sekcije	91
Tablica 8	Rezultati kontrole ravnoće druge platforme sekcije	93
Tablica 9	Rezultati kontrole oblika vanjske oplate sekcije	93
Tablica 10	Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti kontrole okomitosti dijelova sekcije	95
Tablica 11	Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti kontrole udaljenosti dijelova sekcije	96
Tablica 12	Izmjerena odstupanja mjernih točaka od kontrolne ravnine	98
Tablica 13	Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti u kontroli udaljenosti	100
Tablica 14	Rezultati kontrole odstupanja uzdužne pregrade sekcije od CAD modela	102
Tablica 15	Rezultati kontrole odstupanja druge platforme sekcije od CAD modela	103
Tablica 16	Rezultati kontrole odstupanja poprečne pregrade sekcije od CAD modela	104
Tablica 17	Rezultati kontrole preklapanja ruba poprečne pregrade i platforme	115
Tablica 18	Rezultati kontrole preklapanja mjernih točaka poprečne pregrade sekcije i referentne ravnine	117
Tablica 19	Odstupanja mjernih točaka sekcije na krmenom zrcalu	118
Tablica 20	Odstupanja mjernih točaka sekcije na palubi	120
Tablica 21	Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku vanjske oplate	121
Tablica 22	Odstupanja mjernih točaka sekcije na šavu vanjske oplate	121
Tablica 23	Odstupanja mjernih točaka na sekcijskom spoju	123
Tablica 24	Usporedba vrijednosti predloženih i izvedenih korekcija sekcijskog spoja	124
Tablica 25	Usporedba vrijednosti izmjerenih i teorijskih visina palube svjetlog otvora	125
Tablica 26	Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu	129
Tablica 27	Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi	131
Tablica 28	Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije stiku vanjske oplate	132
Tablica 29	Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate	133
Tablica 30	Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije	134
Tablica 31	Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na krmenom zrcalu	136
Tablica 32	Vrijednosti rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na palubi	137
Tablica 33	Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na stiku vanjske oplate	139
Tablica 34	Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na šavu vanjske oplate	140

POPIS POJMOVA

Element-	Osnovni dio strukture trupa broda, pojedinačni obrađeni lim ili profil.
Podsklop-	Dio strukture trupa broda sastavljen od dva ili više obrađenih elemenata.
Sklop-	Dio strukture trupa broda sastavljen od podsklopova i obrađenih elemenata trupa.
Ukrijepljeni panel-	Dio strukture trupa broda sastavljen od više limova opločenja ukrijepljenih profilima.
Sekcija-	Dio trupa broda sastavljen od obrađenih elemenata, podsklopova, sklopova i ukrijepljenih panela.
Blok-	Dio trupa broda sastavljen od dvije ili više sekcija.
Dilj-	Mjesto gradnje trupa broda koje može biti uzdužni navoz, suhi dok ili ravna površina.
Obrada elemenata-	Dio brodograđevnog proizvodnog procesa u kojem se elementi strukture režu i oblikuju.
Predmontaža–	Dio brodograđevnog proizvodnog procesa u kojem se sastavljaju podsklopovi, sklopovi, ukrijepljeni paneli, sekcije i blokovi.
Montaža-	Dio brodograđevnog proizvodnog procesa u kojem se sastavlja trup broda iz sekcija i blokova.
Montažni spoj sekcija-	Spoj dvaju ili više sekcija koji se zavaruje prilikom montaže trupa broda na dilju.
Stik-	Zavareni spoj u vertikalnoj ravnini broda.
Šav-	Zavareni spoj u vertikalnoj ravnini
Svjetli otvor-	Dio trupa broda na dilju na koji se montira nova sekcija.
CAD model sekcije-	Model strukture sekcije kreiran računalnim programom.
Fotogrametrijska metoda-	Optička mjerna metoda, gdje se prostorne koordinate točaka promatranog predmeta određuju pomoću snimaka napravljenih fotoaparatom.
Fotogrametrijski sustav-	Oprema za mjerenje fotogrametrijskom metodom koja se sastoji od digitalnog fotoaparata, prijenosnog računala, referentnih mjernih motki i mjernih točaka.
Mjerna motka-	Štap definirane i konstantne duljine.
Mjerna točka-	Markacija koja se postavlja na mjerni objekt čiji se položaj mjeri fotogrametrijskim sustavom.
Mjerni objekt-	Objekt mjeren fotogrametrijskim sustavom.
Programski paket-	Računalni program u kojem se obavlja obrada fotografija i proračun rezultata mjerenja.
Kodirana mjerna točka-	Posebno definirana markacija koja se u programskom paketu prepoznaje prema definiranom bar kodu.
Veličina mjerne točke-	Promjer kružnice na sredini markacije.
Oblak mjernih točaka-	Rezultat mjerenja fotogrametrijskim sustavom tj. položaj mjernih točaka u prostoru koji je nastao obradom fotografija i proračunom u programskom paketu.
Elementi mjerenja-	Linije ili plohe konstruirane kroz izabrane točke oblaka mjernih točaka.
Elementi preklapanja-	Elementi mjerenja pomoću kojih se obavlja virtualno preklapanje rezultata mjerenja dobivenih fotogrametrijskim sustavom.

1. Uvod

1.1. Definicija problema i ciljevi

Brodograđevni je proizvodni proces kompleksan i dugotrajan. Kroz proces prolazi velika količina materijala i informacija, te je praćen značajnim utroškom sredstava rada, energije i novca. Poznato je da cijenu brodova u svijetu određuje tržište, a da se brodogradilišta na tržištu mogu održati samo ako poštuju uvjete konkurentnosti, a to su niska cijena, dobra kvaliteta i kratki rokovi isporuke proizvoda, pa je sniženje troškova proizvodnje te skraćenje trajanja proizvodnih ciklusa od presudnog značaja.

Troškovi gradnje broda dijele se na troškove materijala, troškove prerade, te na posebne i opće troškove. Brodogradilište najviše može utjecati na troškove prerade, mora ih svesti na najmanju moguću mjeru u svakoj fazi proizvodnog procesa. To se može ostvariti boljom organizacijom pripremnog procesa, skraćenjem trajanja proizvodnog ciklusa, većom proizvodnošću i ako je moguće gradnjom brodova u seriji.

Uvođenjem informacijske tehnologije u brodograđevnu industriju značajno se utjecalo na pripremni proces. Skratilo se vrijeme izrade dokumentacije, te se poboljšala komunikacija između različitih odjela brodogradilišta. Prije uvođenja informatizacije i CAD sustava u brodograđevni proces dokumentacija i korekcije nacrta radile su se ručno, što je zahtijevalo utrošak velikog broja radnih sati. Često bi, radi sporosti izrade korekcija, dokumentacija kasnila u radionice brodogradilišta, pa bi se problemi rješavali bez nacrta iskustvom inženjera i poslovođa u pogonu. Informacijska tehnologija i njene mogućnosti podigle su pripremu na veću i značajniju razinu. Na taj se način može prevladati problem nedostatka kvalificiranih radnika, koji postaje sve očitiji u brodograđevnoj industriji. Ovaj problem nije karakterističan samo za domaću brodograđevnu industriju već se pojavljuje svugdje u svijetu.

Smanjenje broja radnika u brodogradilištu uzrokovano je i povećanjem mehanizacije i automatizacije, što također utječe na skraćenje nekih faza proizvodnog procesa, u prvom redu postupaka predobrade, obrade i sastavljanja ukrijepljenih panela. Upravljanje tim fazama procesa je jednostavnije, svodi se na pravilno rukovanje postrojenjem i redovito održavanje. Kasnije faze brodograđevnog procesa i dalje će biti radno intenzivnije. Njihova djelotvornost više će ovisiti o kvaliteti i vještini ljudi, a manje o automatizaciji, jer radni uvjeti, masa i dimenzije proizvoda ne omogućuju veći stupanj automatizacije.

Na skraćenje proizvodnog ciklusa može se utjecati i većom točnošću izrade građevnih jedinica trupa broda, te primjerenim metodama kontrole oblika i dimenzija. U kontroli dimenzija i oblika uočava se razlika između automatiziranih faza proizvodnog procesa u odnosu na radno intenzivne faze. Strojevi i uređaji u fazi predobrade, obrade i sastavljanja ukrijepljenih panela su numerički upravljani, pa se zadovoljavajuća točnost izrade može postići i kontrolirati samim strojevima, a i geometrijske karakteristike elemenata su jednostavne što omogućuje jednostavnu kontrolu. Sve kasnije faze sastavljanja zavise o točnosti izrade elemenata u ranijim fazama, ali i od zavarivanja, koje je zbog znatnog unosa topline mogući uzrok netočnosti. Postojeća kontrola točnosti izrade traži na strukturi predmontažne i montažne viškove koje je potrebno odrezati, što iziskuje dodatne radove i značajne troškove.

Analizom trošenja radnih sati i razdiobe vremena za različite aktivnosti pri montaži blokova, tek 1/3 vremena troši se na zavarivanje sekcijskih spojeva, dok se ostalo vrijeme troši na reguliranje položaja sekcija, rezanje viškova, navarivanje, pripremu alata, uređaja, transport, čišćenje te na dodatne radove kao što su navarivanje ili popravak zavara.

Cilj kontrole dimenzija i oblika u brodogradnji je točnost sekcija i blokova što će pojednostavniti montažu trupa na dilju. Radi toga je od velike važnosti prikladnim mjernim metodama, još prije sastavljanja na dilju ustanoviti postojeća odstupanja oblika i dimenzija sekcije ili bloka od dijela trupa broda na koji ih treba ugraditi. Na taj bi se način mogle provesti potrebne korekcije u fazi predmontaže kada je to jednostavnije, jeftinije i brže. Time bi se u fazi montaže trupa povećala kvaliteta, smanjila količina dodatnih radova, snizili troškovi proizvodnje i skratio proizvodni ciklus.

Svrha ovog rada je dokazivanje pouzdanosti i primjenjivosti fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika u fazama predmontaže i montaže trupa broda, definiranje postupka mjerenja i uvjeta za efikasnu primjenu te analize i prikaza rezultata.

1.2. Dosadašnje spoznaje

Zadatak kontrole oblika i dimenzija je otkrivanje netočnosti građevnih jedinica brodskog trupa u svim fazama procesa, te njihovo otklanjanje. Kontrola točnosti uključuje stalno praćenje proizvodnog procesa od obrade elemenata do montaže trupa broda.

Istraživanja u ovom području granaju se u dva smjera:

- istraživanja uzroka netočnosti,
- istraživanja mjernih metoda kojima se brzo i djelotvorno mogu mjeriti odstupanja i deformacije.

Odstupanja oblika i dimenzija od teoretskih vrijednosti u brodogradnji uzrokovana su unosom topline u strukturu postupcima rezanja, zavarivanja i ravnanja. Istražuju se mehanizmi stvaranja deformacija, utvrđuju njihove zakonitosti da bi ih se moglo lakše kontrolirati ili predvidjeti i da bi se moglo djelovati protumjerama. Odnos unosa topline i deformacija istražuje se eksperimentalnim putem, ali i metodom konačnih elemenata pomoću koje se numerički modelira problem, gdje su bitni parametri maksimalna vrijednost temperature, distribucija topline, mehanička svojstva materijala, te unutrašnja i vanjska ograničenja strukture. Rezultati eksperimenata dobro se podudaraju s rezultatima metode konačnih elemenata kojim se deformacije mogu dobro predvidjeti. Na taj se način može utjecati na oblik sekcije ili bloka, na određivanje postupaka i redoslijeda sastavljanja te na eventualno postavljanje dodatnih ukrućenja da se izbjegnu deformacije. Utjecaj deformacija može se smanjiti i standardizacijom postupaka zavarivanja te korištenjem automatizacije koja osigurava nepromjenjive parametre zavarivanja.

Pojava netočnosti u brodograđevnom procesu može biti posljedica:

1. geometrijskih karakteristika ugradbenog materijala,
2. postupka rezanja ili ravnanja elemenata strukture,
3. postavljanja, pozicioniranja i privarivanja elemenata te
4. zavarivanja strukture

Ad 1) Kod ugradbenog materijala netočnost se javlja u dimenzijama lima. Posebno je kritična debljina materijala koja obično nije konstantna po površini lima i ovisi o širini

lima i nominalnoj debljini. Definiraju se tolerance debljine prema širini lima, a osim debljine kontrolira se neravnost lima koja ne smije prelaziti ±2mm.

Ad 2) Netočnosti koje nastaju rezanjem izazvane su postupkom toplinskog rezanja. Uzroci ovih netočnosti mogu biti mehanički koji su posljedica montaže stroja za rezanje ili njegovog vibriranja. Netočnosti nastaju i uslijed nepravilnog ili širokog reza koji može biti uzrokovan istrošenim sapnicama, promjenama tlaka i toka plinova rezanja itd. Unos topline u strukturu je najvažniji uzročnik pogrešaka. U području unosa topline dolazi do zagrijavanja materijala i pojave plastičnih deformacija, a nakon toga do hlađenja s posljedicom skupljanja materijala.

Ad 3) Uzroci netočnosti kod postavljanja, pozicioniranja i privarivanja elemenata ovise o točnosti označavanja te iskustvu i vještini radnika.

Ad 4) Deformacije i netočnosti uslijed zavarivanja strukture mogu biti linearne i kutne. Linearne deformacije nastaju u ravnini zavarivanja, a odnose se na skupljanje materijala uslijed hlađenja nakon zavarivanja. Kutne deformacije su deformacije strukture koje nastaju okomito na ravninu zavarivanja. Uzrok ovih deformacija ovisi o fizikalnim karakteristikama materijala, postupku zavarivanja, te vještini i iskustvu zavarivača. Svaka od ovih stavki sadrži niz utjecajnih parametara. Parametri materijala su koeficijent linearnog širenja, Youngov modul, rastezna čvrstoća materijala i temperatura taljenja, a parametri postupka zavarivanja su vršna temperatura, brzina, promjene vrijednosti struje i napona, duljina neprekidnog zavara i redoslijed zavarivanja.

Razvoj uređaja i optičkih metoda kontrole dimenzija i oblika počeo je početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća. Do tada se sve svodilo na kontrolu ravninskih mjera što nije zadovoljavalo potrebe u fazama predmontaže i montaže, gdje su mjere prostorne. Zahtijevao se instrument koji može s točnošću od nekoliko milimetara izmjeriti volumenski objekt. U početku su se koristila dva uređaja, teodlit za mjerenje kuteva i daljinomjer za mjerenje udaljenosti. Mjerenje se moglo ostvariti uz nužan uvjet da su uređaji bili stalno na istoj udaljenosti što se nije moglo postići, pa su rezultati mjerenja bili upitni. Ubrzo se odustalo od ovakvog načina mjerenja, a razvoj se koncentrirao na konstrukciju jednog uređaja za mjerenje. Krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina razvile su se mjerne stanice tipa NET2 i MONMOS koje se koriste u svjetskim i

domaćim brodogradilištima. Postojeće mjerne metode imaju nedostatke koje se mogu prevladati novim postupcima mjerenja, a tu spadaju fotogrametrija i trodimenzionalno skeniranje. Ove metode su još u fazi razvoja, pogotovo za mjerenje objekata velikih dimenzija kakvi se nalaze u brodogradnji.

1.3. Hipoteza

Fotogrametrija u brodogradnji omogućuje pouzdanu i brzu metodu kontrole dimenzija i oblika te uspoređivanje geometrije montiranog dijela trupa broda na navozu s geometrijom sekcija na predmontaži, pripremljenih za ugradnju u trup. Primjena fotogrametrije u postupku kontrole dimenzija omogućuje djelotvornu kontrolu kvalitete proizvoda, skraćenje vremena sastavljanja trupa broda i smanjenje proizvodnih troškova.

Postojeća fotogrametrijska metoda može se iskoristiti nakon njene modifikacije za potrebe brodograđevnog procesa, gdje dominiraju međuproizvodi velikih masa i dimenzija.

2. Kontrola dimenzija i oblika u brodogradnji

2.1. Uvod

Kontrola građevnih jedinica brodskog trupa provodi se u svim fazama brodograđevnog procesa mjerenjem dimenzija i kontrolom oblika.

Uvođenjem automatizacije pojedini dijelovi proizvodnog procesa prelaze iz tipično intermitentnog – isprekidanog tehnološkog procesa u ponavljajući proces. To se prvenstveno odnosi na obradu elemenata i rane faze sastavljanja, gdje se koriste numerički upravljani strojevi kao što su strojevi za rezanje ili panel linije za sastavljanje ukrijepljenih panela. U ovim fazama prevladava automatizacija, a kontrola dimenzija i oblika obavlja se na samim strojevima na kojima se standardiziraju postupci rada i održavaju nepromjenjivi radni uvjeti. Karakteristika ovih faza su i jednostavne geometrijske karakteristike međuproizvoda. U kontroli se radi toga koriste jednostavne tradicionalne metode i pomagala za mjerenje duljina i kuteva.

U kasnijim fazama sastavljanja i u montaži trupa na navozu izraženiji je ljudski rad u odnosu na prethodne automatizirane postupke. Brodski trup se sastoji od manjih građevnih jedinica, a to mogu biti sekcije, blokovi ili moduli. Njihove dimenzije i mase proizlaze iz tehnološkog koncepta brodogradilišta pri čemu je najbitnija nosivost dizalica. Domaća brodogradilišta trup grade najčešće iz sekcija ili okrupnjenih grupa sekcija mase do 300 t. Ovaj način rada traži veći broj građevnih jedinica, a s time i veći broj međusekcijskih spojeva na navozu i duže trajanje sastavljanja trupa. Veće dimenzije i mase građevnih jedinica povećavaju zahtjeve za kontrolu dimenzija i oblika čemu u većoj mjeri ne mogu udovoljiti tradicionalne metode mjerenja. Razvojem optike i elektronike pojavljuju se u području mjerenja suvremene optičke metode i mjerni instrumenti, pa se povećavaju mogućnosti mjerenja, pohranjivanja, obrade i analize mjerenja. U optičke mjerne instrumente spadaju teodolit, nivelir i tahimetar.

Zadaci tradicionalnih i suvremenih postupaka kontrole su mjerenje duljina, kuteva i položaja elemenata, te kontrola oblika.

2.2. Tradicionalne metode kontrole

U tradicionalne alate za mjerenje duljina, kuteva i položaja elemenata spadaju mjerna vrpca, kutomjer, visak, vodena vaga i traserska letva. Kontrola oblika zakrivljenih limova

obavlja se najčešće šablonama, a zakrivljenost profila kontrolira se metodom inverzne krivulje.

Karakteristike uređaja tradicionalnih metoda kontrole dimenzija i oblika su lako rukovanje, jednostavna izvedba, primjena i održavanje.

2.2.1. Alati mjerenja duljina

Alati za mjerenje duljina u brodogradnji su mjerna vrpca i traserska letva. Mjerne vrpce su čelične ili plastične izvedbe, a raspon mjerenja im je od 3 do 50 m. Primjena mjerne vrpce je ograničena na mjerenja udaljenosti u ravnini. Pri tome se vrpca mora postaviti na čvrstu podlogu radi točnosti rezultata. Ako to nije slučaj može doći do progiba zbog nedovoljnog zatezanja što neće dati točan rezultat. Mjerenja na otvorenom su pod utjecajem atmosferskih prilika.

Traserska letva koristi se za mjerenje udaljenosti elemenata strukture na mjestima gdje je neprikladno mjeriti mjernom vrpcom. Traserska letva se sastoji od dva pravokutna drvena štapa pričvršćena metalnim prstenom kroz koji se štapovi pomiču, te se tako regulira duljina. Na krajevima se postavljaju metalni šiljci radi točnosti mjerenja. Upotreba je ograničena duljinom, mjerno područje je od 1 do 3m, a dulje traserske letve su nezgodne za nošenje i mjerenje.

2.2.2. Alati mjerenja kuteva

Alatima za mjerenje kuteva mjere se prikloni kutevi i okomitost elemenata strukture. Za mjerenje prikolonih kuteva koriste se kutomjeri, a okomitost se kontrolira najčešće viskom.

Kutomjeri su uglavnom čelični, a razlikuju se izvedbe s nepomičnim i pomičnim krakovima. Ograničenja u primjeni ovise o veličini kutomjera, te o točnosti izrade.

Visak je metalni uteg stožastog oblika privezan konopom različitih duljina ovisno o potrebi mjerenja. Prilikom mjerenja viskom na otvorenom greške mogu nastati radi utjecaja vjetra, a na mjerenje također utječu prepreke koje se nalaze na pravcu mjerenja.

2.2.3. Alati mjerenja položaja

Mjerenje položaja dijelova sekcije u brodograđevnom procesu uključuje mjerenje visina točaka na nepristupačnim i suženim područjima strukture, a obavlja se vodenom vagom. Princip mjerenja su spojene posude u kojima se očitava razlika visine tekućine.

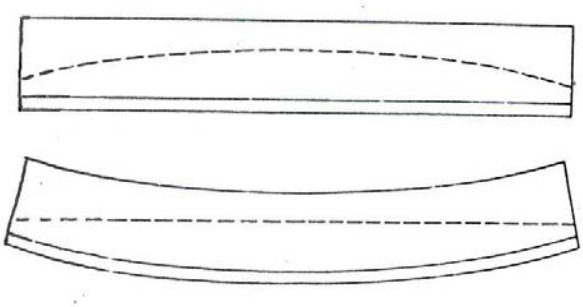
Vodena vaga sastoji se od gumene cijevi na čijim krajevima su pričvršćene staklene cijevi. Prije upotrebe cijevi se pune vodom približno do polovice staklene cijevi. Upotreba vodene vage ograničena je duljinom gumene cijevi.

2.2.4. Pomagala kontrole oblika

Kontrola oblika obavlja se na zakrivljenim dijelovima elemenata limova i profila.



Slika 1: Kontrola oblika lima šablonom



Slika 2: Kontrola oblika profila inverznom krivuljom

Limovi se savijaju na valjcima, a oblik se kontrolira najčešće drvenim šablonama, prikazanim slikom 1. Profili se savijaju na savijačicama, a oblike se kontrolira metodom inverzne krivulje. Postupak je prikazan slikom 2. Na ravni profil nacrta se oblik krivulje kakva se želi postići savijanjem, a nakon toga se profil savija dok se nacrtana linija ne izravna. Kontrola se svodi na provjeru pravocrtnosti linije.

2.3. Optičke metode kontrole

Razvojem optike i elektronike razvijaju se optički instrumenti i metode za mjerenje položaja točaka u prostoru. Danas se u brodogradnji u širokoj primjeni koriste teodolit, nivelir i tahimetar koji su zamjenili tradicionalne uređaje kontrole dimenzija i oblika pogotovo u fazi sastavljanja sekcija i montaže trupa gdje su geometrijske karakteristike građevnih jedinica velike, a tradicionalne metode i uređaji nisu efikasni.

Teodolit se koristi za mjerenje horizontalnih i vertikalnih kuteva, a u primjeni je zamijenio visak. Nivelir se koristi za mjerenja razlika visina, zamjena je za vodenu vagu, a tahimetar služi za mjerenje horizontalnih, vertikalnih kuteva i duljina, a ujedinjuje funkcije teodolita i daljinomjera. Daljinomjer je optički instrument za mjerenje duljine.

Konstrukcijski, optički uređaji za mjerenje sastoje se od dva osnovna dijela: mjernog uređaja i stativa. Mjerni dio se postavlja na stativ i fiksira, te se njime obavljaju mjerenja.

Točnost mjerenja i pouzdanost rezultata ovisi o ispravnosti mjernog uređaja, znanju i vještini mjeritelja te stabilnosti instrumenta i objekta mjerenja. Pri mjerenju zahtjeva se pravilno rukovanje instrumentom. Nepažnja može uzrokovati mehanička oštećenja uređaja ili blokiranje postupka mjerenja. Održavanje instrumenta obavlja proizvođač u svojim laboratorijima jednom godišnje gdje se radi rektifikacija instrumenta tj. ispitivanje i ispravljanje pogrešaka, te baždarenje uređaja za koji se izdaje certifikat o ispravnosti i točnosti mjerenja.

Karakteristika optičkih instrumenata je osjetljivost na vlagu, prašinu, temperaturne razlike i radne uvjete na mjestu mjerenja. Prije svakog mjerenja potrebno je pravilno izbabrati položaj instrumenta. Mjerenja unutar radionice mogu otežati nepredviđene vibracije uzrokovane padom elemenata ili učestalim prolaskom dizalica u blizini instrumenta te nepažnja radnika. Pri mjerenju na otvorenom instrumenti su izloženi atmosferskim prilikama, a najutjecajniji faktor je vlaga. Kod mjerenja na brodu instrument se postavlja na poziciju jakih nosača koji će smanjiti utjecaj pomaka podloge. U takvim uvjetima mjerenja, kada se sa sigurnošću ne znaju vanjski utjecaji na instrument, potrebno je stalno kontrolirati jednu mjernu točku koja se obično nalazi u ishodištu lokalnog koordinatnog sustava. Ako se uoče pomaci mjerne točke rezultati mjerenja nisu pouzdani.

Teodolit

Teodolit je optički instrument za mjerenje horizontalnih i vertikalnih kuteva kojima se određuje položaj mjerne točke na pravcu ili u ravnini.

Osnovni dijelovi teodolita su:

- **Stativ**

Stativ teodolita sastoji se od podnožja na koje se nastavljaju tri noge. Noge su promjenjive duljine, pa mjeritelj prema svojoj visini može regulirati položaj mjernog uređaja. Pomoću centralnog vijka na glavi mjerni dio teodolita pričvrsti se za stativ.

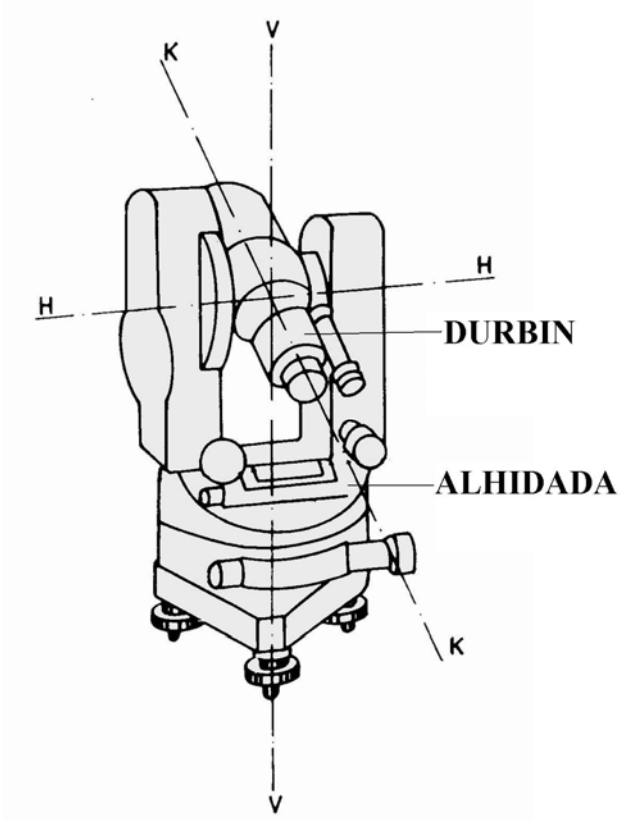
- **Alhidada**

Alhidada je gornji okretni dio mjernog uređaja koji se okreće oko vertikalne osi, a kut zakretanja alhidade određuje vrijednost horizontalnog kuta.

- **Durbin**

Durbin služi za viziranje mjerne točke. Zakreće se oko horizontalne osi, a kut zakretanja određuje vrijednost vertikalnog kuta. Osnovni dijelovi durbina su objektiv, okular, nitni križ za viziranje mjerne točke te uređaji za izoštravanje i uvećavanje slike.

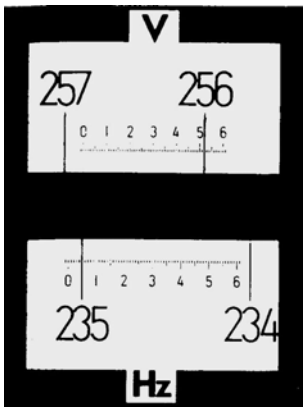
Alhidada, durbin, te osnovni pravci teodolita prikazani su slikom 3. Pravac V-V je vertikalna os, pravac H-H horizontalna, a pravac K-K prolazi kroz durbin i predstavlja vizurnu os.



Slika 3: Osnovni dijelovi i glavni pravci mjernog uređaja

U primjeni se nalaze optički i elektronički teodoliti čija je građa jednaka, a razlikuju se po načinu mjerenja i očitanja kuteva. Optički teodolit kuteve mjeri mehaničkim sustavom povezanim skalama za očitanje vertikalnog i horizontalnog kuta. Slikom 4 prikazan je mjerni dio uređaja i skala za očitavanje. Elektronički teodolit kuteve mjeri elektroničkim sustavom, a očitanja se prikazuju na ekran. Mjerni dio i ekran s rezultatima prikazani su slikom 5.





Slika 4: Mjerni dio uređaja i skala za očitanje optičkog teodolita





Slika 5: Mjerni dio uređaja i ekran elektroničkog teodolita

Postupak mjerenja teodolitom dijeli se na pripremni i mjerni dio, a oba su važna za pouzdano mjerenje i točnost mjernih rezultata.

Priprema teodolita uključuje:

- **Postavljanje teodolita.**

Kod postavljanja teodolita bitna je pozicija mjernog instrumenta. Stativ se mora postaviti na čvrstu podlogu i u prikladan položaj za mjerenje. Ako podloga nije čvrsta ili ako postoje vanjski utjecaji na mjerni instrument, mjerni rezultati će biti neprecizni. Položaj teodolita mora biti takav da se kroz mjerni uređaj vide sve postavljene mjerne točke. Teodoliti imaju ugrađene kompenzatore koji služe za korekcije vrijednosti kuta nagiba vertikalne osi mjernog dijela instrumenta.

- **Centriranje teodolita.**

Centriranje teodolita u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini obavlja se nakon postavljanja. Potrebno je pozicionirati mjerni dio prema podlozi tako da vertikalna os teodolita prolazi točkom stajališta instrumenta. Centriranje se obavlja optičkim viskom čiji su dijelovi durbin s nitnim križem i vizurna os, a provodi se poklapanjem nitnog križa s točkom stajališta instrumenta. Pozicioniranje mjernog dijela u horizontalnoj ravnini obavlja se pomoću 3 nivelirajuća vijka u podnožju i okrugle libele.

Mjerenje teodolitom obavlja se u dva koraka, a to su:

- **Viziranje mjerne točke**

Viziranje mjerne točke je postupak u kojem se najprije teodolit usmjerava prema mjernoj točci, a nakon toga precizno traži kroz durbin. Pomoću okulara slika se povećava i izoštrava. Viziranje završava namještanjem nitnog križa na mjernu točku.

- **Očitavanje horizontalnog i vertikalnog kuta na mjernoj skali ili ekranu.**

Nivelir

Nivelir, prikazan slikom 6, je instrument za mjerenje razlike visina između točaka. Osnovni dijelovi nivelira su:

- **Stativ**

Kao i kod teodolita stativ ima tri noge i glavu preko koje se mjerni dio uređaja pričvrsti na stativ.

- **Mjerni dio**

Mjerni dio nivelira služi za mjerenje. Okreće se oko vertikalne osi, a sastoji se od kučišta, nosača durbina, durbina i dozne libele. Osnovni optički djelovi durbina su optički mikrometar za očitanja, nitni križ, te uređaj za povećanje i izoštravanje slike.



Slika 6: Nivelir

Priprema i mjerenje nivelirom osnovne su aktivnosti rada s mjernim instrumentom.

Priprema nivelira uključuje:

- **Postavljanje nivelira**

Nivelir se postavlja na stativ, koji se sastoji od tri noge i glave. Noge su promjenjive duljine, pa mjeritelj prema svojoj visini može regulirati položaj mjernog uređaja. Pomoću centralnog vijka na glavi nivelir se pričvrsti za stativ. Stativ se mora postaviti na čvrstu podlogu i u prikladan položaj za mjerenje. Položaj nivelira mora biti između mjernih točaka koje treba izmjeriti. Niveliri imaju ugrađene kompenzatore koji služe za korekcije vrijednosti vertikalnog i horizontalnog kuta uslijed nagiba vertikalne osi.

- **Centriranje nivelira**

Centriranje teodolita u horizontalnoj ravnini obavlja se nakon postavljanja. Potrebno je pozicionirati vizurnu osi u horizontalnoj ravnini pomoću 3 nivelirajuća vijka u donjem dijelu i okrugle libele.

Mjerenje nivelirom obavlja se u dva koraka, a to su:

- **Viziranje mjerne točke**

Viziranje mjerne točke je postupak u kojem se najprije nivelir usmjerava prema mjernoj točci, a nakon toga precizno traži kroz durbin. Pomoću okulara slika se povećava i izoštrava. Viziranje završava namještanjem nitnog križa na mjernu točku.

- **Očitavanje visine**

Visina se očitava na mjernoj letvi koja se postavlja iznad mjerne točke.

Elektronski tahimetar

Tahimetri su mjerni instrumenti za mjerenje horizontalnih i vertikalnih kuteva, te duljina. Sastoje se od dvije osnovne mjerne jedinice: teodolita za mjerenje kuteva i daljinomjera za mjerenje duljine. Integrirani tahimetar u kojem se nalaze oba modula naziva se mjerna stanica, a prikazan je slikom 7. Osim modula za mjerenje kuteva i duljina integrirani tahimetar ima modul za pohranjivanje rezultata mjerenja u kojem se mogu spremiti podaci za oko 400 mjernih točaka. Nakon obavljenog mjerenja rezultati se mogu prebaciti na računalo gdje se rezultati analiziraju pomoću specijalnih programskih paketa i prikazuju u tabličnom ili grafičkom obliku.



Slika 7: Elektronski tahimetar

Princip rada mjernih instrumenata je kontinuirano emitiranje infracrvene ili laserske zrake elektrooptičkog daljinomjera prema mjernoj točci. Nužan uvjet je da se mjerna točka vidi tj. između točke i instrumenta ne smije biti prepreka. Zraka se reflektira od mjerne točke i vraća u prijemnik na instrumentu u kojem se registrira. Nakon registracije prema faznoj razlici ulazne i izlazne zrake računa se udaljenost točke od instrumenta.

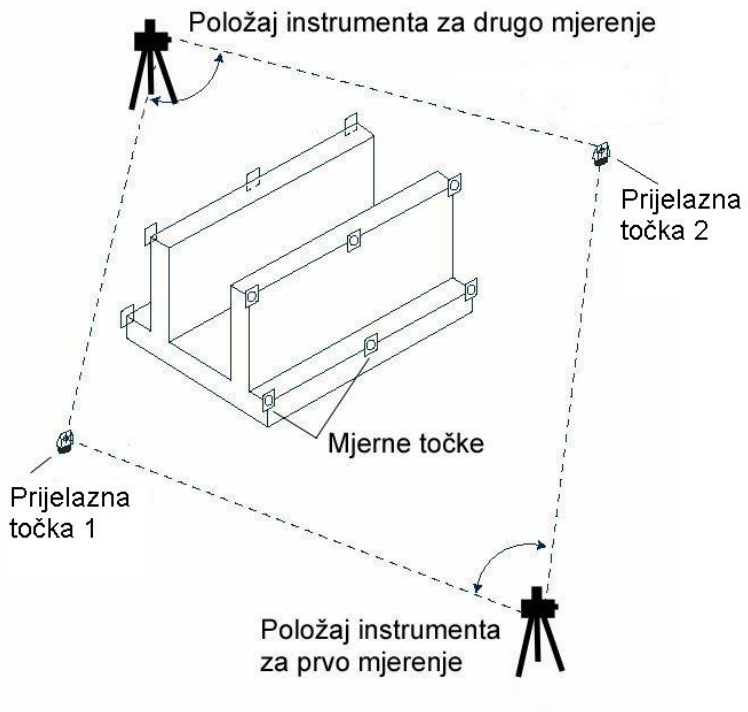
Mjerenje tahimetrom provodi se najčešće u fazi predmontaže kada se kontroliraju dimenzije i oblik sekcije trupa broda. Na karakteristična mjesta strukture postavljaju se mjerne točke. Pričvršćuju se lijepljenjem ili magnetima za strukturu sekcije. Radi nužne što bolje refleksije mjerne točke se postavljaju što okomitije prema instrumentu. Na refleksiju će negativno utjecati slaba osvjetljenost, mokra i tamna površina mjerne točke. Često se za mjerenje koriste retro reflektivne točke koje su dobro uočljive i pri slabijem osvjetljenju, a ponekad se koristi usmjereno svjetlo kada je mjerna točka zatamnjena okolnom strukturom sekcije.

Na početku mjerenja, na strukturi se definira lokalni koordinatni sustav postavljanjem tri točke. Prva točka je ishodište lokalnog koordinatnog sustava, a druga i treća određuju položaj koordinatnih osi lokalnog koordinatnog sustava. U praksi, lokalni koordinatni sustav sekcije postavlja se na ravnom dijelu strukture, a takav dio strukture se obično nalazi na poziciji građevnog rebra. Nakon postavljanja lokalnog koordinatnog sustava mjere se položaji karakterističnih mjernih točaka na strukturi koje su definirane mjernim skicama dimenzijske kontrole.

Sekcije brodskog trupa su velikih dimenzija i teško je očekivati da će se sekcija izmjeriti iz jednog položaja tahimetra. Radi toga, instrument se mora postaviti na barem dva mjesta kao što je prikazano slikom 8, a mjerenje se obavlja u dva koraka. U prvom koraku mjerni uređaj se postavlja na poziciju s koje se mjere položaji točaka s jedne strane sekcije. U drugom koraku mjerni uređaj se premješta na drugu poziciju s koje se mjere položaji točaka s druge strane sekcije.

Ovakav način rada zahtjeva postavljanje prijelaznih točaka koje se postavljaju u prostoru oko sekcije i mora ih biti barem dvije. Nužno je da se prijelazne točke vide sa svih pozicija postavljanja mjernog instrumenta. Funkcija prijelaznih točaka je transformacija koordinatnog sustava različitih položaja instrumenta u zajednički koordinatni sustav tako da se mjerni rezultati promatraju kao da su mjereni s jedne pozicije. Pri tome jako je važno da se prijelazne točke ne pomiču sa definirane pozicije, pa se posebno označavaju i paze,

jer o tome ovisi točnost mjerenja. Ako do pomaka prijelaznih točaka dođe cjelokupno mjerenje se mora ponoviti.



Slika 8: Mjerenje volumenskih objekata tahimetrom

Mjerenje tahimetrom ovisi o položaju sekcije koja se mjeri: ponekad se mjerenje ne može napraviti, jer se sekcija dobro ne vidi radi sastavljanja sekcije u blizini zida hale ili može biti pokrivena drugim sekcijama na skladištu gotovih sekcija brodogradilišta. Mjerenja izvan radionice na otvorenim površinama izloženo je atmosferskim prilikama. U prvom redu kritične su padaline radi osjetljivosti uređaja na vlagu.

2.4. Kontrola u predmontaži

Glavni zadatak faze predmontaže je sastavljanje sekcija, blokova ili modula brodskog trupa. Pri tom je osnovni sklop ukrijepljeni panel koji se sastavlja u ranijoj fazi predmontaže, na uglavnom automatiziranim linijama.

U odnosu na prethodne faze proizvodnog procesa u predmontaži se povećavaju dimenzije i mase građevnih jedinica, količine materijala, te broj pozicija. Kritični tehnološki postupak u predmontaži je zavarivanje, a zavarivanje je najznačajniji uzročnik deformacija strukture trupa. Radi ovih razloga kontrola dimenzija i oblika ima veliki značaj, a provode je traseri, brodomonteri ili kontrolori iz službe dimenzijske kontrole brodogradilišta.

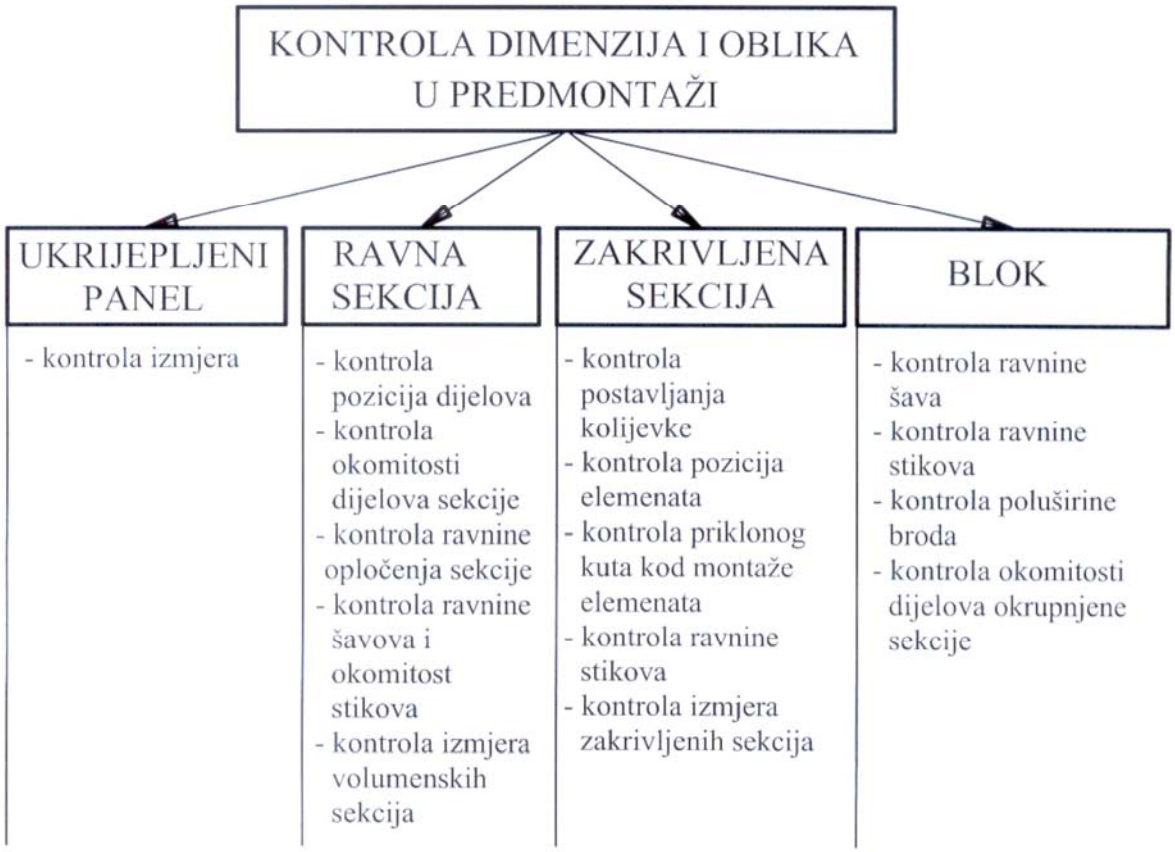
Kontrola dimenzija i oblika u predmontaži može se podijeliti u dvije faze:

- Kontrola dimenzija i oblika u toku sastavljanja
- Kontrola dimenzija i oblika gotove sekcije

Kontrola tokom sastavljanja sekcije obavlja se na predmontažnim platformama i provodi se jednostavnim pomagalima kao što su mjerna vrpca, kutomjer ili visak. Karakteristično je da se uočena netočnost ispravlja odmah, te se za korekcije ne pišu posebna izvješća.

Kontrola dimenzija i oblika gotove sekcije obavlja se nakon predmontaže sekcije prema tehnološkoj uputi, gdje se definira što se kontrolira kod određene sekcije. Uglavnom se radi o mjerama koje se ne mogu očitati iz radioničkog nacrta sekcije, primjerice mjere prostornih dijagonala. Kontrola gotovih sekcija zahtjeva korištenje optičkih mjernih instrumenata, jer se jednostavnim alatima zahtjevane mjere ne mogu izmjeriti. Rezultati se upisuju u obrasce i šalju u odjel tehnologije te u slijedeću fazu proizvodnog procesa.

Slika 9 prikazuje aktivnosti kontrole dimenzija i oblika u fazi predmontaže prema strukturi trupa, gdje je naznačeno što se kontrolira.



Slika 9: Aktivnosti kontrole u predmontaži

2.4.1. Kontrola ukrijepljenih panela

Ukrijepljeni paneli su ravni sklopovi odnosno djelovi strukture brodskog trupa maksimalnih dimenzija 13x18 m. Sastoje se od 5 do 8 limova i 12 do 18 ukrepa. Kada u proizvodnom programu brodogradilište ima velike i strukturno jednostavne brodove moguće je izdvojiti veliki broj ukrijepljenih panela u brodskom trupu. Struktura ukrijepljenih panela pogodna je za serijsku proizvodnju te izradu na linijama visoke automatiziranosti. Rad na automatiziranim linijama koncipiran je na taktnoj proizvodnji, gdje se radne operacije dijele u taktove koji jednoliko traju da bi se dobio efekt ponavljajuće proizvodnje. Karakteristično je da se paneli kreću kroz proizvodni proces što omogućava specijalizaciju alata i osoblja na pojedinom taktu čime se utječe na visoku proizvodnost linije.

Jedan od mogućih rasporeda operacija na automatiziranoj panel liniji uključuje:

I TAKT – jednostrano zavarivanje limova

II TAKT – obrada panela

III TAKT – pozicioniranje i zavarivanje ukrepa prvog reda

U prvom taktu operacije su transport limova, priprema podloge za jednostrano zavarivanje, pozicioniranje i pritezanje limova te njihovo zavarivanje. U drugom taktu obavlja se obrezivanje panela na točnu mjeru, zrnčenje i označavanje pozicije na koju se postavljaju ukrepe, a u trećem taktu pozicioniraju se i zavaruju ukrepe.

Dimenzijska kontrola panela obavlja se nakon zavarivanja limova na prvom taktu panel linije. Provjeravaju se dužina, širina i dijagonale panela pomoću mjerne vrpce, a rezultati se uspoređuju s teorijskim dimenzijama.

Točnost dimenzija panela ovisi o načinu postavljanja i pripremi spoja limova na prvom taktu, te načinu pritiskanja i hlađenju nakon zavarivanja. Razlike izmjerenih i teorijskih dimenzija korigiraju se obrezivanjem panela na točnu mjeru na drugom taktu gdje se jedna stranica panela proglašava referentnom, a tri stranice se obrezuju. Korištenje automatiziranih linija u proizvodnji ukrijepljenih panela u odnosu na tradicionalni način izrade ukrijepljenih panela na predmontažnim platformama olakšava kontrolu dimenzija i oblika panela, jer su postupci kontrole i korekcija izmjera panela integrirani u proizvodni proces, te se provode pomoću numerički upravljanih strojeva koji garantiraju veliku točnost.

2.4.2. Kontrola ravnih sekcija

Ravne sekcije brodskog trupa uglavnom se nalaze u području brodskih skladišta, između strojarnice i pramčanog pika. Karakteristični primjeri ravnih sekcija su dvodno, dvobok ili paluba. Baza za sastavljanje ovih sekcija je ravni dio strukture kao što su pokrov dvodna ili unutrašnja oplata dvoboka na koje se postavljaju ostali dijelovi strukture. Zakrivljenosti ravnih sekcija su male, nalaze se na dijelu vanjske oplate i ne predstavljaju zapreku prilikom sastavljanja.

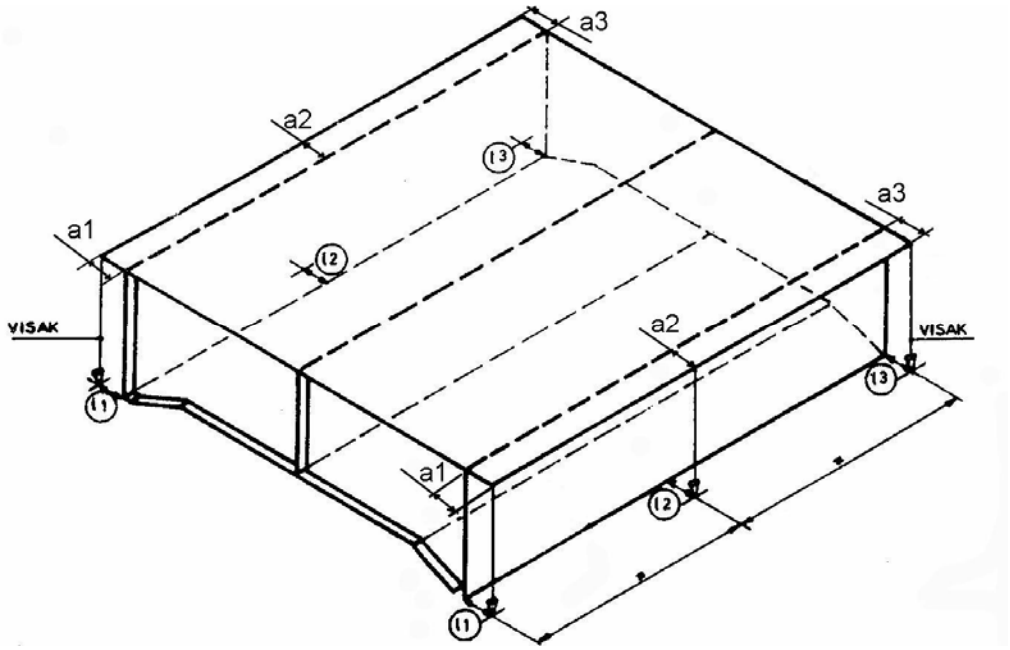
Kontrola ravnih sekcija obuhvaća:

1. Kontrolu trasirane pozicije dijelova
2. Kontrolu okomitosti dijelova
3. Kontrolu ravnine opločenja sekcije
4. Kontrolu ravnine šavova i okomitost ravnine stikova
5. Kontrolu izmjera volumenskih sekcija

Ad 1) Kontrolom trasiranih pozicija dijelova kontrolira se točnost položaja oznake ukrepa na limovima ili panelima. Označavanje se obavlja na numerički upravljanim strojevima za rezanje ili ručno prije faze sastavljanja strukture, a točnost položaja će omogućiti točniju predmontažu ukrepa. Kontrolira se mjernom vrpcom tako da se na limu ili panelu definira referentna točka od koje se mjeri položaj oznaka, a podaci se uspoređuju s teorijskim pozicijama na nacrtu.

Ad 2) Kontrola okomitosti obuhvaća kontrolu položaja uzdužnih i poprečnih dijelova ravnih sekcija, a prikazana je slikom 10 na sekciji palube. Obavlja se viskom i mjernom vrpcom.

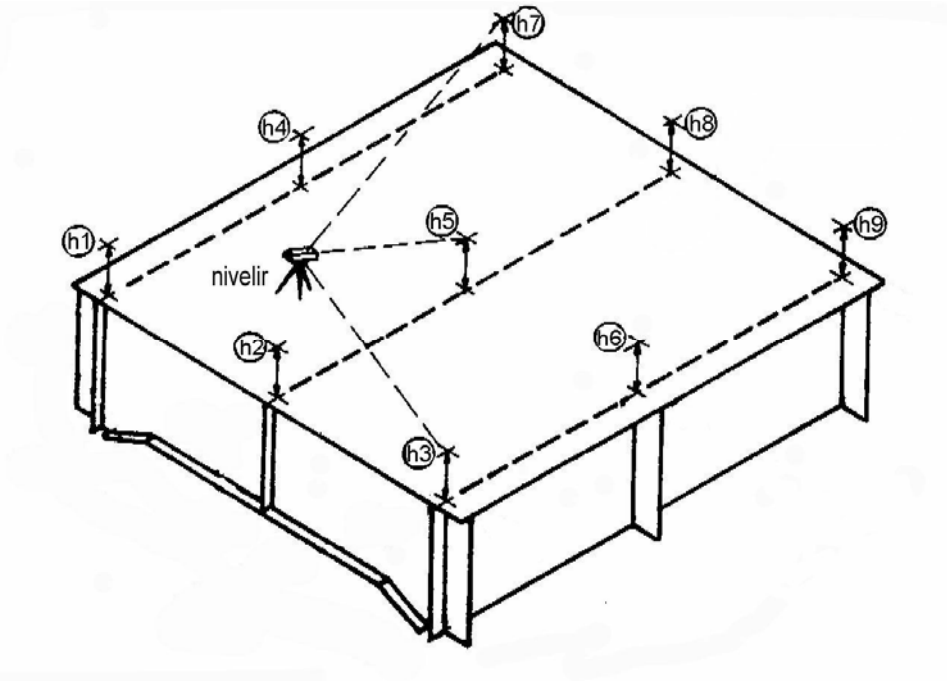
Postupak kontrole okomitosti bočnih nosača prema opločenju palube u prikazanom primjeru obuhvaća određivanje mjesta kontrole koja su označena na slici oznakama a1, a2, a3. Na označenim mjestima mjere se udaljenosti bočnog nosača od ruba šava. Zatim se na označenim mjestima sa ruba opločenja postavlja visak, te se viskom projicira položaj točaka na donji dio bočnog nosača. Nakon toga, mjere se udaljenosti projiciranih točaka od bočnog nosača koje su označene oznakama l1, l2, l3. Vrijednosti udaljenosti l1, l2, l3 se zapisuju i uspoređuju s vrijednostima udaljenosti a1, a2, a3.



Slika 10: Kontrola okomitosti elemenata strukture

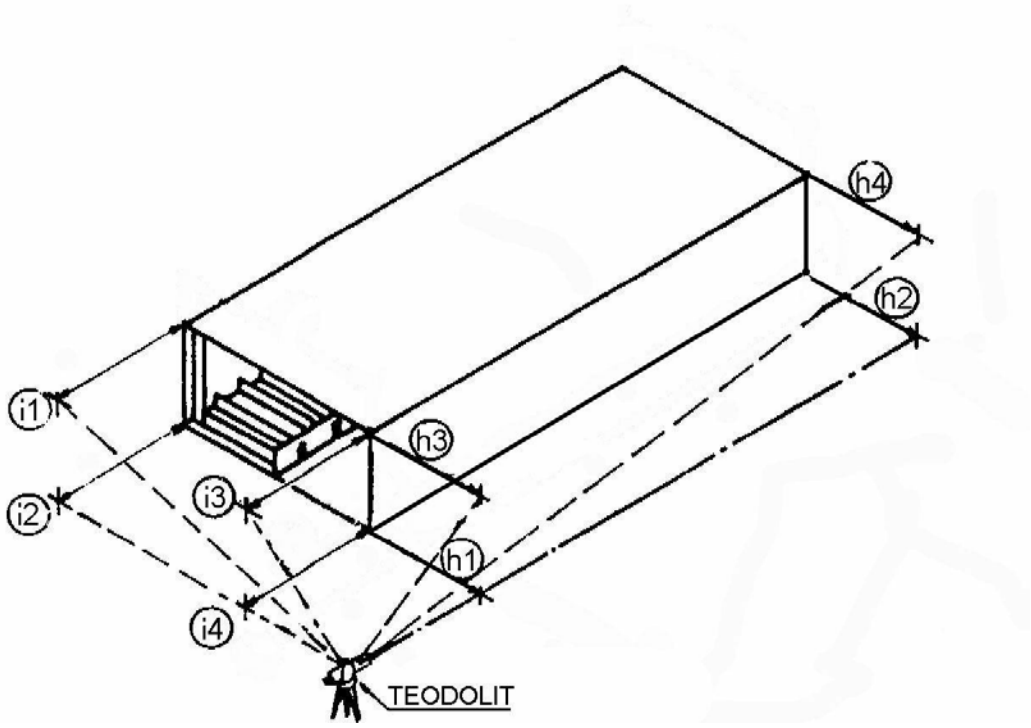
Ad 3) Kontrola ravnine provodi se na opločenju otvorenih sekcija kao što su sekcije palube čija se struktura sastoji od opločenja, te ukrepa prvog i drugog reda. Ukrepe prvog reda manjih su dimenzija, a u brodskoj strukturi ima ih u većem broju nego ukrepa drugog reda. Karakterističan primjer su uzdužnjaci pokrova dvodna i oplate dna kod volumenske sekcije dvodna. Ukrepe drugog reda većih su dimenzija i masa, ali ih u strukturi ima manje nego ukrepa prvog reda. Kod volumenske sekcije dvodna ukrepe drugog reda su rebrenice i jaki uzdužni nosači.

Struktura palube nije dovoljno kruta zbog rasporeda ukrepa, dimenzija i masa, te je podložna deformacijama koje mogu biti izazvane zavarivanjem ukrepa ili neadekvatnim transportom. Kontrola ravnine opločenja obavlja se nivelirom kao što je primjerom prikazano slikom 11. Na palubi se definiraju položaji kontrolnih točaka na sredini i krajevima ukrepa drugog reda. Nivelir se postavlja na opločenje, te se mjere visine točaka koje su na slici označene sa (h1, ..., h9). Vrijednosti visina se zapisuju i međusobno uspoređuju.



Slika 11: Kontrola ravnine opločenja sekcije

Ad 4) Kontrola ravnine šavova i okomitost ravnine stikova obavlja se na ravnim volumenskim sekcijama kao što su sekcije dvodna koje nemaju montažni višak na sekcijskim spojevima. Mjerenja se obavljaju teodolitom i mjernom vrpcom. Primjer kontrole prikazan je slikom 12.



Slika 12: Kontrola ravnine šavova i okomitost ravnine stikova

Teodolit se postavlja i centrira na poziciju s koje se mjernim instrumentom vide obje ravnine na čijim rubovima se postavljaju 4 mjerne točke. U ravnini šava mjerne točke su označene sa (h1,...,h4), a u ravnini stika sa (i1,...,i4). Prvi korak je kontrola ravnine šava. Na položajima h1 i h2 postavlja se mjerna vrpca, te se očitaju vrijednosti na tim pozicijama. Alhidada mjernog instrumenta se zakoči, mjerna vrpca se postavi na pozicijama h3 i h4, te se očitaju vrijednosti. Rezultati mjerenja na izmjerenim točkama se uspoređuju. Postupak se ponavlja za mjerne točke u ravnini šava. Najprije se alhidada otkoči, zakrene za 90° prema ravnini stika i zakoči. Mjerna vrpca postavlja se na položaje (i1,...,i4), mjere se vrijednosti i uspoređuju. Analiza rezultata obuhvaća kontrolu jedne i druge ravnine, te njihov međusobni položaj.

Ad 5) Kontrola dužine, širine i visine na zatvorenim volumenskim ravnim sekcijama obavlja se mjernim vrpcama. Postupak obuhvaća mjerenje udaljenosti zahtjevanih na mjernim skicama dimenzijske kontrole, upisivanje rezultata u obrasce, te usporedbu s teorijskim vrijednostima.

2.4.3. Kontrola zakrivljenih sekcija

Zakrivljene sekcije u strukturi brodskog trupa nalaze se u području krmenog i pramčanog pika, te strojarnice. Dva su načina sastavljanja zakrivljenih sekcija. Prvi se koristi kada je struktura sekcije manje zakrivljena. Tada je baza za sastavljanje vanjska oplata koja se postavlja na niz podupirača. Reguliranjem njihove visine postiže se zahtjevana zakrivljenost oplate. Dijelovi unutrašnje strukture uglavnom se pojedinačno postavljaju, pozicioniraju, privaruju i zavaruju na trasirane pozicije.

Drugi način sastavljanja provodi se kada je zakrivljenost oplate velika. Baza za sastavljanje postaje unutrašnja struktura sekcije, a vanjska oplata se na strukturu postavlja u zadnjoj fazi sastavljanja.

Kontrola zakrivljenih sekcija je stroža od kontrole ravnih, obavlja se na svakoj sekciji, a uključuje:

1. Kontrolu postavljanja kolijevke
2. Kontrolu pozicija dijelova sekcije
3. Kontrolu priklonog kuta kod montaže dijelova sekcije
4. Kontrolu ravnine stikova
5. Kontrolu izmjera zakrivljenih sekcija

Ad 1) Točnost izrade zakrivljene sekcije ovisi o točnosti postavljanja elemenata kolijevke. Prikazan je primjer postavljanja kolijevke za izradu zakrivljene sekcije koja se sastoji od 4 elementa. Elementi se postavljaju na ravnu platformu radionice, te se učvršćuju ukrepama kako je prikazano slikom 13.

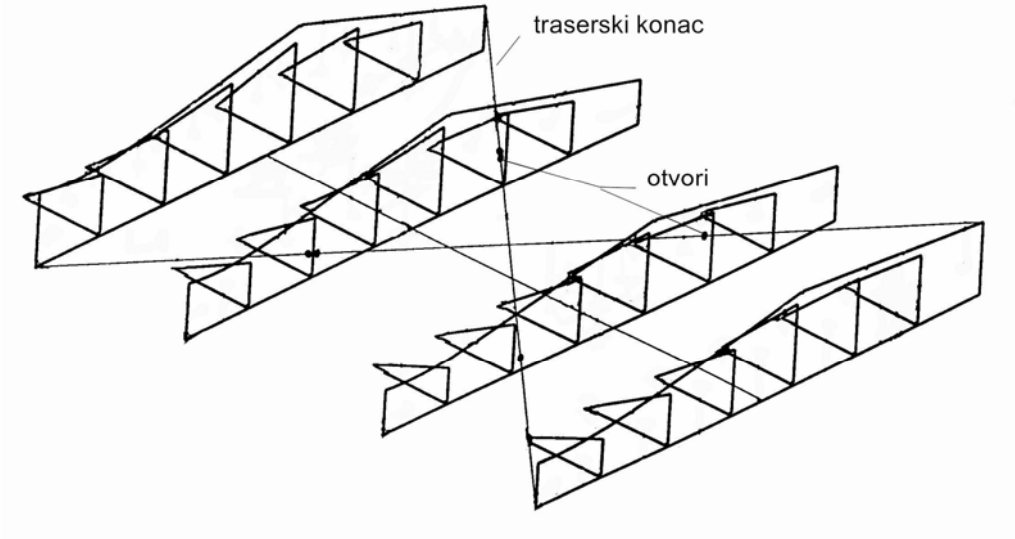


Slika 13: Elementi kolijevke

Radioničkim nacrtom definiran je položaj elemenata koljevke prema referentnom pravcu, te prikloni kutevi elemenata prema podlozi kao i njihova međusobna udaljenost.

Kontrola postavljanja kolijevke obavlja se mjernom vrpcom, kutomjerom i traserskim koncem, a postupak se sastoji od:

- Mjernom vrpcom mjere se međusobne udaljenosti elemenata kolijevke i udaljenosti krajeva kolijevke od referentnog pravca, te se mjere prikloni kutevi elemenata kolijevke prema radnoj platformi. Izmjerene vrijednosti se uspoređuju s teorijskim vrijednostima.
- Prostorne dijagonale kolijevke kontroliraju se traserskim koncem kao što se vidi na slici 14. Konac se postavi između točaka dijagonala i provlači kroz otvore na elementima kolijevke. Na taj način se kontrolira da li su elementi dobro postavljeni. Konac mora nesmetano proći kroz sve otvore.



Slika 14: Kontrola prostornih dijagonala traserskim koncem

Ad 2) Kontrola pozicija dijelova sekcije provodi se kao i kod ravnih sekcija. Potrebno je kontrolirati položaj trasiranih oznaka na koje se postavljaju elementi strukture.

Ad 3) Kontrola obuhvaća mjerenje priklonog kuta dijelova strukture u predmontaži sekcije, a obavlja se kutomjerom. Kod dužih profila prikloni kut se mjeri na krajevima i na sredini profila, vrijednosti se zapisuju i uspoređuju s teoretskim.

Ad 4) Ravnina stikova kontrolira se kod sekcija uzvoja koje nemaju montažni tehnološki dodatak na sekcijskom spoju te se zahtjeva točan položaj dijelova sekcijskog spoja. U prikazanom primjeru sekcijski spoj se sastoji od limova unutrašnjeg i vanjskog opločenja, te hrptenjaka i proveze. Kontroliraju se stikovi na krmenom i pramčanom dijelu sekcije pomoću traserskog konca, metalne žice i utega. Postupak je ilustriran slikama 15 i 16.



Slika 15: Kontrola ravnine stika



Slika 16: Kontrola ravnine stika

Na slici 15 prikazana je sekcija uzvoja oslonjena na kolijevku unutrašnjom oplatom. Na hrptenjaku i provezi zavaruju se držači preko kojih se postavlja metalna žica s utezima čime se definira prvi pravac kontrole u ravnini stika. Na slici 16 prikazano je postavljanje vanjske oplate sekcije. Na rubu vanjske i unutrašnje oplate sekcije provlači se traserski konac kojim se definira drugi pravac kontrole u ravnini stika. Mjeri se odstupanje pravaca traserskog konca i metalne žice, a položaj vanjske oplate se korigira dok se kontrolni pravci ne poklope u ravnini stika.

Ad 5) Glavne izmjere zakrivljenih sekcija kao što su duljina, širina, visina i dijagonale kontroliraju se kao i kod ravnih sekcija. Kontrolne mjere zadane su mjernim skicama dimenzijske kontrole i mjere se mjernom vrpcom. Vrijednosti se zapisuju i uspoređuju s teorijskim vrijednostima.

2.4.4. Kontrola blokova

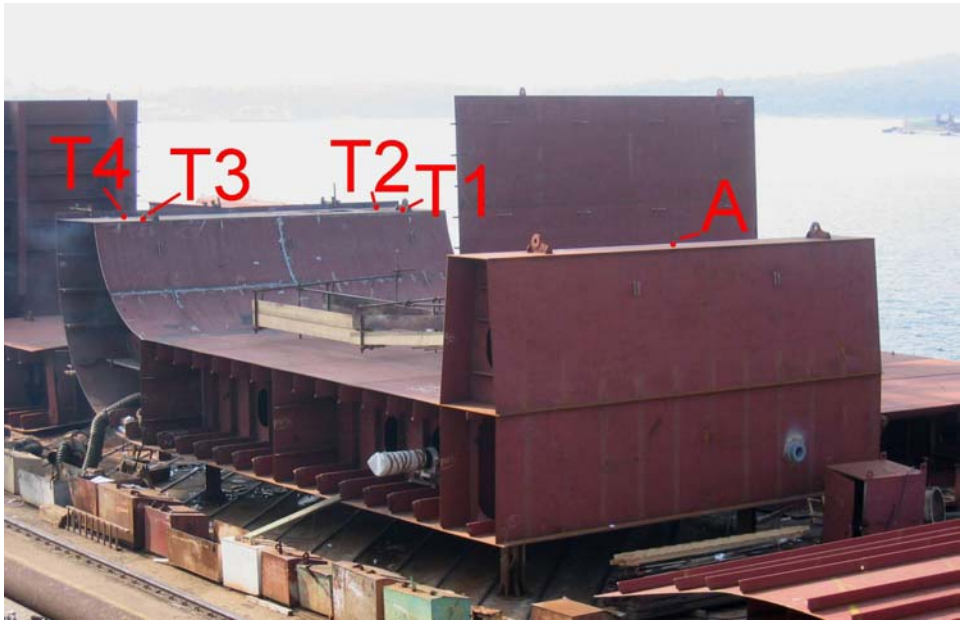
Grupa sekcija nastaje spajanjem 3 do 4 sekcije. Okrupnjavanje se obavlja na predmontažnim platformama, a kontrola oblika i dimenzija obavlja se prilikom pozicioniranja sekcija i to uglavnom optičkim mjernim instrumentima.

Kontrola grupe sekcija obuhvaća:

1. Kontrolu ravnine šava
2. Kontrolu ravnine stika
3. Kontrolu poluširine broda
4. Kontrolu okomitosti dijelova okrupnjene sekcije

Ad 1) Kontrola ravnine šava obavlja se najčešće kod okrupnjavanja središnje sekcije dvodna sa uzvojnom sekcijom. Kontrolira se ravnina proveze na uzvoju koja mora biti paralelna s referentnom ravninom na središnjoj sekciji dvodna. Postupak kontrole prikazan je slikom 17, a obavlja se nivelirom.

Nivelir se postavlja na nosač centralne pregrade središnje sekcije dvodna u točki A. Na pramčanom i krmenom dijelu uzvojne sekcije na položaju okvira sekcije postavljaju se 4 mjerne točke T1, T2, T3 i T4 čije se visine mjere. Vrijednosti izmjerenih visina se uspoređuju, a prema rezultatima mjerenja radi se korekcija položaja uzvojne sekcije.



Slika 17: Kontrola ravnine šava

Ad 2) Kontrola ravnine stika obavlja se nakon centriranja i postavljanja sekcije uzvoja na središnju sekciju dvodna. Točnost ravnine stika okrupnjenih sekcija dvodna je nužna, jer se sekcije ne rade s tehnološkim dodatkom, a u slučaju većih netočnosti potrebne su ozbiljnije intervencije u strukturi u fazi montaže. Kontrola se obavlja teodolitom, a postupak je prikazan slikom 18.



Slika 18: Kontrola ravnine stika

Mjerni instrument postavlja se ispred stika koji se kontrolira tako da se sve mjerne točke na stiku mogu vidjeti. Mjernom vrpcom izmjeri se udaljenost teodolita od stika. Na spoju središnje sekcije dvodna i uzvojne sekcije postavlja se mjerna točka T1 i mjerna letva. Durbin mjernog instrumenta usmjeri se prema mjernoj letvi, a alhidada zakreće dok se na mjernoj letvi ne očita udaljenost jednaka udaljenosti teodolita od stika. Alhidada se fiksira i time je određena kontrolna ravnina stika. Zatim se na stiku uzvojne sekcije postavljaju mjerne točke T2 i T3 čiji se položaj mjeri i uspoređuje s položajem kontrolne ravnine, te korigira položaj uzvojne sekcije prema središnjoj sekciji dvodna.

Ad 3) Primjer okrupnjavanja sekcije dvodna sa uzvojnom sekcijom karakterističan je za kontrolu poluširine broda. Poluširina broda kontrolira se mjernom vrpcom koja se razvlači između dvije mjerne točke, a postupak je prikazan slikom 19. Prva mjerna točka T1 postavlja se na centralnoj liniji središnje sekcije dvodna, a druga T2 na unutrašnju stranu vanjske oplate sekcije uzvoja. Mjerenja se provode na pramčanom i krmenom dijelu sekcije, a izmjerene vrijednosti se uspoređuju s teorijskim vrijednostima.



Slika 19: Kontrola poluširine broda

Ad 4) Okomitost dijelova okrupnjene sekcije kontrolira se teodolitom, a karakterističan primjer je spajanje sekcije pregrade s palubom ili bokom broda. Na slici 20 je prikazan primjer spajanja sekcije uzdužne pregrade na sekciju palube.



Slika 20: Kontrola okomitosti sekcije uzdužne pregrade

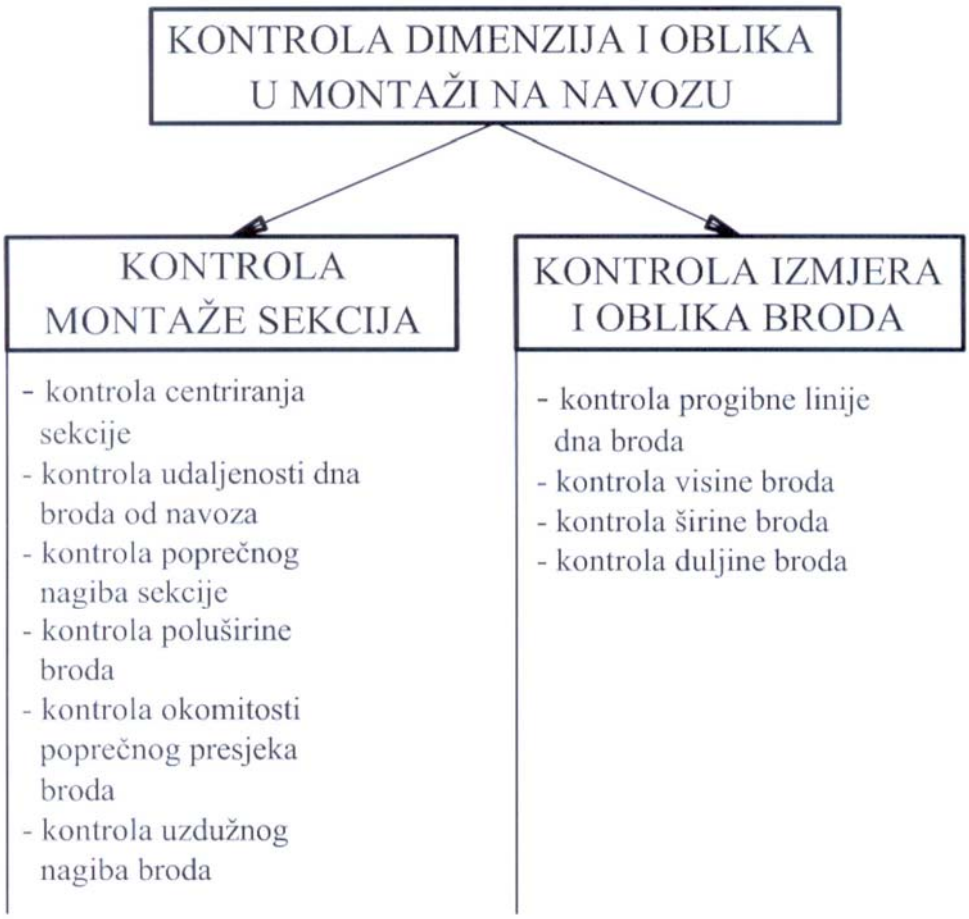
Baza za okrupnjavanje je sekcija palube koja se na ravnu površinu postavlja u okrenutom položaju tako da je na gornjoj strani nosač uzdužne pregrade. Uzdužna pregrada postavlja se dizalicom na nosač pregrade, te pridržava kosim priponama. Pritezanjem kosih pripona na jednu ili drugu stranu korigirat će se položaj uzdužne pregrade na nosaču. Mjerenje položaja pregrade obavlja se teodolitom koji se postavlja i centrira ispred pregrade. Na nosaču pregrade postavlja se mjerna točka T1. Teodolitom se odredi njen položaj, te se mjerni instrument fiksira u toj vertikalnoj referentnoj ravnini. Mjerna točka T2 postavlja se na vrhu pregrade. Teodolitom se mjeri njen položaj i određuje odstupanje od referentne vertikalne ravnine, te korigira položaj pregrade prema nosaču palube.

2.5. Kontrola u montaži

Montaža trupa obuhvaća aktivnosti sastavljanja sekcija, sklopova i podsklopova na dilju koji može biti uzdužni navoz, suhi dok ili ravna površina.

Slikom 21 prikazane su stavke kontrole oblika i dimenzija na navozu, a mogu se podijeliti u dvije grupe. Prva je kontrola pri montaži sekcija, a druga je kontrola izmjera broda nakon montaže.

Točnost u montaži trupa treba osigurati od samog početka gradnje tj. od postavljanja prve sekcije dvodna na potklade. Sekcije dvodna su baza za sastavljanje trupa, pa se početne pogreške do montaže sekcija palube zbrajaju i mogu postati nenadoknadive. Osnovne stavke kontrole dimenzija i oblika u montaži trupa na navozu za svaku sekciju su kontrola centriranja sekcije, te kontrola poprečnog i uzdužnog nagiba sekcije. Osim toga, postoje za pojedine grupe sekcija brodskog trupa specifični zahtjevi kontrole. Kod sekcija dvodna to je okomitost poprečnog presjeka sekcije i centralne linije broda, te visina dna sekcije od navoza. Kod sekcija uzvoja dodatno se kontrolira poluširina broda, a kod sekcija dvoboka se osim poluširine kontrolira i visina palube.



Slika 21: Stavke kontrole dimenzija i oblika na navozu

2.5.1. Kontrola montaže sekcija

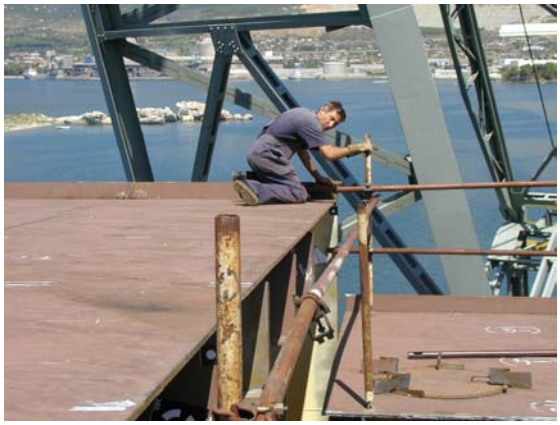
Redoslijed montaže sekcija na navozu određen je nacrtom, a faze rada su slijedeće:

Sekcija se dizalicama transportira na navoz te se postavlja u položaj za spajanje s prethodno montiranim sekcijama. Postavljanje sekcije zahtijeva uigrani i uhodani rad

brodomontera koji sekciju prate na navozu i dizaličara koji prema uputama brodomontera regulira poziciju sekcije kao što je prikazano slikama 22 i 23.



Slika 22: Postavljanje sekcije



Slika 23: Postavljanje sekcije

Nakon postavljanja sekcije potrebno je kontrolirati njen položaj, najčešće uzdužni i poprečni nagib. Temeljem rezultata mjerenja sekcija se pozicionira u ispravan položaj pomoću hidrauličkih pumpi ili mehaničkih pritezača prikazanim slikama 24 i 25.



Slika 24: Hidraulička pumpa za pozicioniranje sekcije



Slika 25: Mehanički pritezač za pozicioniranje sekcije

Kada sekcije imaju tehnološki dodatak stikovi i šavovi se preklapaju, te ih je potrebno odrezati toplinskim postupkom. Nakon rezanja potrebno je ponoviti pozicioniranje sekcije. Rezanje i pozicioniranje često se radi u nekoliko koraka dok sekcija ne dođe u konačan položaj. Slijedi pripremanje sekcijskog spoja, gdje se opločenje pomoću niza pomoćnih naprava čelične ili aluminijske izvedbe dovodi u pravilan dosjed, nakon čega se postavljaju keramičke pločice za formiranje korjenskog zavara.

Zavarivanje sučeljenog spoja limova u fazi montaže provodi se u dva koraka. U prvom koraku zavari se MAG postupkom korjen zavara. Nakon zavarivanja korjena režu

se pomoćne naprave, te slijedi punjenje žlijeba zavara automatskim postupkom zavarivanja, najčešće zavarivanjem pod praškom.

Kontrola dimenzija i oblika u montaži trupa obavlja se optičkim mjernim instrumentima. Analiza mjerenih rezultata obavlja se na mjestu mjerenja, a korekcije se provode odmah bez pisanih izvješća.

Stavke kontrole dimenzija i oblika u montaži trupa na navozu su:

1. Kontrola centriranja sekcije
2. Kontrola udaljenosti oplate od dna navoza
3. Kontrola poprečnog nagiba sekcije
4. Kontrola poluširine
5. Kontrola okomitosti poprečnog presjeka na centralnu liniju broda
6. Kontrola uzdužnog nagiba

Ad 1) Kontrola centriranja sekcije odnosi se na sekcije dvodna koje se pozicioniraju na uzdužnu simetralu građevnog mjesta. Primjerom na slici 26 je prikazano centriranje sekcije dvodna, pri čemu simetralnu ravninu navoza treba poklopiti s centralnom linijom broda. Kontrola se obavlja teodolitom koji se postavlja na građevnom mjestu iznad linije simetrale. Mjerni dio instrumenta, alhidada i durbin namještaju se na pravac simetralne linije pomoću oznaka na navozu, te se alhidada zakoči čime je definirana referentna simetralna ravnina. Na centralnoj liniji sekcije dvodna postavlja se mjerna točka T1, te se mjeri odstupanje mjerne točke od referentne simetralne ravnine. Prema rezultatima mjerenja korigira se položaj sekcije dvodna.



Slika 26: Kontrola centriranja sekcije

Ad 2) Sekcije dvodna postavljaju se na potklade na navozu. Ravnina oplate dna je osnovna ravnina gradnje broda, a kut nagiba osnovne ravnine gradnje mora biti konstantan. Pri tome, visina potklada ne mora po cijeloj dužini broda biti konstantna, jer je često uzdužni oblik navoza kružni luk. U tom slučaju, za svaki red potklada definira se visina koja će omogućiti konstantan nagib osnovne ravnine gradnje broda. Nakon postavljanja sekcije dvodna na potklade mjernom vrpcom i traserskom letvom kontroliraju se udaljenosti oplate dna od navoza i uspoređuju s teorijski definiranim vrijednostima visina potklada. Najčešće se, prema iskustvu brodomontera, visina potklada ostavlja 20 mm višom, jer se pod težinom sekcija koje dolaze sabija pijesak u pješčanoj potkladi i drveno pakovanje između potklada i dna broda.

Ad 3) Poprečni nagib sekcije kontrolira se nakon postavljanja sekcije na mjesto montaže. Na slici 27 prikazan je primjer kontrole poprečnog presjeka sekcije dvodna. Sekcija dvodna se postavlja na potklade, te pridržava dizalicom radi korekcije položaja.



Slika 27: Kontrola poprečnog nagiba sekcije

Kontrola se obavlja nivelirom koji se postavlja na prethodno montiranu sekciju dvodna čiji je položaj fiksiran. Mjerne točke T1 i T2 postavljaju se na krajnjem okvirnom rebru sekcije, a njihova visina mora biti jednaka. Mjerna točka T1 nalazi se na provezi uzvoja, a mjerna točka T2 na nosaču uzdužne pregrade središnjeg dijela sekcije dvodna. Nivelirom se mjere visine mjernih točaka. Rezultati se zapisuju i uspoređuju, a prema podacima mjerenja korigira se položaj sekcije. Korekcija položaja sekcije u ovom primjeru obavlja

se tako da se sekcija podigne dizalicom te se na potkladama dodaju drveni klinovi kako bi se povećala visina ili se drveni klinovi skidaju kako bi se smanjila ukupna visina potklade.

Ad 4) Poluširina broda se kontrolira kada se u trup montiraju sekcije uzvoja ili dvoboka. Obavlja se mjernom vrpcom. Kao i kod mjerenja poluširine u predmontaži postavljaju se dvije mjerne točke, jedna na centralnoj liniji broda, a druga na unutrašnjem dijelu oplate uzvoja. Njihova udaljenost se mjeri razvlačenjem mjerne vrpce, a rezultati se uspoređuju s teorijskim izmjerama.

Ad 5) Osim udaljenosti oplate dna od navoza i poprečnog nagiba kod sekcija dvodna potrebno je kontrolirati ravninu poprečnog presjeka koja mora biti okomita na uzdužnu simetralnu ravninu građevnog mjesta. Primjer kontrole prikazan je slikom 28, a obavlja se teodolitom i mjernom vrpcom tako da se mjerni instrument postavi iznad simetralne linije dilja u blizini presjeka koji se kontrolira.

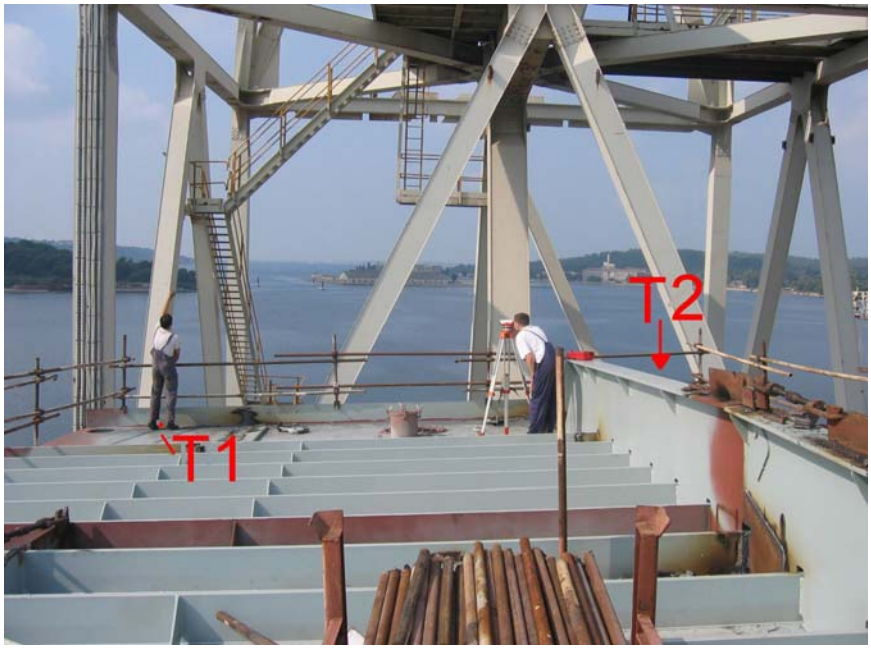


Slika 28: Kontrola okomitosti poprečnog presjeka broda

Mjerni dio instrumenta, alhidada i durbin namještaju se na pravac simetralne linije pomoću oznaka na dilju, te se alhidada zakoči čime je definirana referentna simetralna ravnina. Zatim se alhidada mjernog instrumenta zakreće za 90° prema sekciji i fiksira. Na stiku se označe mjerne točke T1 i T2. U produžetku mjernih točaka postavljaju se mjerne letve, te se viziraju i mjere. Mjerni rezultati se uspoređuju, te se položaj sekcije korigira. Korekcije poprečnog presjeka su zahtjevne i dugotrajne, često se obavljaju rezanjem stika što je

posebno nepovoljno, jer se sekcije dvodna rade bez tehnološkog dodatka na stikovima. Svako podrezivanje stika uzrokuje nedostatak materijala i zahtjeva kompenzaciju kod montaže slijedećih grupa sekcija dvodna.

Ad 6) Uzdužni nagib sekcije mora se podudarati s kutem nagiba osnovne ravnine gradnje broda. Slikom 29 prikazana je kontrola uzdužnog nagiba sekcije palube. Kontrola se obavlja nivelirom. Mjerne točke T1 i T2 postavljaju se na položaju jakih nosača i to na krmenom i pramčanom dijelu sekcije, a postavljaju se na jednakoj udaljenosti od centralne linije. Mjerni instrument se postavlja između mjernih točaka. Slijedi viziranje i mjerenje visina mjernih točaka. Razlika visina mjernih točaka T1 i T2 uspoređuje se s teorijskom vrijednošću razlike visina, a na osnovu mjernih rezultata korigira se položaj sekcije na navozu.



Slika 29: Kontrola uzdužnog nagiba sekcije

Ad 7) Kontrola okomitosti radi se prilikom montaže sekcija pregrada. Obavlja se teodolitom. Primjerom je prikazana kontrola montaže uzdužne pregrade.

Teodolit se postavlja na nosač uzdužne pregrade središnje sekcije dvodna iznad oznake centralne linije broda kako je prikazano slikom 30. Prema oznaci centralne linije mjernim instrumentom se određuje vertikalna referentna ravnina. Na gornjem dijelu pregrade u simetrali sekcije, kako je prikazano slikom 31 postavlja se mjerna točka T1. Slijedi viziranje i mjerenje položaja mjerne točke T1, te usporedba s položajem vertikalne

referentne ravnine. Centralna linija broda se mora poklopiti sa simetralom sekcije. Prema izmjerenom odstupanju korigira se položaj pregrade.



Slika 30: Postavljanje teodolita



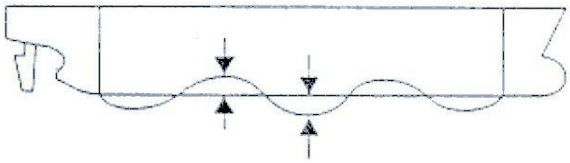
Slika 31: Postavljanje mjerne točke u simetralu sekcije

2.5.2. Kontrola izmjera i oblika broda

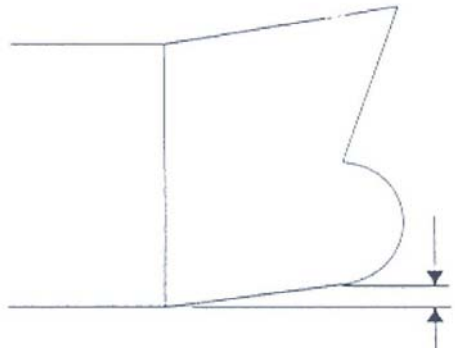
Kontrola izmjera broda obavlja se nakon montaže trupa, a prije porinuća. Obzirom na dimenzije objekta koriste se optički mjerni instrumenti, teodolit i nivelir. Obuhvaćeno je mjerenje širine, visine i duljine broda, te mjerenje progibne linije dna, deformacije oplate pokrova dvodna između dvije pregrade u teretnom prostoru, izdizanje pramčanog i krmenog dijela trupa i izdizanje boka broda na dnu. Na slici 32 prikazana je kontrola oblika trupa broda i to progibne linije dna i izdizanja pramčanog dijela broda.

Kontrola izmjera i oblika broda definirana je standardom kakvoće gradnje od Međunarodnog udruženja klasifikacijskih ustanova (IACS – International Association of Clasification Societies).

Postupak kontrole izmjera i oblika trupa prikazat će se na primjeru mjerenja deformacija oplate dna i mjerenja visine broda.



Kontrola progibne linije dna broda



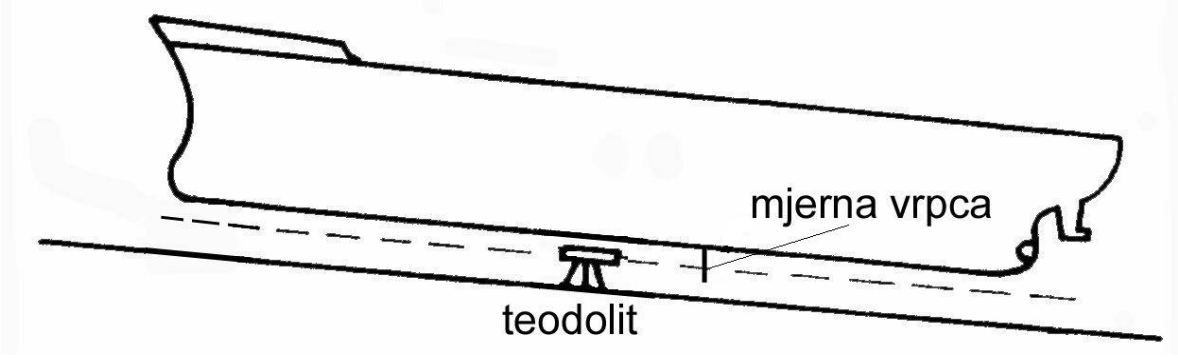
Kontrola izdizanja pramca broda

Slika 32: Skice kontrole oblika trupa broda

- **Kontrola progibne linije dna broda**

Deformacija oplate dna je odstupanje dna broda od osnovne horizontalne ravnine gradnje trupa. Mjerni rezultati u obliku izvješća o progibu dna predaju se inspektorima klasifikacijske ustanove pod čijim se propisima i nadzoru gradi brod.

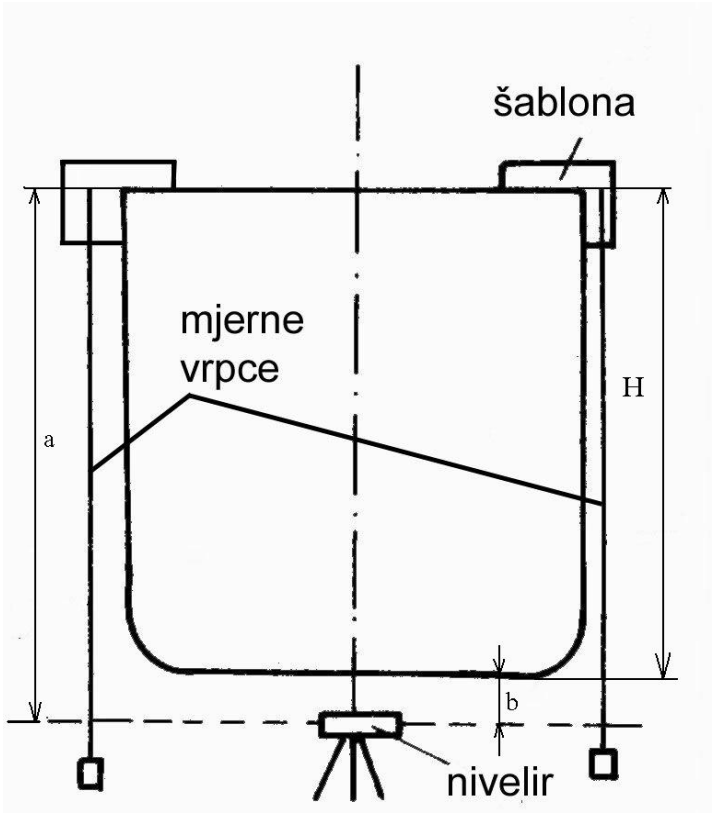
Slikom 33 prikazan je način mjerenja progiba oplate dna. Mjerenje se provodi teodolitom i mjernom vrpcom. Mjerni instrument se postavlja ispod glavnog rebra u ravnini simetrale građevnog mjesta i u tom položaju se fiksira. Durbin teodolita se zakretanjem postavlja u položaj kuta nagiba osnovne ravnine gradnje broda te se fiksira. Prva mjerna točka postavlja se na glavnom rebru gdje se okomito na dno broda postavlja mjerna vrpca na kojoj se očita visina. Mjerni rezultat točke na glavnom rebru je referentan za ostala očitanja koja se provode na odabranim rebrima. Vrijednosti se zapisuju i služe za konstrukciju progibne linije dna broda.



Slika 33: Mjerenje progibne linije dna broda

- **Kontrola visine broda**

Kontrola visine broda obavlja se nivelirom i mjernom vrpcom na poziciji glavnog rebra. Nivelir se postavlja na poziciji glavnog rebra ispod broda na građevnom mjestu kako je prikazano slikom 34. Prvi korak mjerenja je određivanje visine vizurne osi nivelira (b) od dna broda tako da se od glavnog rebra spusti mjerna vrpca i očita visina. Nakon toga se s jednog i drugog boka spušta mjerna vrpca, te se nivelirom očitaju visine s obje strane (a). Od izmjerenih vrijednosti oduzima se visina od dna broda do vizurne osi nivelira, te se dobije visina broda na glavnom rebru (H). Izmjerene vrijednosti se zapisuju i uspoređuju s teorijskom visinom broda.



Slika 34: Kontrola visine broda

2.6. Dopuštena odstupanja

Dopuštena odstupanja u brodograđevnom proizvodnom procesu definirana su standardom udruženja klasifikacijskih ustanova (IACS – International Association of Classification Societies) gdje su uključene sve vodeće klasifikacijske ustanove.

Predstavit će se standard za novogradnje koji se primjenjuje za konvencionalne tipove brodova građenih od običnog brodograđevnog čelika i čelika povišene čvrstoće. Za posebne tipove brodova kao što su primjerice brodovi za prijevoz ukapljenog plina ovaj

standard se ne primjenjuje, već se novogradnja prati po posebnim propisima klasifikacijske ustanove. Isto tako pod poseban nadzor registra spadaju brodovi koji se grade od nehrđajućeg čelika ili drugih posebnih vrsta materijala.

Standard za novogradnje udruženja klasifikacijskih ustanova sastoji se od osnovnih grupa kako slijedi:

- **Opće odredbe**

U općim odredbama standarda naglašava se da se svi radovi na novogradnji provode u skaldu s pravilima klasifikacijskih ustanova.

- **Kvalifikacije osoblja i postupaka**

Kvalifikacije osoblja i postupaka odnose se na klase zavarivača, postupake zavarivanja i kontrole zavarenog spoja.

- **Materijal**

U grupi o materijalima definira se kvaliteta i način odobravanja materijala, tolerancije debljina i stanja površina, te uvjeti popravljanja pogrešaka na površinama brušenjem ili zavarivanjem.

- **Rezanje elemenata**

U grupi rezanja elemenata definiraju se dopuštena odstupanja dimenzija i oblika izrezanog elementa. Kontrolira se odstupanje odrezanog ruba od pravog kuta ili zahtjevanog skošenja, kao i hrapavost rubova. Također se definiraju tolerance za postupke ručnog i strojnog plinskog rezanja, te rezanja plazmom.

- **Izrada podsklopova i sklopova**

Standardom se definiraju dopuštena odstupanja dimenzija i oblika podsklopova i sklopova koje su podjenjene na stavke:

- **Prirubljeni uzdužnjaci i koljena** za koje se definiraju tolerance širine prirubljenog dijela, kuta prirubnice i struka, te dopušteno odstupanje od idealno ravnog profila (savijanje oko osi pojasa i struka).

- **Sastavljeni profili** kao što su T profili ili rebra za koje se definira dozvoljeno kutno odstupanje pojasa od trake, deformacioja trake uslijed zavarivanja, te isto kao kod prirubljenih profila dopušteno odstupanje od idealno ravnog profila (savijanje oko osi pojasa i struka).

- **Naborane pregrade** za koje se definira dopušteno odstupanje radijusa nabora, visine i širine nabora, te širine struka nabora.

- **Upore, koljena i ukrepe** za koje se definiraju dopuštena odstupanja:
  - izvijanja upora između paluba,
  - promjera cilindričnih elemenata kao što su jarboli, upore i teretni stupovi,
  - slobodnog kraja koljena za ukrućenje,
  - oblika odrezanog kraja ukrepe.

- **Maksimalna temperatura zagrijavanja površine kod pravocrtnog grijanja**

Maksimalna temperatura zagrijavanja površine materijala kod pravocrtnog grijanja definira se prema vrsti materijala koji se grije i prema postupku hlađenja nakon grijanja.

- **Predmontaža sekcija trupa**

Sekcije se prema svojim geometrijskim karakteristikama dijele na plošne i volumenske, a svaka od tih grupa se dijeli na ravne i zakrivljene. U tablici 1 dane su vrijednosti dopuštenih odstupanja duljine, širine, izobličenosti, okomitosti i udaljenosti unutarnjih elemenata od teorijskog položaja na limu kod plošnih sekcija, dok se za volumenske sekcije još dodaju dopušteno uvijanje sekcije i odstupanje gornjeg od donjeg panela. Standardom se također definira glatkoća opločenja između ukrepa u poprečnom i uzdužnom smjeru na svim dijelovima strukture trupa kao što su vanjska oplata, paluba čvrstoće, paluba kaštela, krma i nadgrađe.

Tablica 1: Vrijednosti dopuštenih odstupanja pri predmontaži sekcija

PLOŠNE SEKCIJE			
Ravne plošne sekcije	Dozvoljeno odstupanje	Zakrivljene plošne sekcije	Dozvoljeno odstupanje
Duljina i širina	± 5 mm	Duljina i širina	± 5 mm
Izobličenje	± 20 mm	Izobličenje	± 20 mm
Okomitost	± 10 mm	Okomitost	± 15 mm
Odstupanje unutarnjih elemenata od točnog položaja na limu	10 mm	Odstupanje unutarnjih elemenata od točnog položaja na limu	10 mm
VOLUMENSKE SEKCIJE			
Ravne volumenske sekcije	Dozvoljeno odstupanje	Zakrivljene volumenske sekcije	Dozvoljeno odstupanje
Duljina i širina	± 5 mm	Duljina i širina	± 5 mm
Izobličenje	± 20 mm	Izobličenje	± 20 mm
Okomitost	± 10 mm	Okomitost	± 15 mm
Odstupanje unutarnjih elemenata od točnog položaja na limu	10 mm	Odstupanje unutarnjih elemenata od točnog položaja na limu	10 mm
Uvijanje	± 20 mm	Uvijanje	± 25 mm
Odstupanje gornjeg i donjeg panela	± 10 mm	Odstupanje gornjeg i donjeg panela	± 15 mm

- **Priprema spoja sučeljenog i kutnog zavara ručnim i automatskim postupkom**

Standardom se definira geometrija žlijeba različitih oblika sučeljenog spoja kao što su I, 1/2V, V, K i X za ručni i automatski postupak zavarivanja, te standard popravaka u slučaju kada geometrija žlijeba ne odgovara propisanoj. Također je standardom definirana priprema kutnog zavara za različite vrste spoja kao što su ravni žlijeb, kutni spoj s malim kutem, jednostruko skošeni žlijeb ili dvostruko skošeni žlijeb.

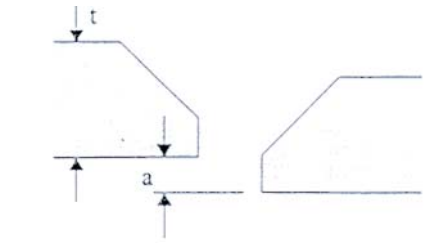
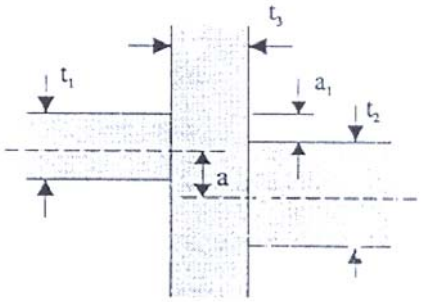
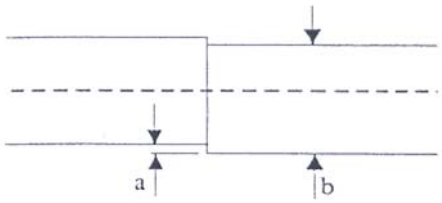
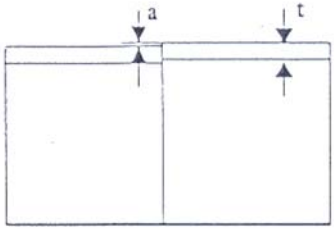
- **Oblik trupa**

IACS standardom za montirani trup broda na građevnom mjestu definiraju se vrijednosti dopuštenih odstupanja linije kobilice broda, izdizanje pramčanog i krmenog pika, te dna na sredini broda. Nadalje, definiraju se tolerance duljine između okomica, širina i visina broda te duljina između stražnjeg kraja statvene cijevi i glavnog motora.

- **Dosjed elemenata u fazi montaže sekcija u trup broda**

U fazi montaže sekcija u trup broda definira se standard dosjeda elemenata koji obuhvaća njihova dopuštena odstupanja, te standard popravaka. Primjeri dosjeda elemenata prikazani su u tablici 2 gdje je u stupcima i retcima prikazan izgled dosjeda i mjere pomoću kojih se definira vrijednost dopuštenog odstupanja i standard popravka.

Tablica 2: Dosjedi elemenata u fazi montaže

Naziv dosjeda	Vrijednost dopuštenih odstupanja i standard popravaka
Sučeljeni spoj 	U sučeljenom spoju prikazanom na skici nalaze se limovi opločenja. Smaknutost limova definirana veličinom **a** mora biti manja od 3 mm. U slučajevima kada je **a** veći od 3 mm potrebno je rezanjem osloboditi tj. popustiti strukturu tako da se dobije pravilan dosjed limova opločenja.
Kutni zavar 	Dosjed kutnih zavara prikazanih primjerom nalazi se često u strukturi trupa na mjestima gdje se profili zavaruju na rebrenicu u dvodnu. Smaknutost simetrala elemenata, označena sa **a**, u dosjedu mora biti manja od 1/3 debljine najtanjeg elementa. Kada to nije slučaj standard popravaka je da se kutni zavar poveća najviše 10%, a ako je netočnost dosjeda veća potrebno je rezanjem osloboditi profil te korigirati njegov položaj u dosjedu.
Pojas sastavljenih T profila 	Smaknutost pojasa sastavljenih T profila, označena sa **a**, ne smije biti veća od 8 mm. U slučaju kada je smaknutost do 8 mm vrhovi pojasa u dosjedu se bruse da se izjednače širine oba pojasa. U slučaju kada je smaknutost veća od 8 mm potrebno je rezanjem osloboditi strukturu i korigirati položaj elemenata dosjeda.
Visina T, L ili Holland profila 	Razlika visina profila u dosjedu, označena sa **a**, ne smije biti veća od 6 mm. Razlika visina do 6 mm može se nadoknaditi navarivanjem profila u dosjedu. Ako je razlika visina profila veća od 6 mm potrebno je profil podrezati i korigirati njegov položaj u dosjedu.

Kontrola dimenzija i oblika u brodogradnji je zahtjevna radi složenosti strukture, masa i dimenzija blokova i sekcija. Potrebe za efikasnom mjernom metodom izraženije su u fazama predmontaže i montaže, gdje se često zahtijeva mjerenje pozicija dijelova sekcije koji se ne mogu izmjeriti radi nedostupnosti pozicije mjernom instrumentu. Radi toga se razvijaju i traže nove metode kontrole među koje spada i fotogrametrijska metoda.

3. Fotogrametrija

3.1. Uvod

Optičke mjerne metode su važna grana unutar mjernih postupaka eksperimentalne mehanike. Pri mjerenju se upotrebljavaju leća i objektiv, a optički efekt se bilježi fotoaparatom ili digitalnom kamerom. Značajke optičkih mjernih metoda su beskontaktnost što znači da nema utjecaja metode na mjerni objekt te velika točnost. Prema karakteru svjetla metode se dijele na koherentne i nekoherentne. Kod koherentnih metoda kao izvor svjetla koristi se laser, a nekoherentne metode kao što je fotogrametrija koriste obično svjetlo.

Osnovna ideja fotogrametrijske metode je rekonstrukcija optičkih pravaca tj. definiranje jednadžbi pravaca koji povezuju točke na objektu i njihove projekcije na fotografiji. Kod mjerenja u prostoru potrebno je objekt snimiti iz barem dva položaja kamere. Dva snimka tada tvore stereopar, a fotogrametrijska rekonstrukcija prostora pomoću stereoparova zove se stereofotogrametrija. Optički pravci su se u prošlosti rekonstruirali opto-mehaničkim postupkom pomoću velikih i skupih uređaja stereoinstrumenata. Analiza snimaka bila je dugotrajna i komplicirana, te ograničena na specijalizirane mjerne institute, pa je fotogrametrija rijetko nalazila primjenu u industriji.

Razvojem digitalnih kamera i računalne obrade slike razvili su se automatizirani fotogrametrijski sustavi. Razvoj metode povezao je dva područja, a to su:

- Fotografija i
- Metrologija

Radi potreba visoke točnosti mjernih rezultata, pouzdanosti i automatizacije fotogrametrijskog sustava fotografije moraju biti visoko kvalitetne. Digitalni aparati su iz dana u dan sve bolji i bolji, granice kvalitete fotografije i veličine rezolucije se stalno pomiču, što je važno za točnost mjerenja. Istovremeno cijene opreme na tržištu padaju, pa postaje sve dostupnija za široku primjenu.

Metrologija se bavi tehnikama za određivanje 3D koordinata mjernog objekta iz fotografija.

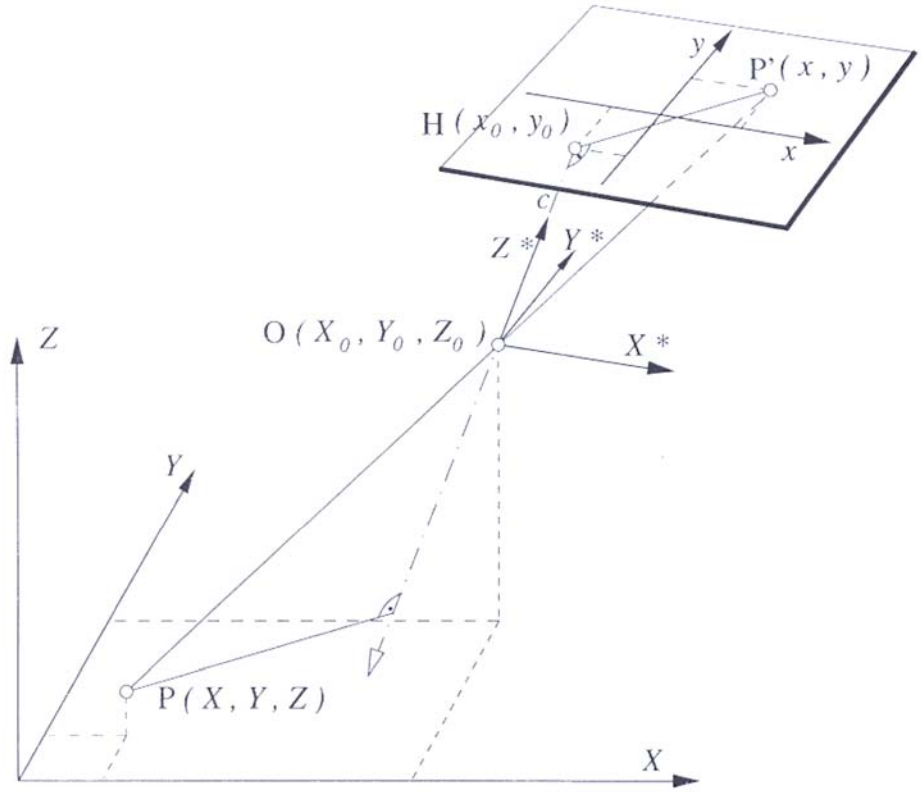
3.2. Teorijska osnova metode

Fotogrametrija je optička mjerna metoda gdje se prostorne koordinate točaka promatranog predmeta određuju pomoću snimaka napravljenih fotoaparatom. Na snimkama ostaju zabilježene uočljive mjerne točke pomoću kojih se provodi rekonstrukcija optičkih zraka.

U matematičkom modelu rekonstrukcije pravaca definiraju se dva skupa koordinata, a to su:

- OBJEKTNE (X, Y, Z) – koordinate točke na objektu
- SLIKOVNE (x, y) – položaj projekcije promatrane točke na fotografiji

Slikom 35 prikazana je veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orjentirane kamere. Točka na mjernom objektu je P s objektnim koordinatama (X,Y,Z). Projekcija točke P na filmu ili čipu fotoaparata je P' sa slikovnim koordinatama (x,y). Za rekonstrukciju optičkog pravca tj. postavljanje funkcijske veze između objektnih i slikovnih koordinata postavlja se pomoćni koordinatni sustav X^*,Y^*,Z^* s ishodištem u točki O koja se nalazi u središtu leće objektiva. Koordinatne osi X^* i Y^* paralelne su s koordinatnim osima kamere X i Y.



Slika 35: Veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orjentirane kamere

Objektne koordinate točke P transformiraju se u koordinatni sustav X^*,Y^*,Z^* uzimajući u obzir translaciju u smjerovima X,Y i Z, te rotaciju oko koordinatnih osi kutevima ω, ψ i κ. Veza slikovnih i objektnih koordinata u koordinatnom sustavu X^*,Y^*,Z^* slijedi iz uvjeta kolinearnosti, a jednadžbe slikovnih koordinata imaju oblik:

$x = f(c, Xo,Yo,Zo,\omega,\psi,\kappa,X,Y,Z,x_o,\Delta x)$

$y = f(c, Xo,Yo,Zo,\omega,\psi,\kappa,X,Y,Z,y_o,\Delta y)$, gdje su:

c – konstanta kamere, vrijednost približno jednaka žarišnoj duljini objektiva

Xo,Yo,Zo–koordinate ishodišta O(središte leće objektiva) pomoćnog koordinatnog sustava

ω, ψ i κ – kutevi zakreta koordinatnog sustava kamere

$\mathbf{x_o, y_o}$ – slikovne koordinate točke

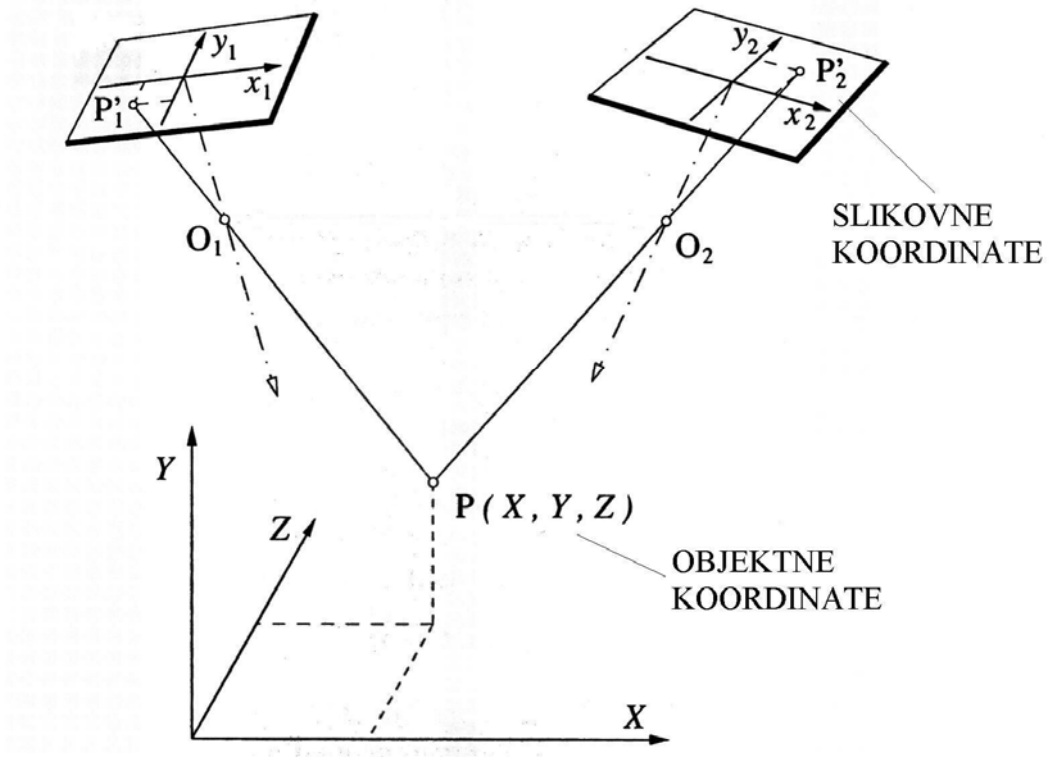
X, Y, Z – objektne koordinate točke

Δx, Δy – odstupanje od centralne projekcije. Uslijed nesavršenosti objektiva položaj točke udaljene od pravca centralne projekcije mora se korigirati. Pri korekciji uzimaju se u obzir parametri kao što su radijalna distorzija, nejednolikost mjerila fotografije, neokomitost, izobličenje slike kao posljadica neravnoće kartice, te nepravilno izobličenje slike.

Ovime je definiran model rekonstrukcije optičkih pravaca tj. veza koordinata točke na objektu i na fotografiji. Teoretski, ovakav model dovoljan je za razmatranje mjerenja u ravnini kada se dvije nepoznate veličine objektnih koordinata X i Y, (Z=0), mogu odrediti preko dvije jednadžbe slikovnih koordinata (x,y).

Kada se razmatraju mjerenja u prostoru gdje treba odrediti tri nepoznate vrijednosti prostornih koordinata točke (X,Y,Z) dvije jednadžbe slikovnih koordinata (x,y) nisu dovoljne. Za riješavanje ovog problema potrebno je postaviti dodatne jednadžbe slikovnih koordinata točke, a to se radi tako da se točka snimi iz drugog položaja kamere čime se dobijaju još dvije jednadžbe što će omogućiti predefiniranost sustava jednadžbi.

Osnova optičkih mjernih metoda kod proračuna položaja točke u prostoru je stereoskopski efekt. Kao što čovjek položaj predmeta u prostoru može percipirati jedino gledanjem s oba oka tako je prostorna percepcija okoline kod optičkih metoda moguća jedino promatranjem s dvije kamere. Prostorni položaj točke određuje se metodom triangulacije prikazanom slikom 36. Položaj točke u prostoru određuje se presjekom optičkih pravaca koji su određeni točkom na objektu P i njenom projekcijom P' na fotografiji.



Slika 36: Princip triangulacije

Rješenje matematičkog modela proračuna objektnih koordinata točke P(X,Y,Z) u prostoru postiže se metodom izjednačenja zrakovnog snopa. Postavlja se sustav jednadžbi slikovnih koordinata točaka koje su u funkciji: objektnih koordinata točke (X,Y,Z), parametara vanjske orijentacije kamere tj. položaja i kuta fotoaparata kod snimanja svake fotografije te unutrašnjih parametara kamere koji uključuju npr. karakteristike objektiva.

Snimanjem većeg broja fotografija povećava se broj jednadžbi slikovnih koordinata, pa sustav postaje znatno predefiniran tj. broj jednadžbi bitno je veći od broja nepoznanica. Takav predefinirani sustav nelinearnih jednadžbi rješava se iterativnim postupkom minimizacije odstupanja, a konačno rješenje su prostorne koordinate promatranih točaka i svi ostali parametri matematičkog modela.

3.3. Fotogrametrijski sustav

U ovom radu korišten je fotogrametrijski sustav koji se sastoji od digitalnog aparata, prijenosnog računala, referentnih mjernih motki i mjernih točaka kao što je prikazano slikom 37.



Slika 37: Fotogrametrijski sustav

- **Digitalni fotoaparat**

Uvjet za kvalitetno mjerenje i pouzdane rezultate je korištenje digitalnog fotoaparata visoke rezolucije te dobre mehaničke stabilnosti kamere i objektiva. Rezolucija fotoaparata ovisi o broju pixela na fotografiji. Pojam pixel nastao je kao izvedenica engleskih riječi (picture element), a označava osnovnu građevnu jedinicu digitalne fotografije. Raspon rezolucija fotoaparata može biti između 3.5 i 16 Megapixela čime se određuje broj pixela po duljini i visini fotografije s tim da je omjer stranica fotografije 4:3. Primjera radi, rezolucijom od 5 Megapixela formira se fotografija od 2560x1920 pixela.

Razvoj digitalnih fotoaparata pomiče granicu njihovih mogućnosti iz dana u dan. Do prije par godina fotoaparati rezolucije oko 5 Megapixela bili su skupi. Koristili su ih samo specijalizirani instituti i tvrtke, dok je danas takav aparat uobičajan na tržištu.

Prednosti rada s fotoaparatima veće rezolucije je veći broj pixela po jednoj fotografiji što olakšava traženje mjernih točaka u programskom paketu. S veličinom rezolucije povezani su osnovni elementi mjerenja, a to su veličina mjernog volumena, udaljenost snimanja, te veličina i broj mjernih točaka. Veća rezolucija omogućit će veću udaljenost snimanja, obuhvaćanje većeg mjernog volumena te postavljanje manjeg broja mjernih točaka. Također će pri snimanju biti potreban manji broj fotografija, što je značajno kod mjerenja objekata velikih dimenzija kao što su sekcije brodskog trupa.

Nedostatak rada s fotoaparatima najveće rezolucije je memorijska veličina fotografija. Veća rezolucija fotografija zahtjeva veći kapacitet memorijske kartice, a kada je njen kapacitet nedovoljan potrebno je češće prebacivati fotografije u prijenosno računalo

što usporava mjerenje. Kapacitet memorijske kartice spada u jedan od ključnih stvari za brzo i uspješno mjerenje, pa se sugerira rad sa što većim karticama. Memorijska veličina fotografija i njihov broj utjecat će na brzinu obrade fotografija.

U standardnu opremu, pored fotoaparata, spada i bljeskalica koja se po potrebi koristi kod snimanja pri slabijem osvjetljenju.

- **Prijenosno računalo**

Prijenosno računalo se koristi za pohranjivanje i obradu fotografija i računanje mjernog rezultata te je poželjno korištenje računala jačih procesora i veće radne memorije. Obrada fotografija, te računanje mjernog rezultata obavlja se u programskom paketu. U trenutku mjerenja s fotogrametrijskim sustavom korištena je verzija programskog paketa TRITOP-V5.3 (GOMmbH, Braunschweig, Njemačka).

- **Mjerne motke**

Mjerne motke se postavljaju pored mjernog objekta u postupku mjerenja da bi se u obradi fotografija i u proračunu objektnih koordinata točaka definiralo mjerilo mjernog projekta, te dobili točni odnosi među mjernim točkama.

Mjerne motke mogu biti čelične, invar ili kompozitne izvedbe, a karakteristika im je da je udaljenost između mjernih točaka koje se nalaze na krajevima motke definirana i konstantna. Postoje izvedbe mjernih motki s kodiranim i nekodiranim mjernim točkama, a uglavnom su u upotrebi mjerne motke s kodiranim točkama, jer se takve točke automatski prepoznaju u programskom paketu.

- **Mjerne točke**

Nužan uvjet za pouzdano mjerenje fotogrametrijskim sustavom je postojanje mjernih točaka na mjernom objektu s izrazitim kontrastom. Radi toga se postavljaju bijele točke na crnoj podlozi ili crne točke na bijeloj podlozi.

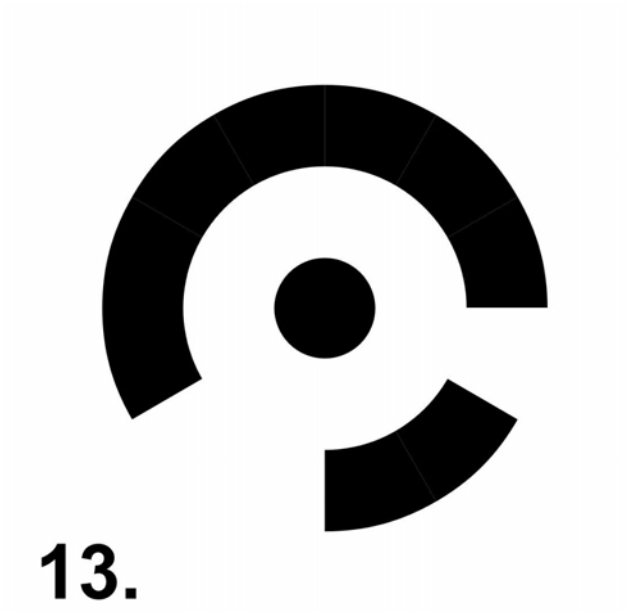
Mjerne točke, prikazane slikama 38 i 39 dijele se prema vrsti na kodirane i nekodirane. Kodirane točke prepoznaju se u programskom paketu prema definiranom bar kodu, a služe za određivanje položaja fotoaparata u prostoru. Za programski paket priređeni su setovi od 100, 300 i 420 kodiranih točaka. Set od 300 točaka numeriran je od broja 0 do 299.

Nekodirane točke čiji položaj treba odrediti postavljaju se na karakteristična mjesta objekta. Poziciju nekodiranih točaka programski paket automatski određuje, a mjerna točka dobije svoj identifikacijski broj, što kasnije omogućuje jednostavniju analizu rezultata te

rekonstrukciju karakterističnih linija, rubova ili provrta. Uobičajno je da je veličina nekodiranih točaka jednaka veličini kodiranih.

Prilikom mjerenja fotogrametrijskim sustavom najčešće se koriste samoljepljive kodirane i nekodirane bijele točke na crnoj podlozi koje se lijepe na objekt. Pri tome se pazi na stanje površine objekta, da ne bi došlo do odljepljivanja točke od podloge.

Osim samoljepljivih točaka u upotrebi su i magnetne točke, pogodne za čelične konstrukcije, jer se lako postavljaju, postojane su, a nakon mjerenja jednostavno se uklanjaju bez utjecaja na površinu objekta. Za razliku od samoljepljivih točaka koje se nalaze na samoj površini objekta magnetne mjerne točke imaju svoju debljinu, pa je pri analizi rezultata to potrebno kompenzirati.



Slika 38: Kodirana mjerna točka



Slika 39: Nekodirana mjerna točka

Mjerenja objekata u zatvorenim prostorima slabijeg osvjetljenja mogu se provoditi korištenjem retro reflektivnih točaka koje omogućju izraziti kontrast točke i podloge i pri nepovoljnijim uvjetima snimanja.

U upotrebi su također čvrste točke kod kojih se mjerna točka nalazi u metalnom držaču. Čvrste mjerne točke izrađuju se u različitim veličinama te u izvedbama koje mogu biti ravne, položene pod kutem od 45º, okomite te sferičnog oblika, što je prikazano slikom 44. Kod analize rezultata mjerenja potrebno je uzeti u obzir geometriju mjerne točke.



Slika 40: Čvrste mjerne točke (ravna, pod kutem 45º, okomita i sferična)

3.3.1. Uvjeti korištenja

Da bi mjerenje uspjelo te da bi se u programskom paketu dobili pouzdani i precizni rezultati moraju biti ispunjeni slijedeći uvjeti kojih se mjeritelj mora pridržavati pri planiranju i izvođenju mjerenja:

- Mjerne točke postavljaju se na vidljiva mjesta, a na svakoj fotografiji mora se vidjeti najmanje 5 kodiranih točaka.
- Promjer mjerne točke na fotografiji mora biti najmanje 10 pixela.
- Fotografije moraju biti jasne i oštre, jer se mjerne točke u programskom paketu pronalaze isključivo na osnovu izrazitog kontrasta. Pri tom se zahtjeva mirna ruka mjeritelja.
- Svaka postavljena nekodirana točka mora se vidjeti na najmanje 3 fotografije da bi se točno odredio njen položaj u prostoru.
- Za vrijeme snimanja ne smiju se mijenjati postavke aparata kao što su otvor blende i brzina zatvarača. Potrebno je zaštititi fotoaparat od namjernih ili slučajno izazvanih promjena postavki.
- Prije snimanja svake grupe fotografija potrebno je napraviti 4 kalibracijske fotografije pomoću kojih će se definirati parametri kompenzacije distorzije objektiva. Pri tome grupa fotografija znači snimljen broj fotografija s kojim se napuni memorijska kartica fotoaparata kada treba fotografije prebaciti na prijenosno računalo.
- Kod snimanja objekata većih dimenzija fotografije se moraju preklapati da bi se mogle u programskom paketu povezati u jednu cjelinu te snimanje treba obaviti iz različitih položaja, kuteva i visina.
- Prije obrade fotografija u programskom paketu potrebno je paziti na korektan unos ulaznih parametara snimanja.

3.3.2. Osnovne operacije programa

Programski paket priređen je za rad na osobnom ili prijenosnom računalu pod operativnim sustavom LINUX.

Prije obrade fotografija i proračuna položaja mjernih točaka u programskom paketu potrebno je obaviti niz pripremnih aktivnosti, a to su:

- **Kreiranje novog projekta**.

Kreiranje novog projekta obuhvaća otvaranje direktorija u koji će se spremati dokumenti. Također, potrebno je definirati način prebacivanja fotografija u računalo, a to je najčešće prebacivanje s memorijske kartice fotoaparata na tvrdi disk računala. Opcije koje treba uključiti u ovoj fazi su mogućnost konvertiranja kolor fotografije u crno – bijelu da bi se ubrzala obrada fotografija, automatsko prepoznavanje bar koda kodiranih točaka te automatsko računanje objektnih koordinata mjernih točaka.

- **Definiranje kamere i parametara obrade fotografija**

Kod kamere definira se tip digitalnog fotoaparata te žarišna duljina objektiva. Uz to, definiraju se parametri obrade fotografije koji će biti kriterij pronalaženja mjernih točaka. Definiraju se minimalni radijus elipse mjerne točke u pixelima, te kvaliteta elipse. Ovim parametrima utječe se na broj pronađenih mjernih točaka na fotografiji.

Ako se objekt snima s fotoaparatom veće rezolucije može se postaviti veći radijus elipse za traženje mjerne točke, a ako se radi s fotoaparatom manje rezolucije zadani radijus elipse mora biti manji.

Za zadanu manju veličinu radijusa elipse u programskom paketu će se pronaći veći broj mjernih točaka. U tom slučaju postoji opasnost da se detalji iz okoline koji nisu mjerna točka, a imaju oblik elipse, ipak proglase mjernom točkom, jer zadovoljavaju kriterij definiranja mjerne točke. Time se mogu nagomilati nepotrebni podaci u analizi rezultata.

Zadana veća kvaliteta elipse može rezultirati pronalaženjem manjeg broja mjernih točaka što će također ograničiti mogućnosti analize rezultata, jer se iz analize mogu izostaviti i neke mjerne točke čiji je položaj na fotografiji nepovoljniji.

U programskom paketu postoje dva operativna modula:

- **Modul za obradu fotografija i proračun rezultata mjerenja**

U modulu za obradu fotografija obavlja se traženje mjernih točaka na svakoj fotografiji na osnovi kontrasta. Kako u većini slučajeva projekcija mjerne točke na fotografiji nije kružnica nego elipsa, obrada fotografija u programskom paketu svodi se na

traženje elipse tj. potencijalne mjerne točke. Oblik svake pronađene elipse uspoređuje se s matematički definiranom elipsom te se ocjenjuje kvaliteta. Kvaliteta elipse je odstupanje izračunate matematičke elipse od oblika pronađenog na slici. Ako su odstupanja veća od dozvoljenih, pronađena elipsa neće biti definirana kao mjerna točka, a ako se oblici podudaraju, elipsa se definira kao mjerna točka i definira se središte elipse. Pronađene kodirane mjerne točke označavaju se zelenim identifikacijskim brojem, dok se nekodirane mjerne točke označavaju crvenim rednim brojem dok se fotografije u modulu za računanje ne povežu u cjelinu i svaka od nekodiranih točaka zauzme položaj u prostoru.

Nakon analize fotografija i pronalaska mjernih točaka slijedi proračun rezultata mjerenja. Najprije je potrebno sve fotografije povezati u jednu cjelinu i orjentirati u prostoru. Pri tome se uzimaju u obzir osnovni zahtjevi u radu s programskim paketom, definirani u poglavlju 3.3.1. Prema zadanim kriterijima svaka od kodiranih i nekodiranih mjernih točaka dobija svoj status prikazan u tablici 3.

Tablica 3: Status mjernih točaka

STATUS MJERNIH TOČAKA	KODIRANA MJERNA TOČKA	NEKODIRANA MJERNA TOČKA
	Objektna mjerna točka koja je zadovoljila sve kriterije	Objektna mjerna točka koja je zadovoljila sve kriterije
	Objektna mjerna točka koja se ne nalazi na najmanje 5 fotografija	Mjerna točka pronađena na dvije fotografije, nije zadovoljila uvjet da se nalazi na tri fotografije
	Mjerna točka čije je odstupanje veće od zadanih vrijednosti. Koordinate točke su neprecizne.	

Mjerna točka ima pozitivan status kada ispuni sve kriterije i zahtjeve. Nepovoljan status mjerne točke može se promjeniti dodavanjem novih fotografija u fazu obrade dodatnim snimanjem onog dijela objekta na kojem se nalaze mjerne točke s nepovoljnim statusom. Kada se fotografije obrađuju paralelno sa snimanjem objekta moguće je na samom mjerenju uočiti koji dio objekta nije dovoljno dobro snimljen te ga treba dodatno snimiti. Tada se u programskom paketu obrađuje grupa fotografija napravljena u prvom setu snimanja, a dodatne fotografije se pohranjuju zajedno s postojećom grupom te ulaze ravnopravno u analizu. Kada je potrebno dodavati nove fotografije treba paziti da se snimanje radi s istim parametrima fotoaparata, mada u programskom paketu postoji mogućnost obrade fotografija napravljenih različitim kamerama i parametrima objektiva u zajedničkom projektu.

Ako nisu poštivani svi zahtjevi definirani točkom 3.3.1. fotografija neće proći automatsku obradu i orjentaciju u prostoru. Automatsko neprepoznavanje mjernih točaka može biti uzrokovano manjom rezolucijom fotografije ili djelomičnom prikrivenošću mjernih točaka okolnim predmetima. Također, uzrok može biti osvjetljenje pri kojem mjerne točke u odnosu na okolinu imaju nedovoljan kontrast. Tada je moguće u programskom paketu intervenirati ručno tj. definirati položaj mjernih točaka prema položaju na drugim fotografijama. Pri tome treba biti oprezan da se ne potkrade pogreška koja će utjecati na mjerni rezultat. Ovakav način rada iziskuje vrijeme, jer je potrebno na svim neorjentiranim fotografijama ručno povezati mjerne točke da bi postale dio mjernog rezultata.

- **Modul za analizu i prikazivanje rezultata mjerenja**

Nakon proračuna slijedi analiza i prikazivanje rezultata mjerenja. U programskom paketu je prema zadatku mjerenja moguće konstruirati linije i plohe kroz mjerne točke, definirati položaj koordinatnog sustava, preklapati rezultate mjerenja u zajednički koordinatni sustav, mjeriti odstupanja i pripremati izvještaje o kontroli dimenzija i oblika.

Izgled ekrana programskog paketa prikazan je slikom 41, a sastoji se od trake s alatima i 5 odvojenih prozora na kojima se nalaze:

1) **Mjerni rezultat**

U prozoru mjernog rezultata prikazani su prostorni položaji mjernih točaka i fotoaparata kod snimanja mjernog objekta.

2) **Struktura projekta**

U drugom prozoru prikazana je struktura mjerenja. Struktura mjerenja u programskom paketu ima razgranatu formu, a sastoji se od direktorija u koje se spremaju snimljene fotografije. Nakon obrade u programskom paketu, svaka od fotografija dobije ocjenu da li je zadovoljila sve zahtjeve postupka. Fotografije s nepovoljnim statusom mogu se izostaviti iz proračuna rezultata mjerenja. Osim snimljenih fotografija u direktorije strukture mjerenja spremaju se elementi mjerenja, linije ili plohe konstruirane iz oblaka mjernih točaka.

3) **Info prozor**

U info prozoru dani su podaci o broju snimljenih fotografija te o broju i tipu mjernih točaka i elemenata mjerenja.

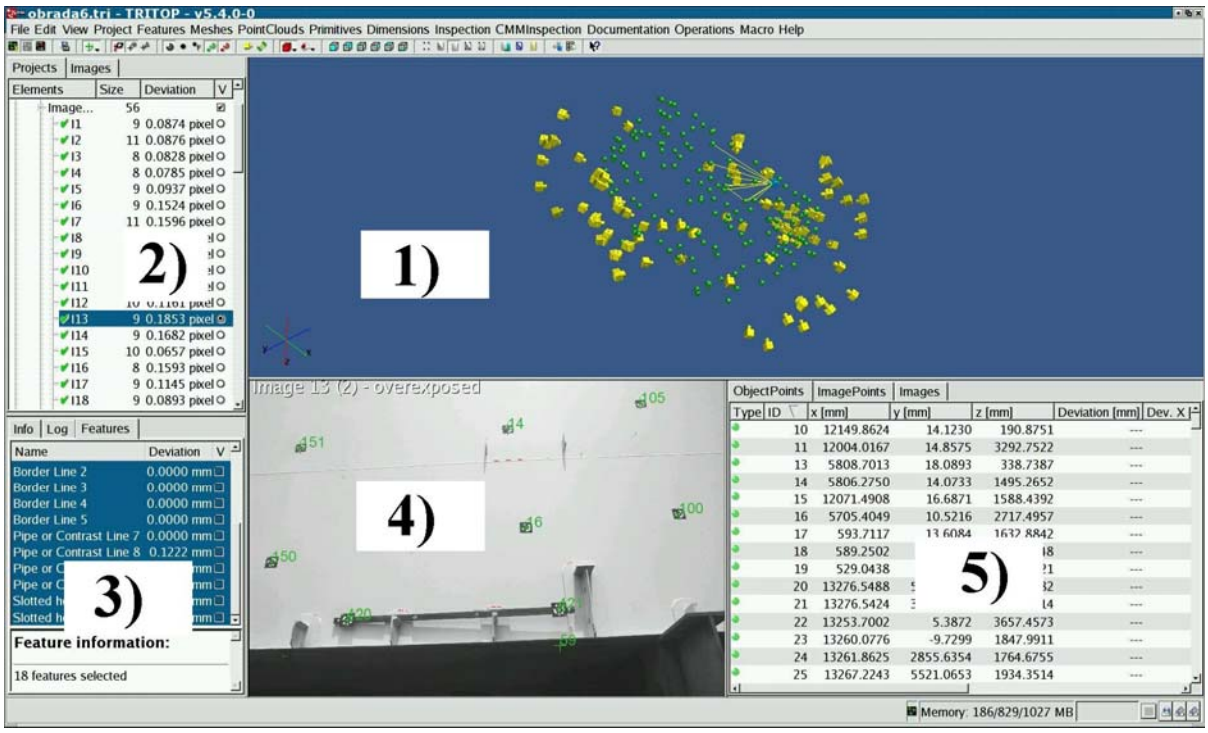
4) Fotografija

U ovom prozoru prikazuje se snimljena fotografija s označenim položajem pronađenih mjernih točaka. Koristi se kada treba nešto dodatno na fotografiji analizirati ili provjeriti detalje.

5) Lista mjernih točaka

Prozor liste mjernih točaka povezan je s prozorom fotografije. U prozoru liste mjernih točaka nalaze se podaci o mjernim točkama koje se nalaze na promatranoj fotografiji kao što je identifikacijski brojevi te položaji točaka u lokalnom koordinatnom sustavu.

Izgled ekrana jednak je za oba operativna modula, a razlikuju se pojedine opcije prema namjeni.



Slika 41: Izgled ekrana programskog paketa

3.4. Postupak mjerenja

Postupak mjerenja fotogrametrijskim sustavom bez obzira na dimenzije mjernog objekta provodi se u 6 koraka, a to su:

- Zadatak mjerenja i strategija snimanja
- Postavljanje mjernih točaka i mjernih motki
- Priprema fotoaparata

- Snimanje
- Obrada fotografija
- Analiza rezultata

3.4.1. Zadatak mjerenja i strategija snimanja

U prvom koraku određuje se mjerni objekt te se definiraju zadaci mjerenja i strategija snimanja. Zadatkom mjerenja definira se što se na mjernom objektu kontrolira. Strategija snimanja uključuje definiranje položaja mjernih točaka na mjernom objektu, a usko je vezana uz definirani zadatak mjerenja.

Osim prema zadatku mjerenja, veličina i broj mjernih točaka određuju se prema dostupnosti mjernog objekta tj. slobodnom prostoru oko njega. Udaljenost snimatelja od objekta određuje veličinu mjernog volumena tj. dio mjernog objekta koji može stati na jednu fotografiju.

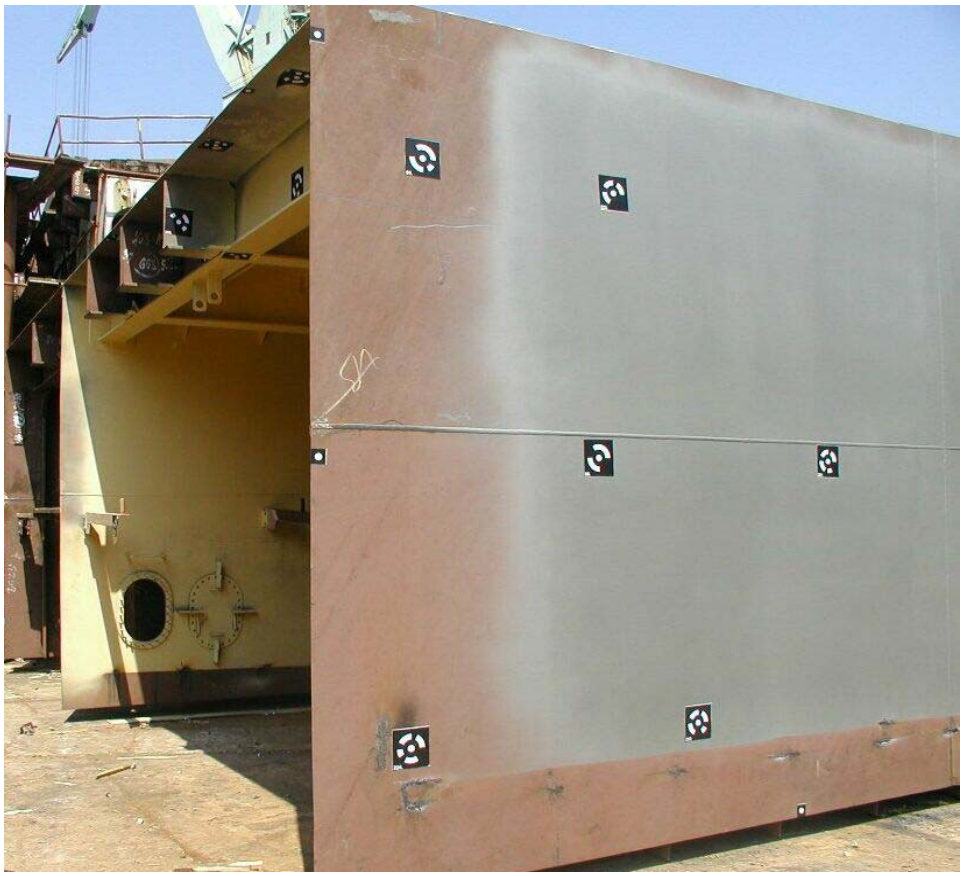
Ako je prostor oko mjernog objekta skučen, snimanje će se obavljati s manje udaljenosti, te će se obuhvatiti manji mjerni volumen. U tom slučaju potrebno je postaviti veći broj mjernih točaka te treba napraviti i veći broj fotografija. Prema iskustvu s mjerenja mala udaljenost od mjernog objekta iznosi do 5m. Kada je udaljenost snimatelja od mjernog objekta veća od 5 m može se snimanjem obuhvatiti veći mjerni volumen, te se na objekt može postaviti manji broj mjernih točaka većeg promjera.

Mjerenja fotogrametrijskim sustavom u brodogradnji pokazala su da je najbolje koristiti mjerne točke promjera 30 mm čija je veličina dovoljna za automatsko prepoznavanje u programskom paketu.

3.4.2. Postavljanje mjernih točaka i mjernih motki

Na mjerni objekt postavljaju se kodirane i nekodirane mjerne točke koje se moraju pravilno rasporediti po svim ravninama i rubovima objekta prema definiranoj strategiji snimanja. Nužan uvjet koji mora biti ispunjen prilikom postavljanja kodiranih mjernih točaka na mjerni objekt je da se na svakoj fotografiji vidi barem 5 kodiranih mjernih točaka. Na mjerni objekt postavljaju se također i mjerne motke radi definiranja mjerila objekta kod proračuna rezultata mjerenja u programskom paketu.

Način postavljanja prikazan je primjerom na slici 42. U ovom primjeru, nekodirane mjerne točke postavljene su na rubove, a kodirane mjerne točke na ravne i zakrivljene površine mjernog objekta.



Slika 42: Postavljanje kodiranih i nekodiranih mjernih točaka na mjerni objekt

3.4.3. Priprema fotoaparata

Ovaj korak uključuje postavljanje i prilagođavanje parametara fotoaparata uvjetima snimanja. Definiraju se parametri fotoaparata kao što su otvor blende, ekspozicija i žarišna udaljenost objektiva. Kod snimanja objekata fotogrametrijskim sustavom koristi se ručno namještanje parametara otvora blende i fokusa objektiva, jer vrijednosti moraju biti konstantne tokom cijelog snimanja.

U radu s fotogrametrijskim sustavom koristi se širokokutni objektiv. Njegova je karakteristika manja udaljenost fokusa od leće, širi kut gledanja i veća dubinska oštrina u odnosu na normalni objektiv. Žarišna udaljenost širokokutnih objektiva ne prelazi 35 mm, a kut gledanja iznosi oko 65°, što je za 15-20° više nego kod uobičajnih objektiva. Dubinska oštrina polja je prostor ispred i iza polja kritičnog fokusa u kojem je fotografija oštra, a oštrina fotografije je ključna za automatsku obradu fotografija i točniji mjerni rezultat.

Za udaljenosti snimanja u brodograđevnom procesu koja iznose oko 10 m korištenjem širokokutnog objektiva objekti će na fotografijama biti oštri u dubini od 16 m.

Otvor blende objektiva propušta svjetlost na film ili čip fotoaparata. Veličina otvora blende definira se jednom od vrijednosti F brojeva čiji je niz:

0.7 1 1.4 2 2.8 4 5 6 8 11 16 22

Što je F broj manji otvor blende objektiva je veći i propušta veću količinu svjetlosti. Svaki slijedeći susjedni veći F broj propušta dvostruko manju količinu svjetla na film ili čip fotoaparata.

Otvor blende objektiva povezan je s brzinom zatvarača fotoaparata. Zatvarač je mehanizam ugrađen u tijelo fotoaparata. Postavljen je ispred filma ili čipa, a služi za propuštanje svjetlosti na film ili čip. Kada se okidač na fotoaparatu pritisne zatvarač se otvara i propušta svjetlost određeno vrijeme koje predstavlja vrijeme izlaganja filma ili čipa svijetlosti. Brzina zatvarača označava se brojevima u nizu:

B 1 2 4 8 15 30 60 125 250 500 1000

Brojevi predstavljaju dijelove sekunde izlaganja filma ili čipa svjetlosti. Primjera radi, brzina zatvarača 60 znači da se film ili čip izlaže svjetlosti 1/60 s. Veličina B u nizu označava BULB način rada kada je zatvarač otvoren i propušta svjetlost sve dokle se okidač drži pritisnut. Korištenjem većih brzina zatvarača smanjuje se vjerojatnost da fotografija ostane mutna radi pomicanja fotoaparata ili objekta snimanja.

Pojam EKSPOZICIJA obuhvaća kombinaciju vrijednosti brojeva u nizu koje mogu imati otvor blende i brzina zatvarača. Ekspozicija može biti automatska i ručna.

Karakteristika automatske ekspozicije je da se vrijednosti otvora blende i brzine zatvarača automatski postavljaju u fotoaparatu prema količini svjetla izmjerenoj na fotoosjetljivoj čeliji.

Kada se snimanje provodi u zatvorenom prostoru sa slabim osvjetljenjem koristi se bljeskalica ili dodatno osvjetljenje. Razlikuju se dva tipa bljeskalica, a to su:

- **Unutrašnja bljeskalica**

Ovaj tip bljeskalica nalazi se unutar fotoaparata i ne mogu se od njega odvojiti. Njihova karakteristika je da se uključuju automatski, malih su dimenzija, a domet im je približno 5m.

- **Vanjska bljeskalica**

Ovaj tip bljeskalice priključuje se na fotoaparat kablovima ili konektorima. U odnosu na unutrašnje bljeskalice većih su dimenzija te daju mnogo više svjetla. Kod vanjskih

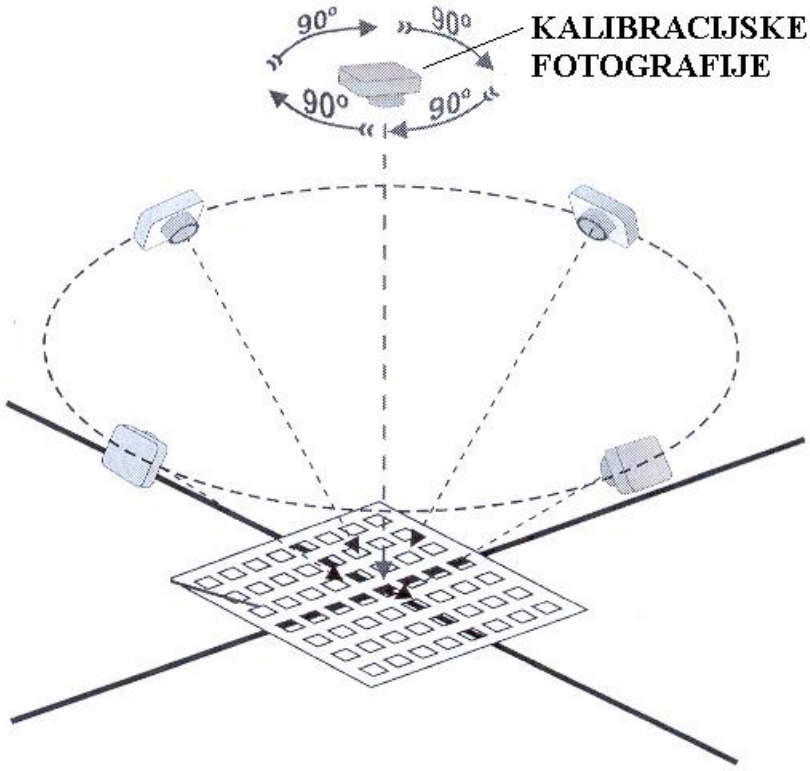
bljeskalica pogodno je također što je glava bljeskalice okretna, pa se svijetlo može različito usmjeriti.

3.4.4. Snimanje

Mjerni se objekt fotografira s odabranih pozicija u skladu s zahtjevima primjene fotogrametrijske metode. Objekt je potrebno obići i fotografijama pokriti sve položaje mjernih točaka. Broj fotografija koje treba napraviti ovisan je o veličini i obliku mjernog objekta. Prema veličini i obliku mjernog objekta postupak snimanja može se razvrstati u tri grupe:

1. Snimanje plosnatih mjernih objekata
2. Snimanje manjih volumenskih objekata
3. Snimanje volumenskih objekata većih dimenzija preklapanjem

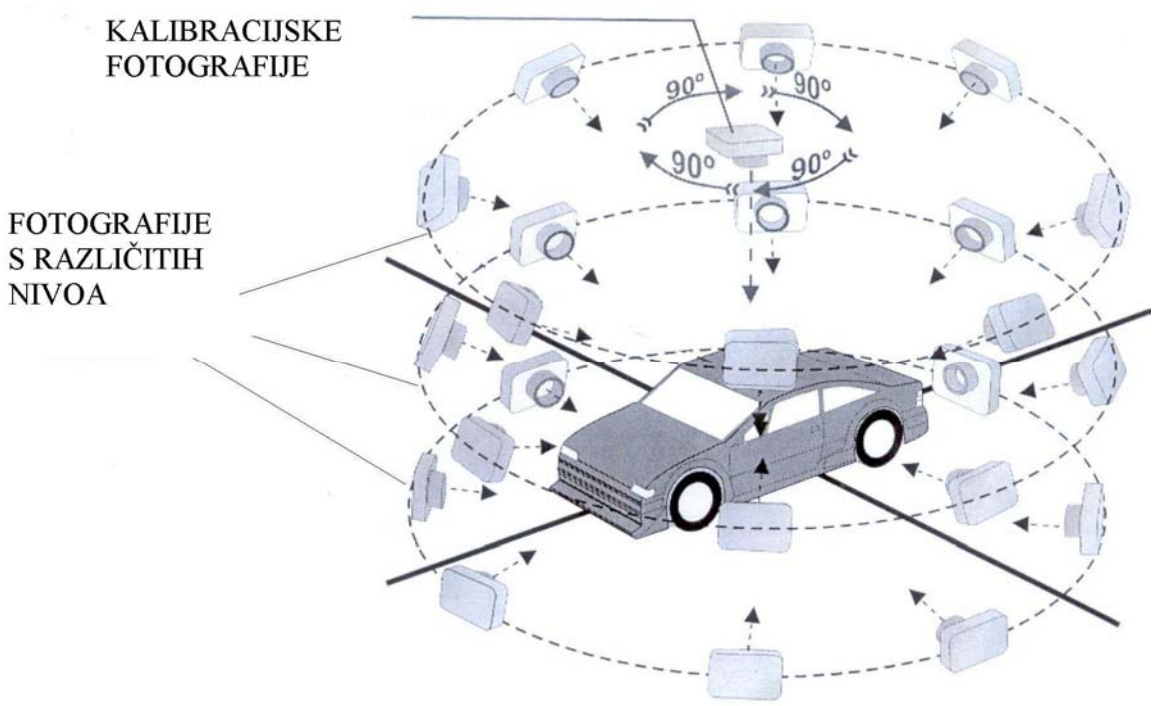
Ad 1) Snimanje plosnatih mjernih objekata čije su dimenzije takve da cijeli objekt stane na jednu fotografiju obavlja se s minimalnim brojem od osam fotografija na kojima će se pronaći sve postavljene mjerne točke. Od tih osam fotografija, kako je ilustracijom prikazano na slici 43, prve četiri se rade iz sredine, a zovu se kalibracijske fotografije.



Slika 43: Postupak snimanja ravnih objekata

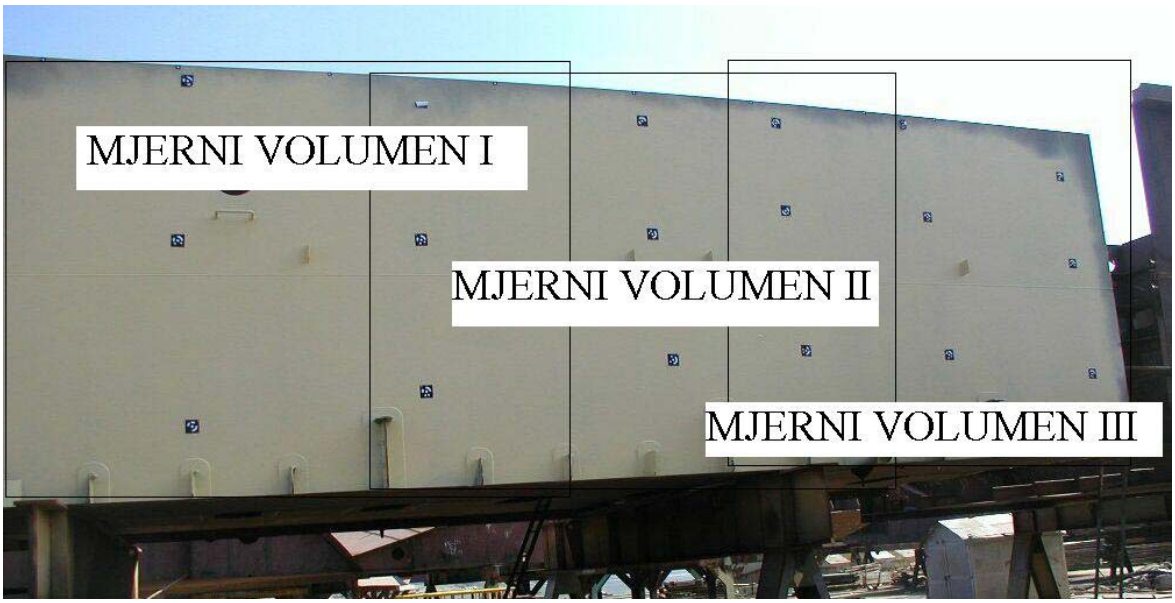
Kalibracijske fotografije služe za određivanje parametara distorzije objektiva. Slijedeće četiri fotografije služe za proračun objektnih koordinata mjernih točaka, a snimaju se sa sve četiri strane objekta da bi rezultati mjerenja bili što točniji.

Ad 2) Geometrijske karakteristike manjih volumenskih objekata su takve da cijeli stanu na jednu fotografiju. Početak snimanja je isti kao i za ravne objekte. Najprije se rade četiri kalibracijske fotografije, a zatim se snimanje obavlja iz više različitih pogleda i visina snimanja tako da se pokrije cijeli mjerni objekt kako je prikazano primjerom na slici 44. Kod snimanja volumenskih objekata bitno je povezati mjerne točke koje se nalaze na različitim ravninama u jednu cjelinu. Da bi se mjerni projekt zatvorio i da bi se dobili precizniji mjerni rezultati mjerne točke se postavljaju i na pozicije koje nisu interesantne za mjerenje.



Slika 44: Postupak snimanja manjih volumenskih objekata

Ad 3) Snimanje volumenskih objekata većih dimenzija karakteristično je za brodograđevni proizvodni proces. Dimenzije objekata su takve da ne mogu stati na jednu fotografiju, pa je potrebno snimati preklapanjem koje je prikazano slikom 45 na primjeru uzdužne pregrade sekcije trupa.

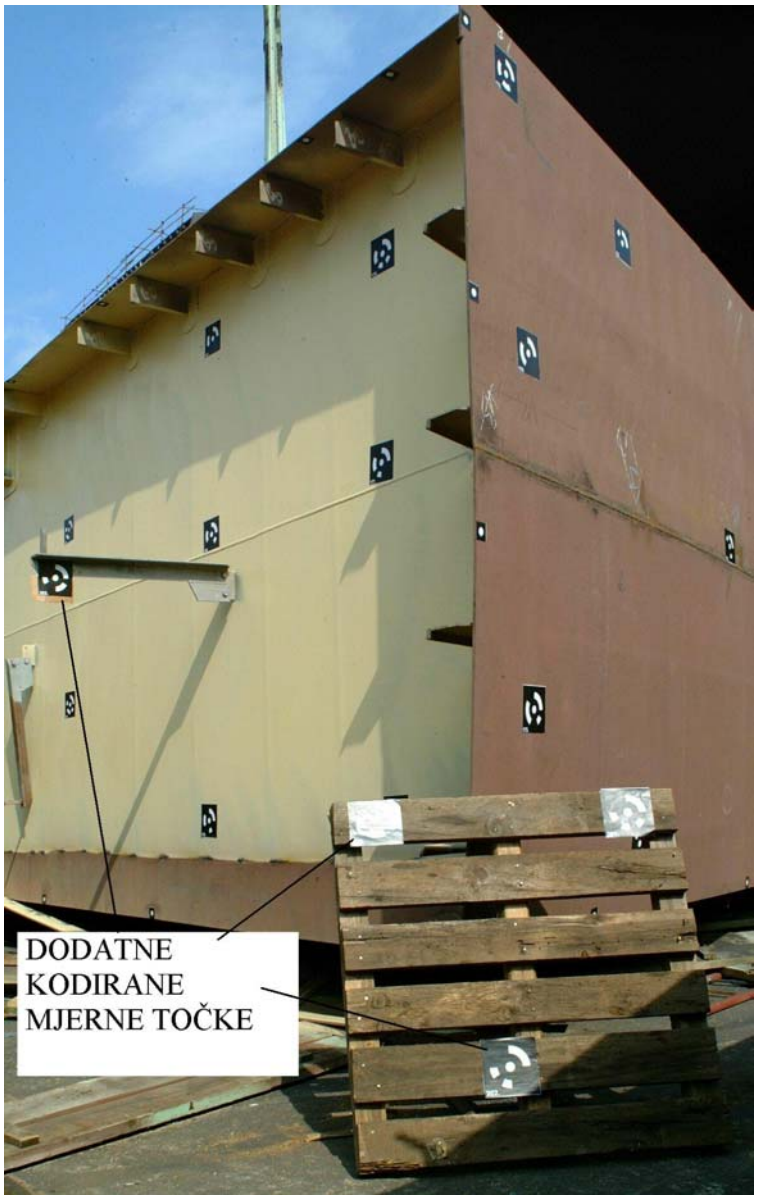


Slika 45: Postupak snimanja volumenskih objekata s preklapanjem

Svaki mjerni volumen potrebno je snimiti iz različitih kuteva i različitih visina snimanja, a preklopljene fotografije u programu će se povezati u jednu cjelinu. Takav način rada zahtijeva veći broj fotografija te snimanje više grupa fotografija koje će se pohraniti u prijenosno računalo i obraditi kao cjelina u zajedničkom projektu. Grupa fotografija sadrži fotografije u slijedu ili nizu, a popunjava kapacitet jedne memorijske kartice fotoaparata. Prije snimanja svake pojedine grupe fotografija potrebno je napraviti četiri kalibracijske fotografije.

Dodatni zahtjev kod snimanja volumenskih objekata je povezivanje mjernih točaka koje se nalaze u različitim ravninama u jednu cjelinu. Kada ravnine zatvaraju šiljasti kut poželjno je uokolo objekta postaviti dodatne mjerne točke koje će olakšati povezivanje što je primjerom prikazano na slici 46.

Karakteristični primjeri šiljastog kuta između strukturnih elemenata brodskog trupa su poprečna pregrada i vanjska oplata u pramčanom i krmenom dijelu broda, zatim paluba ili platforma u strojarnici i vanjska oplata na boku. Kod ovih primjera postoji opasnost da se iz jednog kuta snimanja ne vide mjerne točke na obje ravnine ili veličina projekcije mjernih točaka nije dovoljno velika za obradu u programskom paketu. Postavljanjem dodatnih točaka omogućava se postupan prijelaz s jedne na drugu ravninu, a preporuka je da se na prijelazima uz rub ravnina stavi veći broj kodiranih točaka.

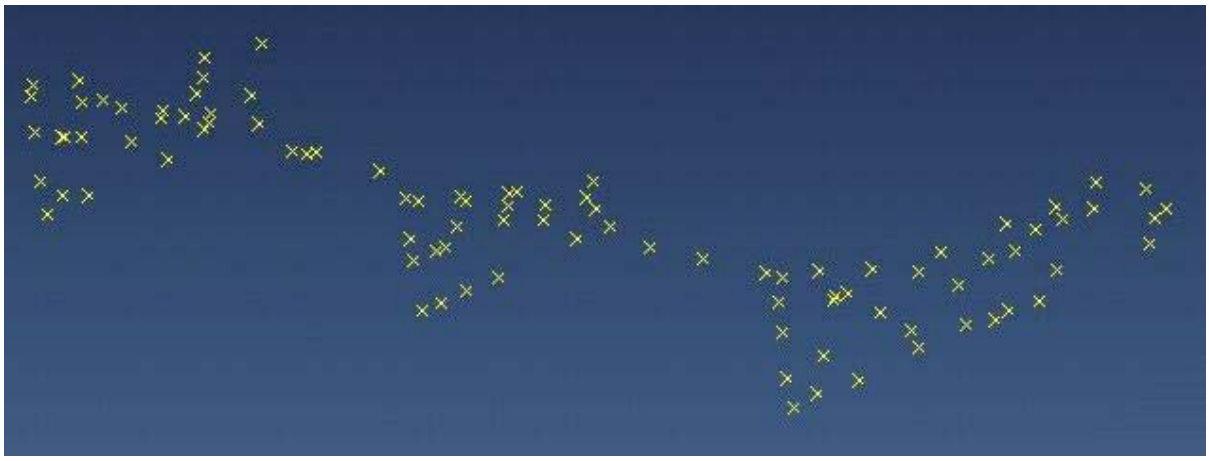


Slika 46: Postavljanje dodatnih mjernih točaka

3.4.5. Obrada fotografija

Obrada fotografija i proračun objektnih koordinata obavlja se u modulima za obradu, proračun, analizu i prikazivanje rezultata mjerenja programskog paketa. Postupak je detaljnije opisan u poglavlju 3.3.1.

Rezultat obrade fotografija i proračuna je oblak mjernih točaka prikazan primjerom na slici 49 ili tekstualna datoteka o mjernim točkama koja sadrži identifikacijsko ime i položaj prostornih koordinata. Na slici 47 prikazan je oblak kodiranih i nekodiranih mjernih točaka postavljenih uz rub opločenja i na okvirne sponje sekcije palube.



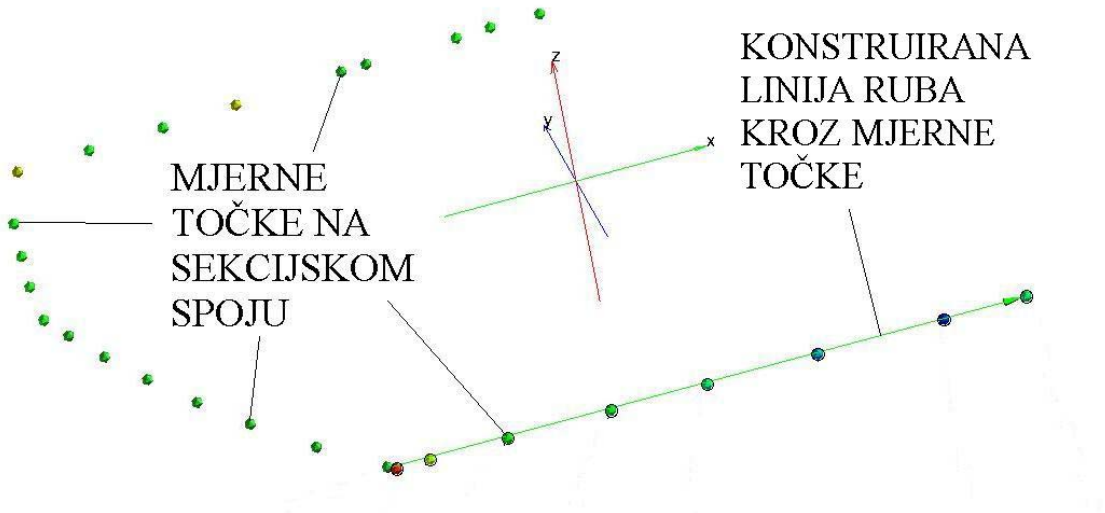
Slika 47: Oblak mjernih točaka sekcije palube

3.4.6. Analiza rezultata

Završni dio fotogrametrijskog mjerenja mjernog objekta je analiza rezultata mjerenja koja zahtjeva pripremu, a priprema obuhvaća konstruiranje elemenata mjerenja tj. referentnih linija i ploha, mjerenje odstupanja te prikazivanje rezultata mjerenja.

- **Konstrukcija elemenata mjerenja i mjerenje odstupanja**

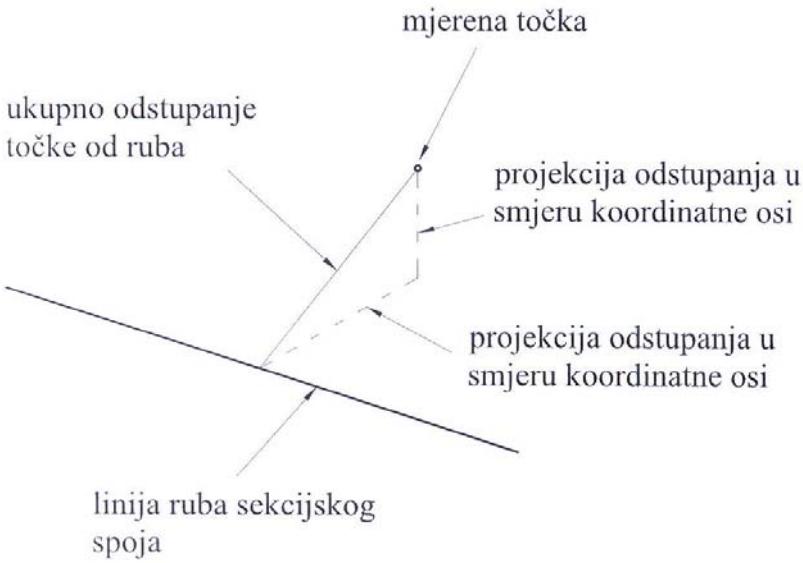
Kada se kao rezultat obrade i proračuna dobije oblak mjernih točaka potrebno je izdvojiti mjerne točke kroz koje se konstruiraju elementi mjerenja tj. linije ili plohe bitne za prikaz i analizu rezultata kao što je primjerom prikazano na slici 48. Na slici su izdvojene mjerne točke sekcijskog spoja na brodu, te je kroz mjerne točke konstruiran rub krmenog zrcala.



Slika 48: Izdvojene mjerne točke i konstrukcija elementa mjerenja

U programskom paketu elementi mjerenja konstruiraju se metodom najmanjih kvadratnih odstupanja, gdje se kroz zadane mjerne točke aproksimativno provlači linija ili ravnina. Točnost aproksimacije ocjenjuje se mjerenjem odstupanja mjernih točaka od konstruiranog elementa. Linije se provlače kroz mjerne točke postavljene uz rub elemenata mjernog objekta, a ravnine se postavljaju kroz mjerne točke postavljene po plohama mjernog objekta. Mjerne točke koje se ne koriste za konstrukciju elemenata mjerenja izostavljaju se s grafičkog prikaza da bi prikaz bio jednostavan i pregledan.

Mjerenje odstupanja u programskom paketu je mjerenje udaljenosti između elemenata mjerenja, a to mogu biti mjerne točke, linije ili plohe. Na primjer, odstupanje mjerne točke od linije je najmanja udaljenost točke od linije. Vrijednost odstupanja se može prikazati kao ukupno odstupanje ili kao projekcija udaljenosti po koordinatnim osima kako je prikazano slikom 49.



Slika 49: Mjerenje udaljenosti točke od linije

- **Prikazivanje rezultata mjerenja**

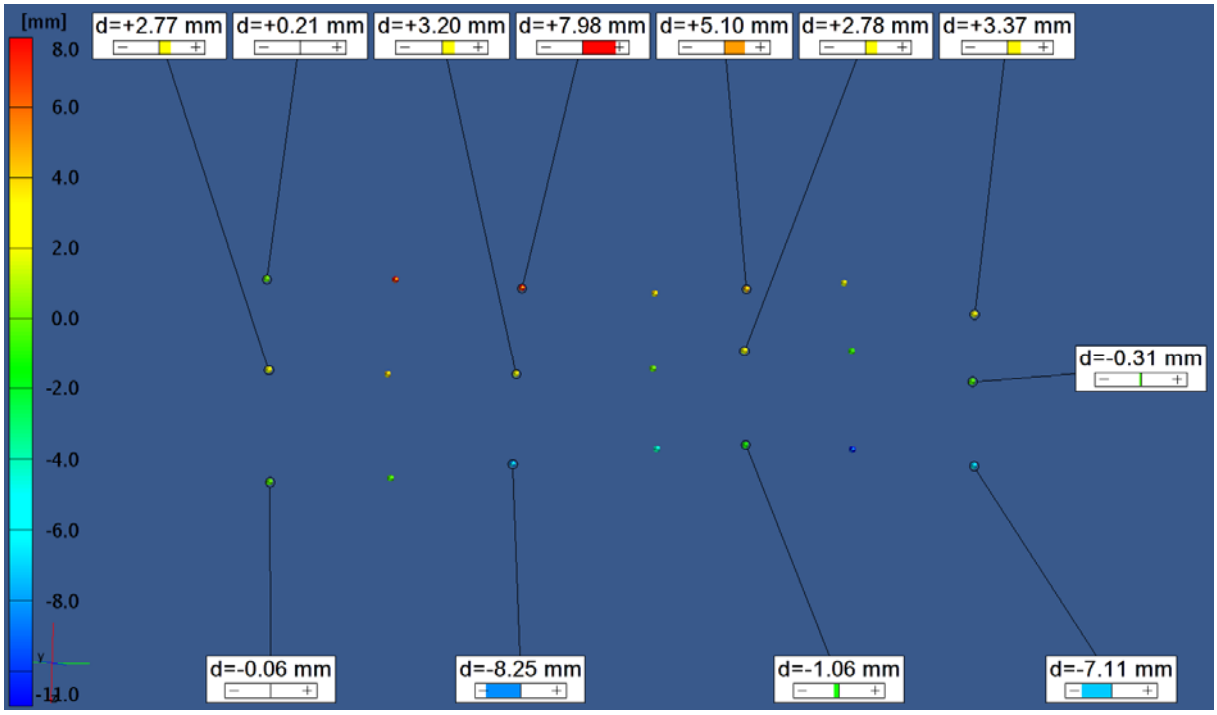
Rezultati mjerenja u programskom paketu mogu se prikazati grafički ili tablično. Grafički prikaz odstupanja uključuje definiranje mjerila odstupanja koje je na slici 50 prikazano stupcem s lijeve strane.

Stupac mjerila odstupanja kreira se spektrom boja na osnovu vrijednosti odstupanja. Najveća pozitivna odstupanja mjernih točaka prikazuju se crvenom bojom, najveća negativna plavom bojom, a vrijednostima koje se nalaze između pridružuje se nijansa zelene ili žute boje. Na taj način zorno se uočavaju zone različitih vrijednosti

odstupanjima. Vrijednosti odstupanja izabranih karakterističnih mjernih točaka mogu se prikazati posebno u kvadratima koji sadržavaju iznos i smjer odstupanja.

Kod preklapanja rezultata mjerenja najzorniji način prikazivanja rezultata je grafički, gdje se jasno vide vrijednosti odstupanja mjernih točaka.

U brodogradnji je zbog definiranog montažnog viška od 30 mm na sekcijskom spoju interesantna vrijednost odstupanja, a ne informacija da li se točka nalazi u nekom tolerancijskom polju.



Slika 50: Primjer grafičkog prikazivanja mjernih rezultata u programskom paketu

Ovisno o kojoj se grupi usporedbe rezultata radi, tablice imaju različite oblike. Primjerom na slici 51 prikazan je izgled tablice mjernih rezultata za usporedbu teorijskih i izmjerenih vrijednosti koordinata mjernih točaka. Ovakav način tabličnog prikaza pogodan je kod kontrole poklapanja mjernog projekta s CAD modelom.

U redovima tablice nalaze se podaci o ukupnom odstupanju te odstupanjima po koordinatnim osima mjernih točaka, a u stupcima su karakteristike mjerenja. Prvi stupac sadrži ime ili redni broj mjerne točke. U drugom i trećem stupcu su teorijska i izmjerena vrijednost koordinata točaka, a u četvrtom i petom su vrijednosti dozvoljenih odstupanja u milimetrima. U šestom stupcu se računa razlika izmjerenih i teoretskih vrijednosti, a u sedmom je ocjena položaja mjerne točke koja može biti dvojaka, a to je da se mjerna točka nalazi unutar ili izvan tolerancijskog pojasa.

TRITOP Results

Picked Surface Points						
Name	**Nominal Coordinate[mm]**	**Measured Coordinate[mm]**	**Tolerance -[mm]**	**Tolerance +[mm]**	**Difference [mm]**	**Tolerance Verify**
Point 1						
General						
X						
Y						
Z						

Slika 51: Izgled tablice mjernih rezultata za usporedbu teorijskih i izmjerenih vrijednosti

Tablični prikaz mjerenja udaljenosti ne zahtjeva stupce teorijskih vrijednosti mjerenja i dozvoljenih odstupanja nego je bitna samo zahtjevana mjera kao što je primjerom prikazano slikom 52.

TRITOP Results

Picked Surface Points			
Name	**MeasuredCoordinate[mm]**	**Difference[mm]**	
Point 1			
General			

Slika 52: Izgled tablice mjernih rezultata za mjerenje udaljenosti

3.5. Razvoj fotogrametrijskog sustava

Sve šira primjena fotogrametrijske metode u industriji donosi nove ideje i puteve razvoja mjerne opreme. Cilj razvojnog tima fotogrametrijskog sustava je ubrzavanje postupka mjerenja bez obzira na veličinu mjernog objekta te efikasnija i brža obrada fotografija u programskom paketu.

U analizi rezultata mjerenja bitna je što jednostavnija i točnija konstrukcija elemenata mjerenja kao što su rubovi ili karakteristični elementi mjernog objekta. Planiranje mjerenja

i dalje ostaje ključni dio postupka u kojem se definiraju ciljevi mjerenja, položaji mjernih točaka i parametri snimanja.

Prikazani su načini kojima bi se moglo utjecati na brzinu postupka mjerenja i konstrukciju elemanta mjerenja:

1. Bežični prijenos fotografija i
2. Korištenje adaptera.

Ad 1) Pokušaj ubrzavanja postupka mjerenja napravljen je uvođenjem bežičnog prijenosa fotografija iz fotoaparata u prijenosno računalo tokom snimanja. Dio uređaja, prikazan na slici 53, priključen je na fotoaparat, služi za pohranjivanje i transfer fotografija. Drugi dio uređaja je prijemna stanica s antenom.



Slika 53: Uređaj za bežični prijenos snimljenih fotografija

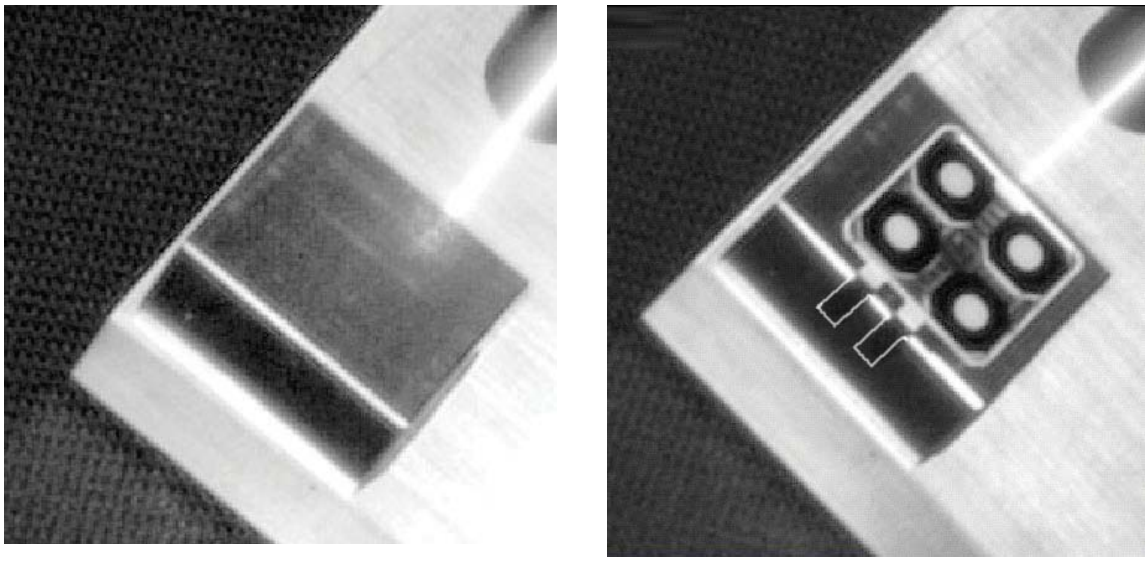
Prijemna stanica je spojena na prijenosno računalo, a služi za primanje fotografija i prijenos u programski paket. Efikasan prijenos fotografija moguć je kada je mjeritelj udaljen od prijemne stanice najviše 20 m. Osim uvođenja samog uređaja u fotogrametrijski sustav potrebno je unutar programskog paketa softverski riješiti način prijenosa fotografija. Postupak prijenosa fotografija je automatski, a započinje nakon snimanja grupe od 8

fotografija. Nužno je da je programski paket pokrenut i da je u njemu formiran novi projekt u kojem nakon prihvaćanja fotografija započinje obrada fotografija, pronalaženje mjernih točaka i njihovo orjentiranje u prostoru. Korištenjem bežičnog načina prijenosa fotografija vrijeme snimanja i obrade fotografija se preklapa čime se postupak mjerenja znatno ubrzava. Prednost istovremenog snimanja i obrade fotografija je mogućnost kontrole rezultata i intervencije kada je to potrebno. U slučaju da jedan dio mjernog objekta nije dovoljno pokriven fotografijama, u programskom paketu se signalizira nedostatak, te se u programski paket dodaje nova grupa fotografija. Ovakav način rada pogodan je za mjerenje objekata velikih dimenzija koje zahtjevaju veliki broj fotografija, te češće prebacivanje fotografija u prijenosno računalo. Kapacitet kartice fotoaparata više nije ograničavajući faktor.

Ad 2) Efikasnija i točnija konstrukcija rubova i karakterističnih elemenata mjerenja može se napraviti uz korištenje posebno dizajniranih adaptera koji se automatski prepoznaju u programskom paketu. Adapteri su u pravilu formirani od više nekodiranih mjernih točaka. Programski paket ih na mjernom objektu prepoznaje po poznatom rasporedu mjernih točaka. Moguće je postavljanje većeg broja adaptera istog tipa na mjerni objekt.

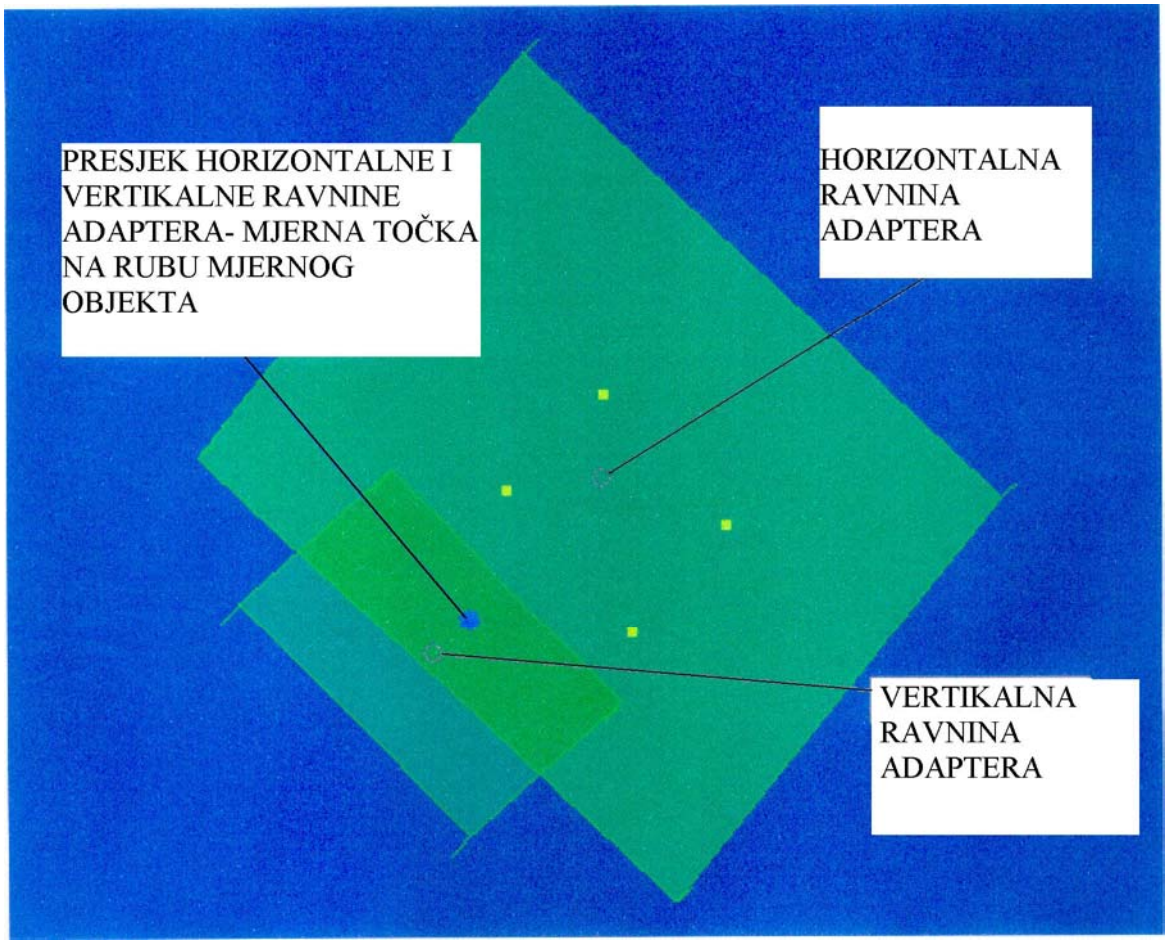
Adapteri su po svom izgledu različiti za ravne dijelove strukture, rubove mjernog objekta ili okrugle elemente na mjernom objektu. U programskom paketu razlikuju se prema definiranim šiframa i rasporedu mjernih točaka.

Na slici 54 prikazan je primjer mjernog objekta na koji se postavlja adapter za definiranje ruba.



Slika 54: Mjerni objekt i adapter za definiranje ruba

Kada se oblik adaptera prepozna u programskom paketu, automatski se postavljaju horizontalna i vertikalna ravnina mjernog objekta, a rub se definira kao presjek dvije ravnine. Na slici 55 nalazi se grafički prikaz postavljanja horizontalne i vertikalne ravnine, te položaj mjerne točke na rubu mjernog objekta.

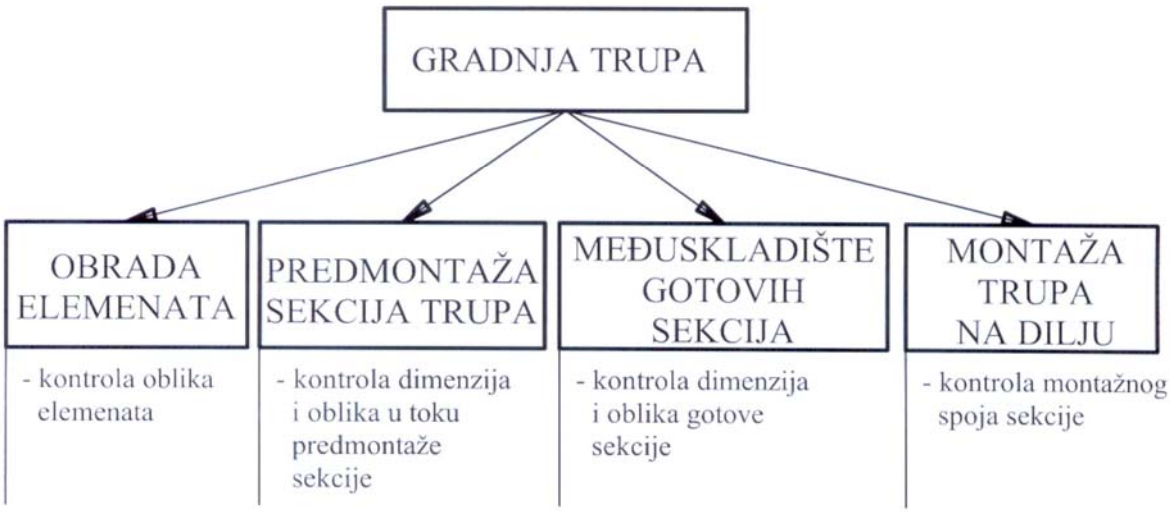


Slika 55: Grafički prikaz definiranja ravnina adaptera u programskom paketu

4. Primjena fotogrametrije u brodogradnji

Postupak mjerenja i kontrole dimenzija i oblika fotogrametrijskom metodom može se koristiti u svim bitnim fazama gradnje trupa broda. Slikom 56 prikazana je podjela procesa gradnje trupa po fazama od obrade elemenata do montaže trupa te su definirane stavke kontrole koje bi se mogle ostvariti u pojedinoj fazi pomoću fotogrametrije.

U fazi obrade elemenata kontrolirao bi se oblik elemenata. Kod predmontaže sekcija trupa kontrolirale bi se dimenzije i oblik sekcije tokom sastavljanja, a na međuskladištu gotovih sekcija dimenzije i oblik sastavljenih sekcija. Kontrola na navozu obuhvaćala bi kontrolu montaže sekcija u trup broda.



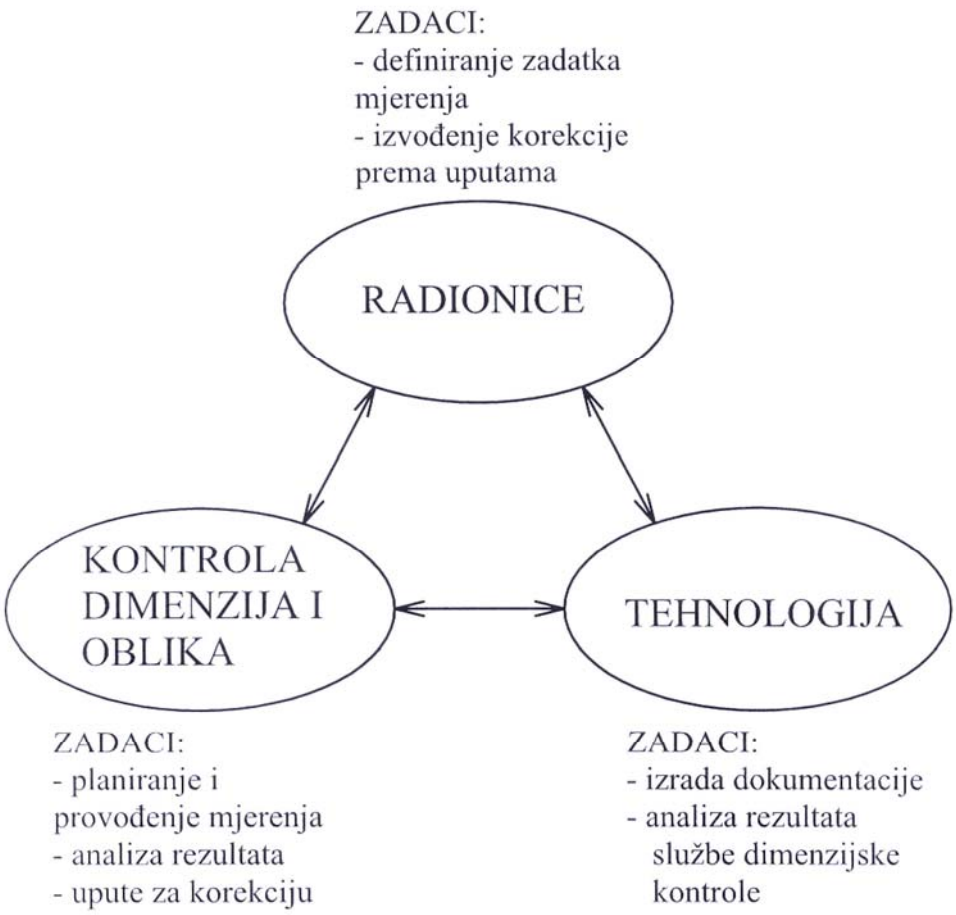
Slika 56: Kontrola dimenzija i oblika fotogrametrijskom metodom u fazama gradnje trupa

Uvođenje fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika u procesu gradnje trupa zahtjeva suradnju i interakciju službi TEHNOLOGIJE, RADIONICA i DIMENZIJSKE KONTROLE. Slikom 57 prikazan je njihov međusobni odnos, te zadaci koje obavljaju da bi se ostvario zajednički cilj, a to je što točnija, brža i jeftinija izrada sekcija, te montaža trupa na građevnom mjestu. Sve tri službe nalaze se u ravnopravnom položaju i svaka od njih svojim radom utječe na rad drugih službi. Od prikazanog odnosa službi traži se sustavan i zajednički rad u kojem je potrebno poznavati mogućnosti svih sudionika u procesu, te pomiriti različite želje i potrebe.

U sklopu tehnoloških uputa za predmontažu sekcija nalaze se i mjerne skice kontrole dimenzija, gdje su potrebne mjere i pozicije za kontrolu tj. gdje je definiran zadatak mjerenja.

Mogućnosti mjerenja fotogrametrijskom metodom i veliki broj mjernih točaka i prikaza rezultata povećavaju i broj pozicija mjerenja. Zadatkom mjerenja na svakoj poziciji

mjeritelj planira i provodi mjerenje te analizira rezultate. Pri provođenju mjerenja potreban je slobodan prostor oko sekcije te dobro prirodno ili umjetno osvjetljenje. Rezultati mjerenja osnova su uputa za ispravljanje netočnosti kada se gotova sekcija uspoređuje sa CAD modelom ili pripremu sekcijskog spoja ako se radi o montaži sekcije. Analiza rezultata mjerenja može služiti i kao povratna informacija o kvaliteti tehnološke dokumentacije. Poboljšanja tehnološke dokumentacije mogu se odnositi na podjelu trupa na građevne jedinice ili na redoslijede zavarivanja. Kritični dijelovi strukture gdje se najčešće pojavljuju netočnosti su krmene i pramčane sekcije radi njihove složene strukture i zakrivljenosti.



Slika 57: Shema interakcije službi tehnologije, dimenzijske kontrole i radionica

4.1. Fotogrametrija u obradi elemenata

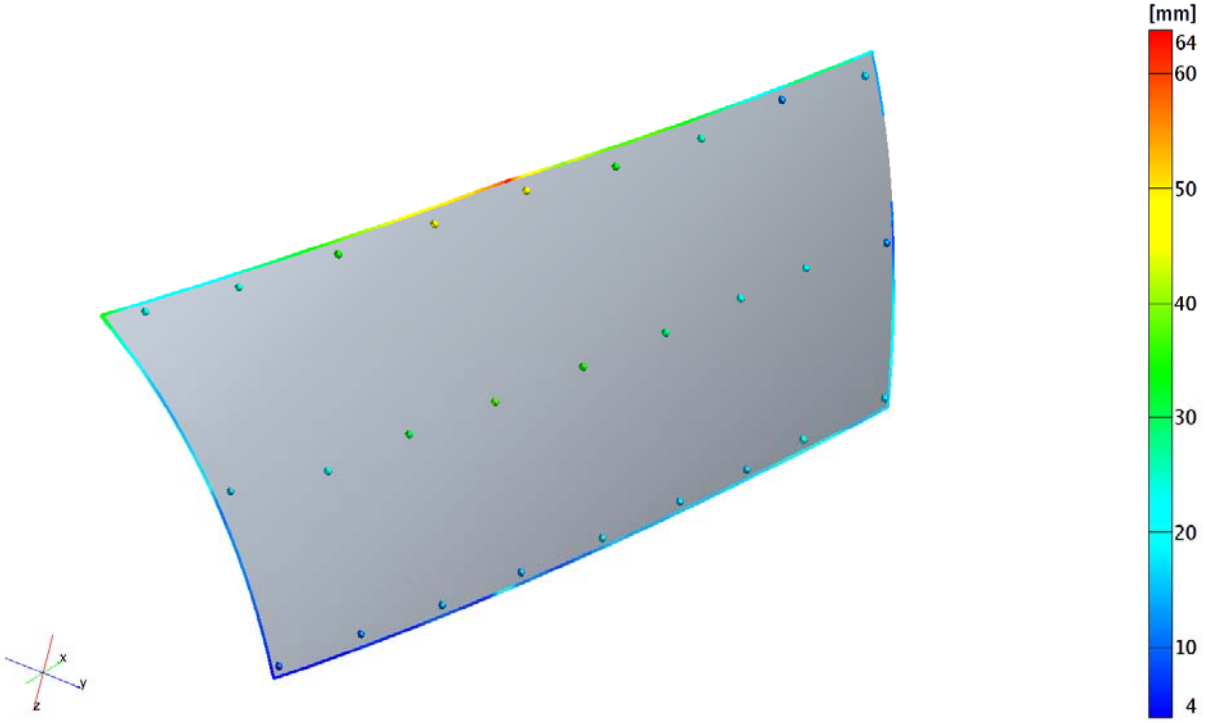
Korištenje fotogrametrije u fazi obrade elemenata bilo bi pogodno obavljati nakon oblikovanja elemenata, kada je potrebno kontrolirati njihov oblik. Na površini elementa se postavljaju kodirane mjerne točke te lijepi samoljepljiva traka uz rub elementa. Rezultat

obrade fotografija u programskom paketu bila bi forma elementa koja bi se usporedila s teorijski definiranom formom poklapanjem na računalu. Na osnovi postojećih odstupanja donosile bi se daljnje upute za ispravke.

U fazi obrade, dimenzije elemenata i njihov jednostavan oblik pogodni su za primjenu fotogrametrijske metode kontrole. Na takve elemente postavljao bi se manji broj mjernih točaka koje se mogu snimiti u kratkom vremenu i s manjim brojem fotografija, što pojednostavnjuje obradu fotografija i proračun mjernog rezultata.

Ovakav način rada iz tehnološkog procesa oblikovanja mogao bi izbaciti upotrebu šablona za kontrolu oblika.

Korištenjem fotogrametrije u fazi obrade elemenata oblik bi se kontrolirao preklapanjem rezultata dobivenih mjerenjem elementa i njegovog CAD modela. U ovom radu nisu obavljena mjerenja u fazi obrade elemenata, pa je za ilustraciju postupka kontrole izdvojen dio mjerenja iz faze predmontaže sekcija. Na slici 58 prikazan je primjer preklapanja mjernih rezultata limova vanjske oplate s CAD modelom. Siva ploha na slici je CAD model vanjske oplate, a bojama su prikazana odstupanja ruba i mjernih točaka vanjske oplate. Odstupanja mjernih točaka se mjere, a mogu se prikazati grafički i tablično. Na slici se osim prikazanog preklopa nalazi stupac mjerila odstupanja pomoću kojeg se prati veličina odstupanja mjernih točaka i brida vanjske oplate.



Slika 58: Preklapanje rezultata mjerenja vanjske oplate sa CAD modelom

4.2. Fotogrametrija u predmontaži sekcija

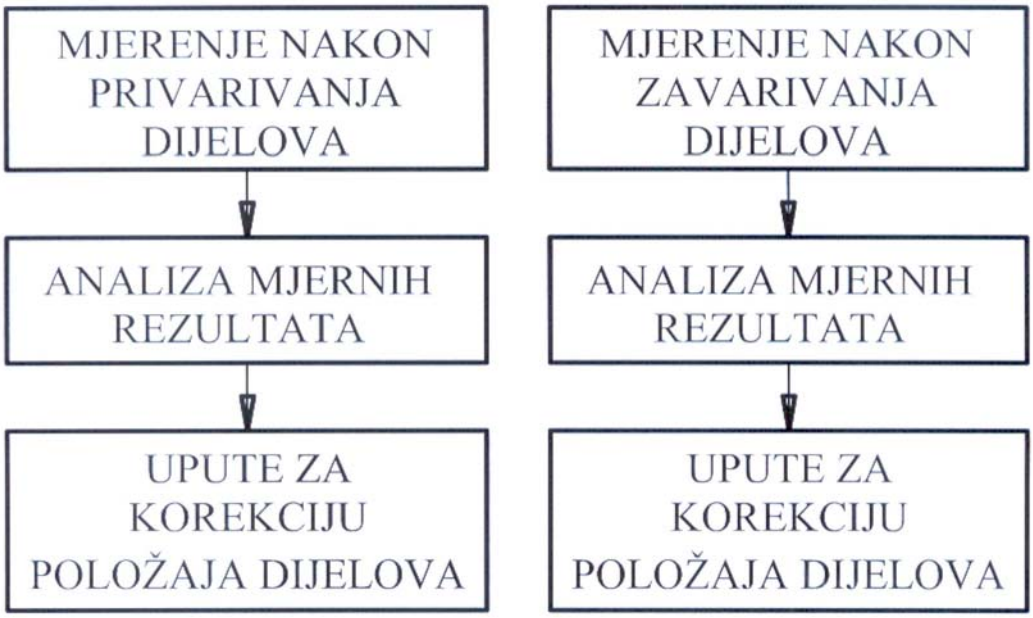
Kontrola dimenzija i oblika pomoću fotogrametrije u toku predmontaže sekcije pogodna je za sekcije čije se građevne jedinice ne sastavljaju na automatiziranim panel linijama nego se elementi u sekciju montiraju pojedinačno. Aktivnost kontrole dimenzija i oblika na automatiziranim linijama uključena je u proizvodni proces. Najčešće se obavlja na drugom taktu, gdje se mjeri duljina i širina panela. Na osnovi mjerenja korigiraju se glavne dimenzije. Primjena fotogrametrijske metode za kontrolu dimenzija na panel liniji nije prikladna radi sporosti postupka mjerenja.

Karakteristični primjeri za primjenu fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika sekcija u predmontaži su sekcije u području strojarnice te krmenog i pramčanog pika, gdje je vanjska oplata zakrivljena, a elementi unutrašnje strukture različite geometrije. Fotogrametrija kao metoda kontrole dimenzija i oblika u ovoj se fazi može uključiti tako da se provodi istovremeno sa sastavljanjem strukture. Redoslijed postavljanja podsklopova i sklopova diktira redoslijed, planiranje i izvođenje mjerenja. Na početku predmontaže sekcije, nakon postavljanja prva dva podsklopa slijedi postavljanje mjernih točaka na podsklopove i kontrola fotogrametrijskom metodom. Na svaki novo postavljeni i privareni podsklop ili sklop postavljaju se mjerne točke te dodaje nova grupa fotografija kako bi novi dijelovi strukture postali dio rezultata mjerenja. Za postupak mjerenja to bi značilo da se novi podsklop u strukturi mora povezati sa već postojećim dijelovima strukture, a to će utjecati na položaj snimanja, te raspored postavljanja i položaje mjernih točaka.

Korištenje fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika u toku predmontaže sekcije prikazan slikom 59. Mjerenje se provodi u dvije faze, prvo nakon privarivanja podsklopa ili sklopa, a drugo nakon konačnog zavarivanja. Za obje faze provodi se isti postupak mjerenja. Nakon obavljenog mjerenja slijedi obrada fotografija i analiza mjernih rezultata te kontrola odstupanja položaja dijelova sekcije u odnosu na teorijski položaj definiran nacrtom. U fazi predmontaže sekcije pojavljuju se također netočnosti međusobnog položaja dijelova sekcije, a uglavnom se odnose na paralelnost i okomitost.

Analiza mjernih rezultata omogućuje korekcije postavljanja dijelova sekcije u trenutku kada se događaju deformacije uslijed unosa topline i kada ih je najlakše ispraviti. Korekcije nakon privarivanja dijelova mogu rezultirati postavljanjem dodatnih upora kako bi se smanjila mogućnost pojave netočnosti kod postavljanja i privarivanja slijedećih dijelova strukture.

Rezultati mjerenja mogu se koristiti i za praćenje deformacija dijelova strukture uslijed privarivanja i zavarivanja s ciljem definiranja standardnih parametara postupka i redoslijeda zavarivanja koji će uzrokovati minimum deformacija strukture.



Slika 59: Pregled kontrole dimenzija i oblika u tokovima privarivanja i zavarivanja sekcije

Korištenje fotogrametrije u toku predmontaže sekcije i obrada rezultata mjerenja mora pratiti dinamiku postavljanja dijelova sekcije, pa ih treba napraviti dovoljno brzo. U prilog korištenja ove metode treba reći da se radi o mjerenju s manjim brojem dijelova strukture i manjim brojem fotografija. Ni kriteriji usporedbe mjernih rezultata ovdje nisu zahtjevni, jer je potrebno kontrolirati međusobni položaj, okomitost, paralelnost ili međusobne udaljenosti dijelova što se u programskom paketu jednostavno računa i prikazuje. Isto tako pogodno je što se razvojem fotogrametrijskog sustava došlo do mogućnosti bežičnog prebacivanja fotografija u prijenosno računalo, što omogućuje istovremeno snimanje, prijenos i obradu fotografija, te analizu mjernih rezultata.

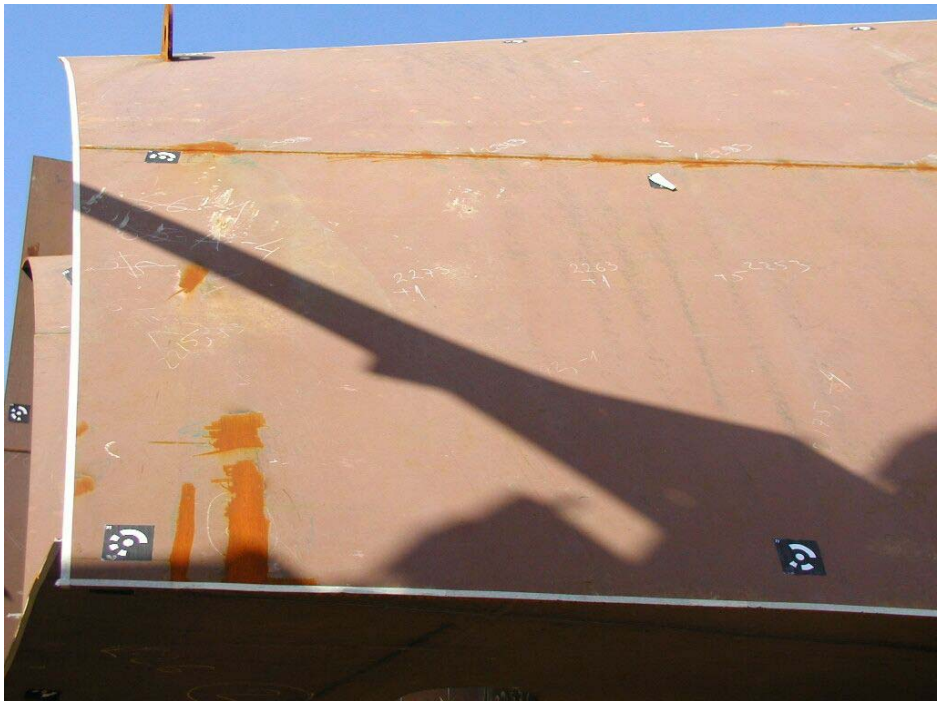
U odnosu na standardni postupak mjerenja s fotogrametrijskim sustavom ovdje je razlika u načinu postavljanja mjernih točaka. Na dijelove sekcije postavile bi se fiksne mjerne točke koje se ne skidaju, što se može obaviti u fazi obrade elemenata. Mjerne točke bi se mogle postavljati bojanjem bijelom bojom kroz unaprijed pripremljenu šablonu na tamnu površinu sekcije da se ostvari zahtjevani kontrast između mjerne točke i podloge. Tako bi se iz postupka mjerenja mogla izbaciti stavka postavljanja mjernih točaka, što bi skratilo postupak.

4.3. Fotogrametrija na međuskladištu sekcija

Preporuke i primjeri kontrole dimenzija i oblika gotovih sekcija, prikazanih u ovom poglavlju nastale su temeljem mjerenja provedenih u brodogradilištu.

Kontrola dimenzija i oblika gotovih sekcija fotogrametrijskim sustavom obavlja se na međuskladištu gotovih sekcija, gdje sekcije čekaju na antikorozivnu zaštitu ili termin montaže na dilju. Postavljene su na potklade, oslonjene uglavnom na ravni dio strukture, što znači da su često u preokrenutom položaju.

Postavljanje mjernih točaka na strukturu u ovoj se fazi razlikuje od postavljanja mjernih točaka prilikom predmontaže sekcije. Kod gotovih sekcija na međuskladištu dostupne su vanjske plohe za postavljanje mjernih točaka. Kodirane mjerne točke postavljaju se po plohama, a nekodirane po rubovima sekcije gdje se osim mjernih točaka može postaviti i samoljepljiva traka, kako je prikazano primjerom na slici 60.



Slika 60: Postavljanje mjernih točaka i samoljepljive trake na oplatu sekcije

Visina sekcije na potkladama može na međuskladištu biti i do 6 m, pa je za snimanje nužno korištenje pomične skele, prikazane slikom 61, kako bi rezultati mjerenja bili što točniji i pouzdaniji. Osim skele koja omogućuje snimanje s više nivoa, nužan je prostor oko sekcije, da je se tokom snimanja može nesmetano obići. Potreban prostor će se definirati preko parametara kao što su veličine mjerne točke i mjernog volumena. S druge visine snimati se može i pomoću teleskopskog stativa za snimanje kamerom, prikazanog

slikom 62. Na vrh stativa postavlja se digitalni fotoaparat koji je spojen s prijenosnim računalom preko kojeg se kontrolira slika u aparatu.

Nakon obavljenog snimanja i obrade fotografija u programskom paketu iz oblaka mjernih točaka kreiraju se elementi mjerenja tj plohe i rubovi dijelova sekcije.

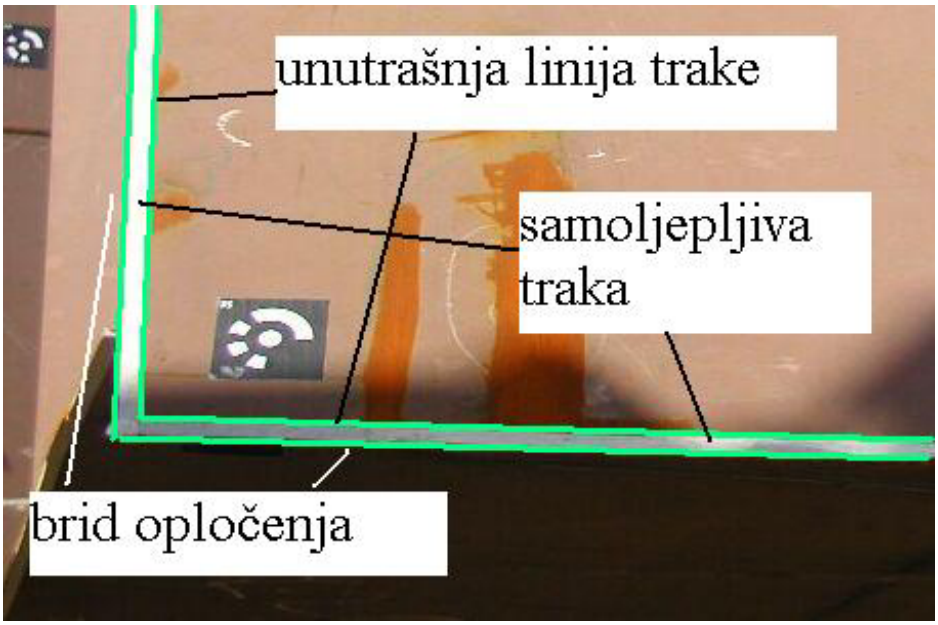


Slika 61: Pomična skela



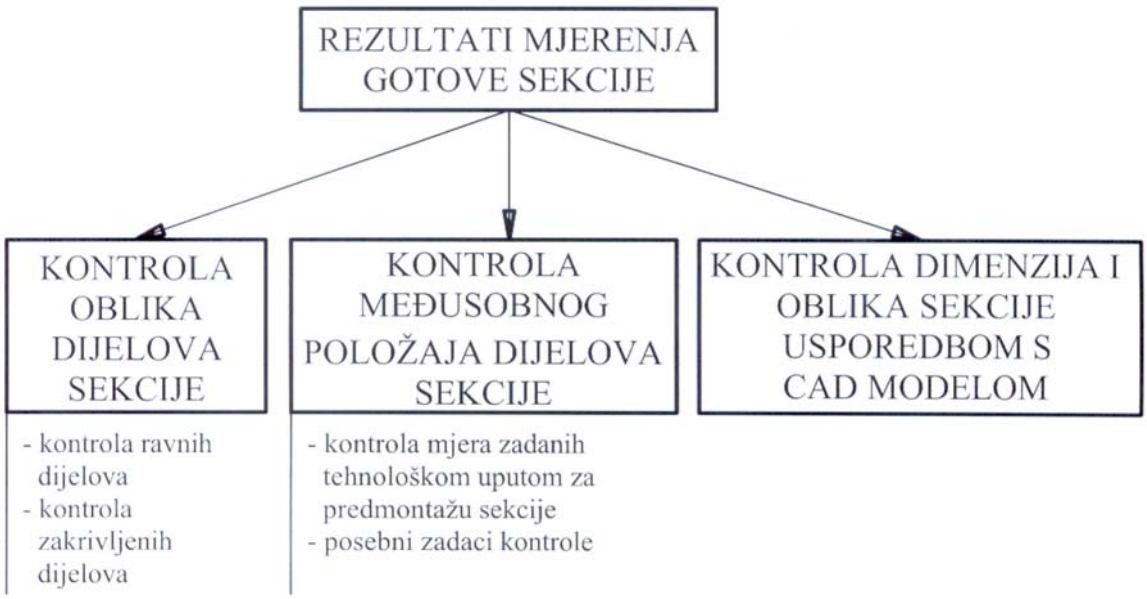
Slika 62: Teleskopski stativ za snimanje

Programski paket na fotografijama prepoznaje proizvoljno nacrtane linije ili postavljene samoljepljive trake na osnovu kontrasta podloge i trake ili linije te ih postavlja i orijentira u prostoru. Osim kontrasta trake i okoline, nužan je uvjet da je postavljena linija snimljena minimalno iz dva međusobno okomita kuta gledanja kako bi se zadovoljili uvjeti triangulacije. Kontrast trake i oplate omogućuje pronalaženje linije na unutrašnjoj strani trake koja je od ruba opločenja udaljena za njenu širinu. U programskom paketu definirana linija na samom rubu opločenja ovisi o kontrastu trake i okoline, a zahtjevana razlika se najčešće ne može postići duž cijele linije. Radi toga se najprije određuje linija unutrašnjeg ruba da bi se u drugom koraku zadala širina trake i dobio položaj ruba opločenja kako je prikazano slikom 63.



Slika 63: Postupak prepoznavanja samoljepljive trake u programskom paketu

Analiza rezultata mjerenja dimenzijske kontrole predmontirane sekcije može se podijeliti po grupama mjerenja, kako je prikazano na slici 64. Kontrola oblika dijelova sekcije je prva grupa, a sastoji se od kontrole ravnih i zakrivljenih dijelova. Druga grupa je kontrola međusobnog položaja dijelova sekcije koja se obavlja mjerenjem kuteva i udaljenosti između dijelova sekcije. U drugu grupu spadaju kontrola mjera zadanih tehnološkom uputom predmontaže sekcije, te posebni zadaci kontrole položaja dijelova sekcije. Treća grupa odnosi se na moguću usporedbu rezultata mjerenja i CAD modela sekcije.



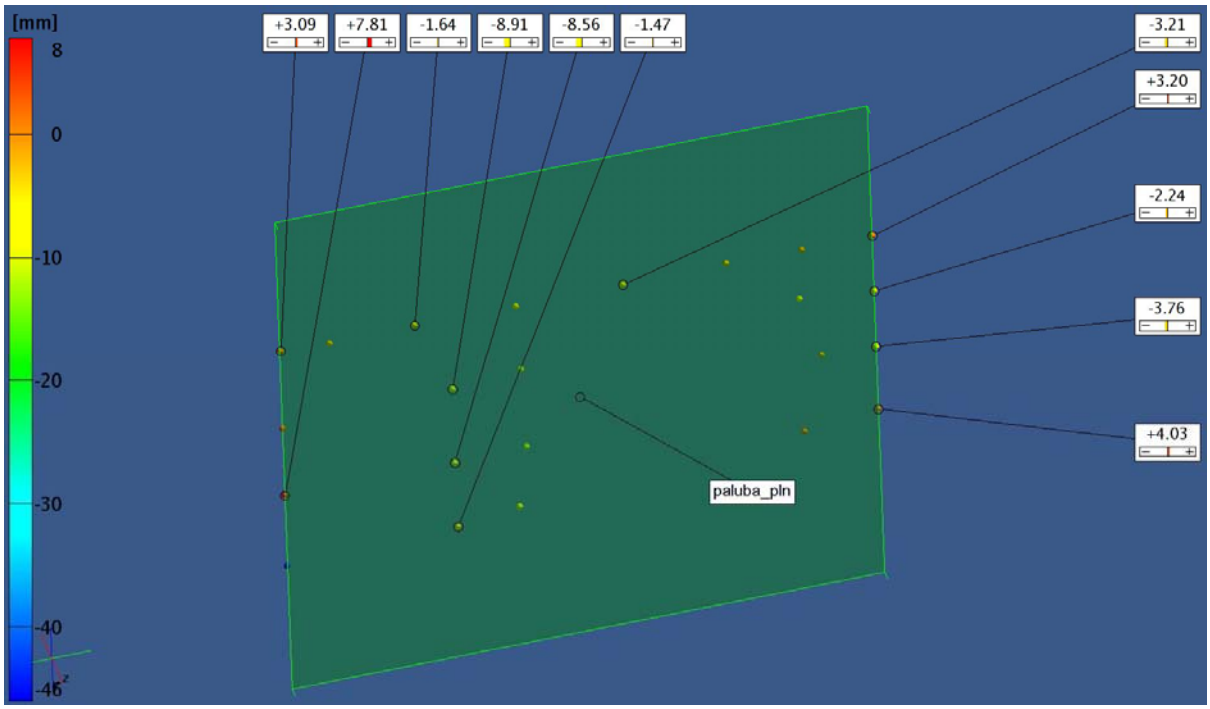
Slika 64: Pregled analize rezultata mjerenja gotovih sekcija

4.3.1. Kontrola oblika dijelova sekcije

Kontrola oblika dijelova sekcije obuhvaća analizu točnosti pojedinačnih ploha, rubova ili krivulja kreiranih iz oblaka mjernih točaka dobivenih mjerenjem fotogrametrijskim sustavom. Sastoji se od ravnih i zakrivljenih dijelova strukture.

Kod ravnih dijelova sekcije, mjere se odstupanja mjernih točaka od definirane kontrolne ravnine, a kod zakrivljenih dijelova, mjere se odstupanja mjernih točaka od teorijskog oblika strukture.

Na slici 65 primjerom je prikazana kontrola ravnoće palube. Odstupanja mjernih točaka mjere se od kontrolne ravnine, a odstupanje je najmanja udaljenost mjerne točke od ravnine. Kontrolna ravnina se postavlja kroz 4 mjerne točke, a za konstrukciju se uzimaju krajnje mjerne točke da bi se smanjio utjecaj pogreške postavljanja. Mjerni rezultati prikazuju se grafički kao na slici 65 i tablično. Slikom se prikazuje referentna ravnina, stupac odstupanja i promatrane karakteristične mjerne točke za koje se u posebnom kvadratićima upisuju veličine i smjerovi odstupanja.

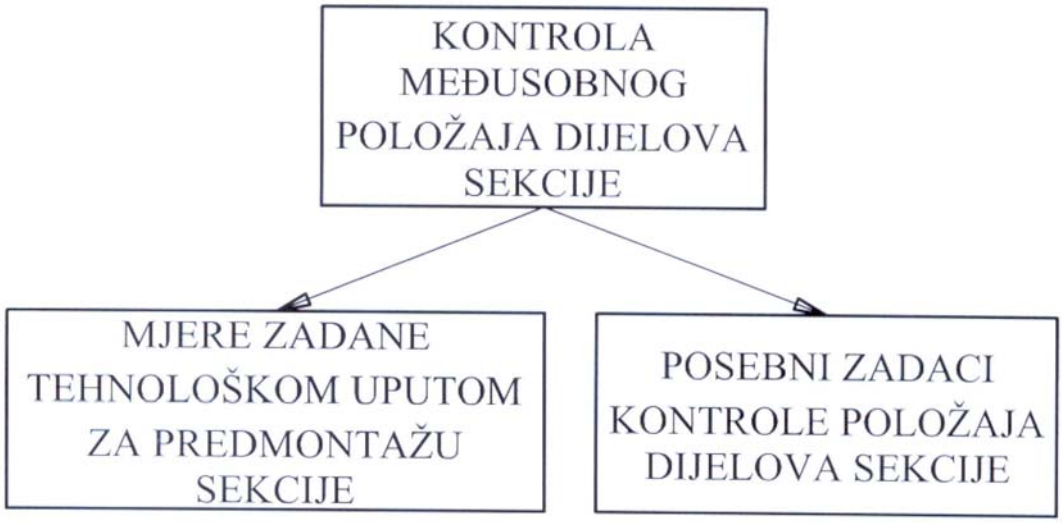


Slika 65: Grafički prikaz rezultata kontrole ravnoće palube

Kontrola zakrivljenih dijelova strukture radi se preklapanjem rezultata mjerenja napravljenih fotogrametrijskim sustavom i CAD modela u zajednički koordinatni sustav. Preklapanje se obavlja u programskom paketu preko zadanih kriterija preklapanja, a nakon toga se mjere odstupanja mjernih točaka od ploha CAD modela, te analiziraju rezultati.

4.3.2. Kontrola međusobnog položaja dijelova sekcije

Kontrola međusobnog položaja dijelova sekcije provodi se temeljem mjernih rezultata sekcije napravljenih fotogrametrijskim sustavom. Zadaci kontrole međusobnog položaja dijelova sekcije mogu biti definirani tehnološkom uputom za predmontažu sekcije ili kao poseban zadatak kontrole položaja elemenata, kao što je prikazano na slici 66.



Slika 66: Pregled kontrole međusobnog položaja dijelova sekcije

Tehnološke upute za predmontažu sekcije sadržavat će mjerne skice dimenzijske kontrole u kojima se definiraju mjere kao što su duljina, širina, visina sekcije, te udaljenosti između elemenata strukture. Primjena fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika gotovih sekcija može odgovoriti zahtjevima kontrole dimenzija kakvi se mogu definirati tehnološkim uputama. Potrebno je na karakteristične pozicije postaviti kodirane i nekodirane mjerne točke te, nakon obrade fotografija i proračuna položaja mjernih točaka izmjeriti zahtjevane udaljenosti.

Prednost primjene fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika u usporedbi sa sadašnjim postupcima kontrole je veća količina rezulata mjerenja. Jednom napravljen rezultat mjerenja omogućuje i naknadno definiranje posebnih zadataka kontrole, te mjerenje da bi se došlo do potrebnih informacija o točnosti neophodne za slijedeće faze brodograđevnog proizvodnog procesa.

Osnova za kontrolu mjera prema mjernim skicama tehnoloških uputa ili prema posebnim zadacima kontrole je oblak mjernih točaka u kojem se konstruiraju elementi mjerenja.

Za kontrolu kuta između sklopova sekcije potrebno je izdvojiti mjerne točke koje se nalaze na sklopovima, te kroz njih definirati plohe sklopova između kojih se mjeri kut.

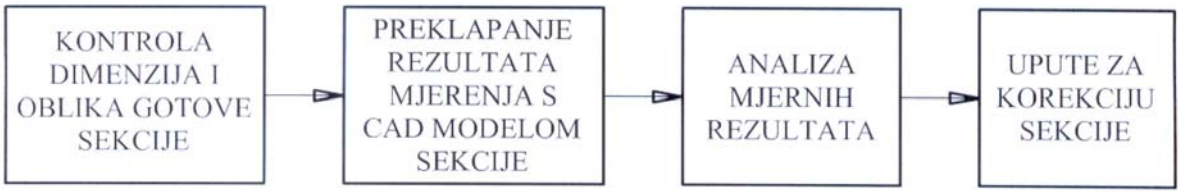
Za mjerenje udaljenosti definiraju se karakteristične mjerne točke ili rubovi elemenata mjerenja između kojih se mjeri udaljenost.

Rezultati mjerenja prikazuju se grafički i tablično, a uspoređuju se s teorijskim vrijednostima kuteva ili udaljenosti. Teorijske vrijednosti kuteva i udaljenosti definirane su radioničkim nacrtom sekcije.

4.3.3. Usporedba rezultata mjerenja i CAD modela

Postupak kontrole dimenzija i oblika gotove sekcije prikazan je dijagramom toka na slici 67, a sastoji se od preklapanja rezultata mjerenja sekcije fotogrametrijskom metodom s CAD modelom, te analizu mjernih rezultata na osnovu kojih se rade upute za korekciju.

Preklapanje rezultata mjerenja i CAD modela sekcije postiže se njihovim postavljanjem u zajednički koordinatni sustav, a u programskom paketu može se ostvariti preko definiranih kriterija preklapanja. Preklapanje volumenskih objekata, kakvi su mjerni rezultati i CAD model sekcije biti će jednoznačno određeno ako se napravi preko tri međusobno okomite ravnine. Struktura sekcija brodskog trupa pogodna je za preklapanje preko tri međusobno okomite ravnine, jer se takvi strukturni elementi često mogu izdvojiti u strukturi sekcije. Primjerice, takvi elementi strukture su paluba, poprečna i uzdužna pregrada broda.



Slika 67: Dijagram toka kontrole dimenzija i oblika gotove sekcije

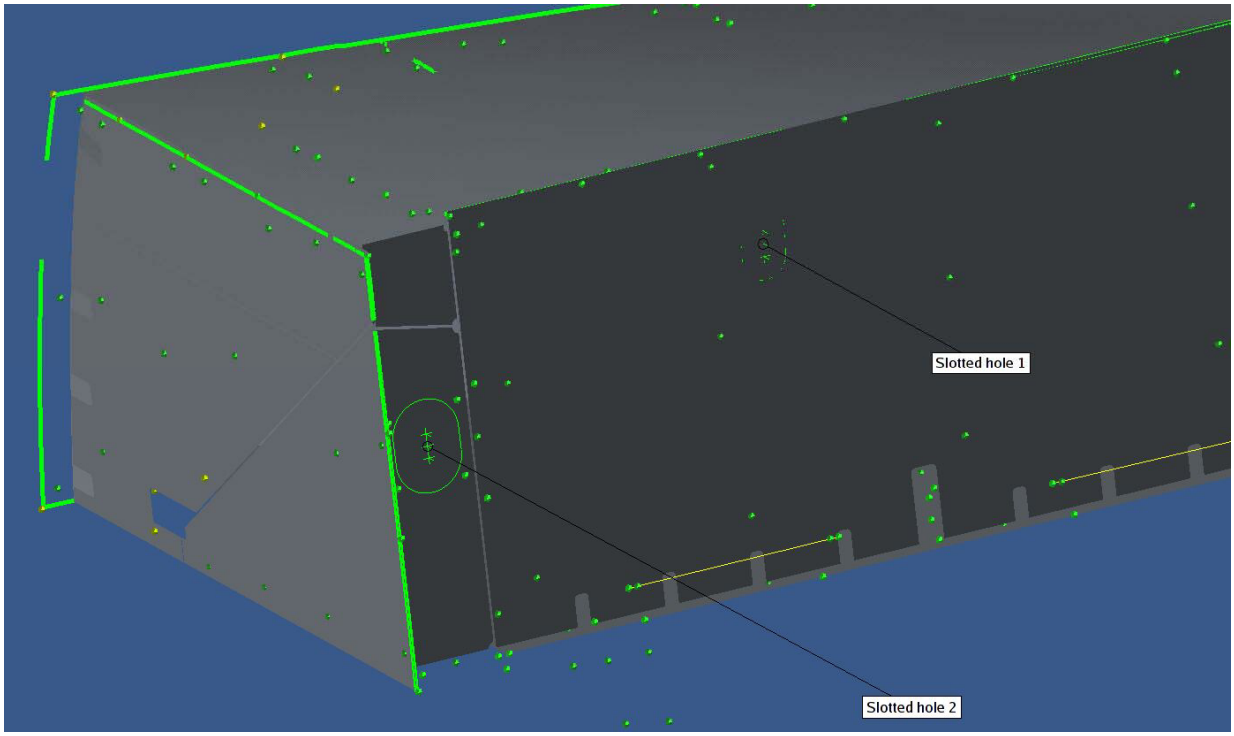
Postavljanje kriterija preklapanja u programskom paketu znači definiranje elemenata preklapanja iz oblaka mjernih točaka i CAD modela sekcije koji će se preklopiti. Pri tome su obično dijelovi CAD modela nepomični i referentni, a pomiču se elementi mjerenja sekcije. Na primjer, ako se oblak mjernih točaka i CAD model sekcije nalaze u prostoru i moraju se preklopiti preko uzdužne pregrade zadaje se uvjet da sve mjerne točke na uzdužnoj pregradi preklope s uzdužnom pregradom CAD modela. Kada se to ponovi za

elemente u drugim ravninama preklapanja ostvaruju se sva translacijska i rotacijska gibanja mjernih točaka sekcije prema CAD modelu.

Kvaliteta preklapanja u programskom paketu ocjenjuje se podatkom o prosječnom odstupanju svih mjernih točaka od CAD modela te vrijednošću prosječnog odstupanja svakog od elemenata preklapanja. Slikom 68 prikazan je primjer preklapanja rezultata mjerenja i CAD modela sekcije. Zelenom bojom prikazani su rezultati mjerenja – rubovi vanjske oplate sekcije i mjerne točke, a sivom plohe CAD modela sekcije.

Nakon preklapanja slijedi analiza mjernih rezulata pri čemu se očitavaju odstupanja rezultata mjerenja od CAD modela u definiranim točkama kontrole te se daju upute za korekciju sekcije.

U brodograđevnom procesu, upute za korekciju svode uglavnom se na dva slučaja, a to su višak ili nedostatak materijala na kontroliranoj poziciji. Ako se radi o višku materijala na pojedinim pozicijama, uputa za korekciju sadržavat će vrijednosti širine reza materijala koji treba ukloniti. Ako je uočen nedostatak materijala, potrebno ga je nadoknaditi navarivanjem ili na drugi način, a vrijednosti odstupanja od oblika će se korigirati u slijedećoj fazi proizvodnog procesa, najčešće pri montaži sekcije u trup broda.



Slika 68: Preklapanje rezultata mjerenja i CAD modela sekcije

4.4. Fotogrametrija u montaži trupa

Preporuke i primjeri kontrole dimenzija i oblika u montaži trupa na dilju, prikazani u ovom poglavlju, nastale su temeljem provedenih mjerenja u brodogradilištu. Kontrola dimenzija i oblika u fazi montaže trupa na dilju uključuje dva mjerenja.

Prvo mjerenje izvodi se na sekciji koja se montira u trup broda. Kodirane mjerne točke postavljaju se na vanjske plohe strukturnih elemenata, a uz rub sekcijskog spoja postavljaju se nekodirane mjerne točke.

Drugo mjerenje izvodi se na dilju na mjestu gdje se sekcija postavlja i montira. U ovom slučaju mjerne točke postavljaju se na unutrašnje rubove što je jednostavnije za postavljanje i praktičnije za snimanje. Snimanje izvana je nepogodno radi nepristupačnosti, pogotovo na boku broda gdje se skela ne može postaviti dok se sekcija ne montira. Snimanje izvana bilo bi moguće jedino uz korištenje dizalice, što bi dodatno opteretilo njen u pravilu vrlo opterećen kapacitet. Primjer postavljanja mjernih točaka na sekciji i na dilju prikazan je slikama 69 i 70.

Kod obrade fotografija i analize mjernih rezultata u programskom paketu treba uzeti u obzir razlike položaja mjernih točaka na sekciji i na dilju. Mjerne točke na sekciji postavljene su na vanjskoj strani dijelova strukture, a na poziciji na brodu postavljene su s unutrašnje strane, kako je prikazano slikama 69 i 70. Radi toga se u programskom paketu za točke na sekciji određuje kompenzacija koja uzima u obzir debljinu lima promatrane plohe.



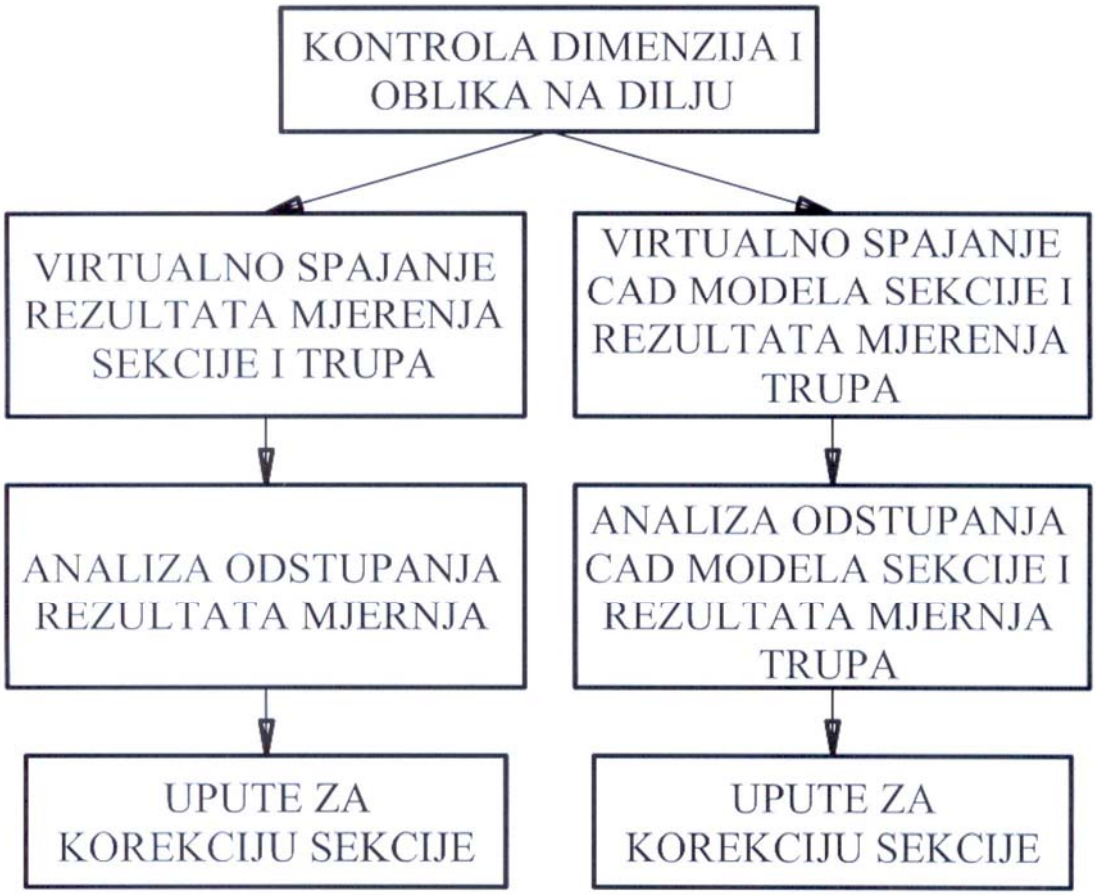
Slika 69: Postavljanje mjernih točaka na sekciji



Slika 70: Postavljanje mjernih točaka na navozu

Kontrola dimenzija i oblika u fazi montaže trupa može biti dvojaka, a prikazana je na slici 71. Jedan način kontrole dimenzija i oblika može se napraviti virtualnim spajanjem

rezultata mjerenja sekcije i trupa, nakon čega se analiziraju odstupanja rubova, te definiraju upute za korekciju sekcije. Drugi način kontrole je virtualno spajanje CAD modela sekcije i mjernih rezultata trupa, gdje se analizom odstupanja dolazi do vrijednosti akumuliranih pogrešaka nastalih montažom prethodnih sekcija.



Slika 71: Pregled kontrole dimenzija i oblika na dilju

4.4.1. Virtualno spajanje mjerenja sekcije i mjerenja trupa

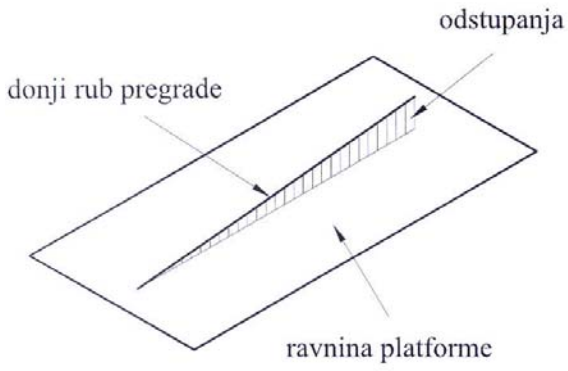
Kontrola dimenzija i oblika virtualnim preklapanjem rezultata mjerenja sekcije i pozicije u trupu, gdje se sekcija montira, uključuje postavljanje rezultata mjerenja u zajednički koordinatni sustav simulirajući pri tom realni postupak montaže sekcije kakav se provodi na dilju.

Rezultati mjerenja pozicije na brodu postavljaju se kao nepomični i referentni, a sekcija se u trup pozicionira prema definiranom scenariju i kriterijima preklapanja. Kod objekata velikih dimenzija kakvi se nalaze u brodogradnji preklapanje se provodi preko tri međusobno okomite ravnine koje će omogućiti jednoznačno preklapanje. Pri tom je nužno

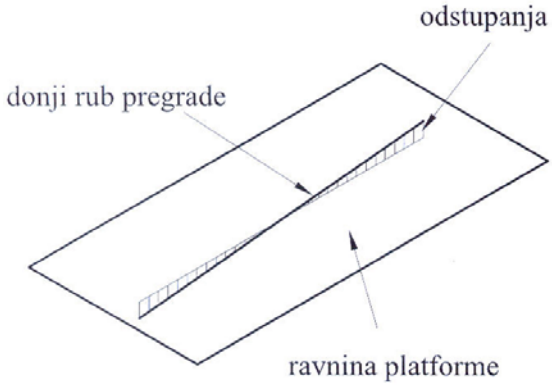
na dijelove sekcije i pozicije na brodu postaviti mjerne točke preko kojih će se konstruirati tri međusobno okomite ravnine te elementi preklapanja.

Nakon preklapanja rezultata mjerenja analiziraju se odstupanja elemenata sekcijskog spoja koje zahtijevaju korekcije sekcije prije montaže na navozu. Upute za korekciju sadržavaju pozicije i vrijednosti koje na sekcijskom spoju treba označiti i korigirati i omogućiti bržu i jednostavniju montažu. Radi lakšeg razumjevanja zadatka i bolje vizualizacije, pored pozicija i vrijednosti upute mogu sadržavati i slikovni prikaz korekcije.

Nedostatak postupka virtualnog preklapanja u računalu je u tome što su rezultati mjerenja kruti i ne mogu se rezultati mjerenja sekcije elastičnom deformacijom prilagoditi rezultatima mjerenja svjetlog otvora, kao što se to događa kod stvarne montaže sekcije. To može dovesti do nelogičnih vrijednosti odstupanja, što će se objasniti primjerom preklapanja linije i plohe. U realnoj situaciji, odstupanja linije od plohe izražena su samo u jednom smjeru, dok se kod virtualnog preklapanja pojavljuju odstupanja različitih predznaka. Slikama 72 i 73 shematski su prikazani primjeri stvarnog i virtualnog postavljanja ruba pregrade u ravninu platforme.



Slika 72: Postavljanje ruba pregrade u ravninu platforme



Slika 73: Postavljanje ruba pregrade u ravninu platforme u programskom paketu

Kod stvarnog postavljanja pregrade na platformu, pregrada se oslanja jednim krajem na platformu, a odstupanja koja se pojavljuju izražena su na drugom kraju pregrade kako je prikazano na slici 72. Kod virtualnog preklapanja postavljanje elemenata provodi po metodi minimuma kvadratnih odstupanja. Pri tom su vrijednosti odstupanja podjeljena na pozitivna i negativna, jer se pregrada postavlja u srednji položaj kako bi kvadrat odstupanja bio najmanji.

Radi preklapanja rezultata mjerenja metodom najmanjih kvadratnih odstupanja, potrebno je dodatno analizirati odstupanja elemenata preklapanja. Može se dogoditi da se uslijed netočnosti preklapanja na sekcijskom spoju generiraju dodatna odstupanja, pa je rezultate potrebno korigirati. Dodatna odstupanja nastala uslijed pogrešaka metode preklapanja mogu utjecati na mjerni rezultat.

4.4.2. Virtualno spajanje CAD modela sekcije i mjerenja trupa

Kontrola dimenzija i oblika virtualnim spajanjem CAD modela sekcije i rezultata mjerenja trupa zahtijeva izvođenje mjerenja na poziciji na brodu i, nakon toga, postupak preklapanja.

U rezultate mjerenja pozicije gdje se sekcija montira u trup broda postavlja se CAD model sekcije koja bi se na tom mjestu trebala montirati. Kao i kod virtualnog spajanja dvaju rezultata mjerenja definiraju se kriteriji preklapanja CAD modela prema rezultatima mjerenja trupa. Kod preklapanja rezultati mjerenja trupa postavljaju se kao nepomični i referentni, a CAD model se pozicionira. Na rezultatima mjerenja trupa definiraju se tri međusobno okomite ravnine preklapanja kako bi preklapanje postalo što jednoznačnije određeno, a na CAD modelu izdvajaju se točke za preklapanje. Kako su plohe CAD modela ravne za preklapanje s rezultatima mjerenje dovoljno je definirati tri točke. U ovom slučaju virtualnog spajanja nije potrebno dodatno kontrolirati odstupanja elemenata preklapanja.

Mjerenje odstupanja obavlja se na konturama sekcijskog spoja. Na rubovima sekcije definiraju se kontrolne mjerne točke, a mjere se njihova odstupanja od konstruiranih linija rubova sekcijskog spoja na brodu. Rezultati analize predstavljaju netočnosti generirane postavljanjem i montažom prethodnih sekcija. Korekcije položaja već privarenih sekcija u trup broda ne mogu se izvesti bez dugotrajnih i skupih intervencija, ali podatak o odstupanju će se uzeti u obzir kod montaže slijedećih sekcija, kada se netočnost može nadoknaditi.

5. Mjerenja fotogrametrijskim sustavom u brodogradnji

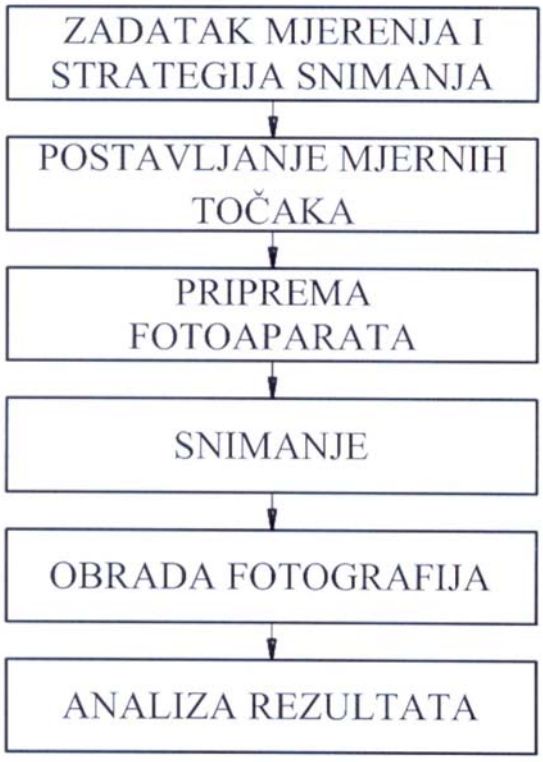
Mjerenja fotogrametrijskim sustavom u brodograđevnom procesu izvedena su na brodu za prijevoz naftnih prerađevina i kemikalija čije su glavne izmjere prikazane u tablici 4.

Tablica 4: Glavne izmjere broda

Duljina preko svega - Loa	[m]	243.6
Duljina između okomica - Lpp	[m]	235
Širina - B	[m]	42
Gaz - T	[m]	11.35
Visina - H	[m]	21
Nosivost - DWT	[m]	103 000

Obrađeni su primjeri kontrole dimenzija i oblika predmontirane sekcije te kontrole dimenzija i oblika kod montaže sekcija u trup broda na dilju. Mjerenja fotogrametrijskim sustavom na primjerima u brodogradnji izvedena su prema redoslijedu aktivnosti koje su prikazane dijagramom na slici 74.

Postupak mjerenja fotogrametrijskim sustavom sastoji se od 6 osnovnih koraka. U ovom uvodnom dijelu date su osnovne informacije, a detaljniji prikazi i specifičnosti svake aktivnosti dati će se uz opis provedbe mjerenja.



Slika 74: Dijagram toka aktivnosti mjerenja fotogrametrijskim sustavom

U prvom koraku izabrane su sekcije gdje će se provesti kontrola dimenzija i oblika, definiran je zadatak mjerenja i određena strategija snimanja. Kontrola predmontirane sekcije obavljena je na sekciji u području strojarnice broda, a kontrola sekcije u montaži napravljena je na sekciji koja se nalazi na krmi broda.

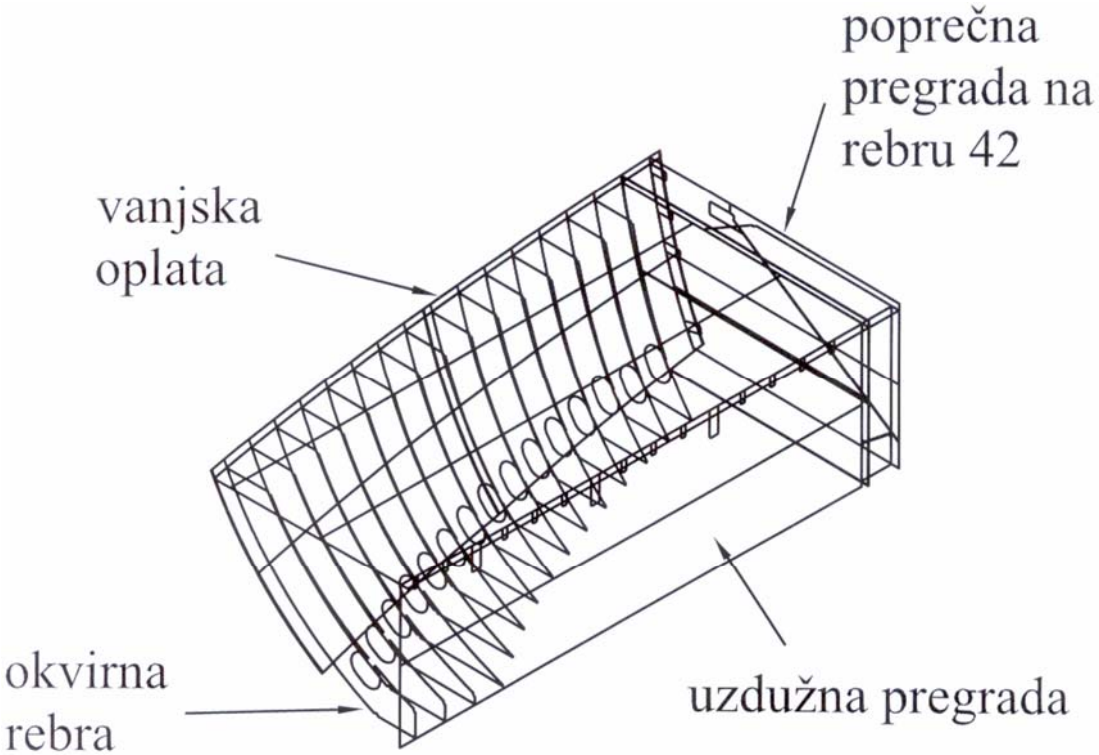
U drugom koraku su se prema definiranom zadatku mjerenja na mjerne objekte postavile samoljepljive kodirane i nekodirane mjerne točke te mjerne motke.

Slijedi namještanje parametara fotoaparata i to veličine otvora blende i brzine zatvarača, te snimanje mjernih objekata.

Nakon snimanja, fotografije se obrađuju u programskom paketu, te se kao rezultat obrade dobije oblak točaka u kojem se konstruiraju elementi mjerenja bitni za analizu mjernih rezultata.

5.1. Kontrola dimenzija i oblika predmontirane sekcije

Mjerni objekt je volumenska sekcija, dio brodske strukture čije su geometrijske karakteristike prikazane u tablici 5. Dijelovi sekcije sastoje se od druge platforme strojarnice, uzdužne pregrade, poprečne pregrade na rebru 42, vanjske i unutrašnje oplate na boku i okvirnih rebara, kako je prikazano slikom 75.



Slika 75: Aksonometrijski prikaz sekcije

Tablica 5: Geometrijske karakteristike sekcije

Duljina	[m]	13.2
Širina na pramčanom stiku	[m]	6.7
Širina na krmenom stiku	[m]	4
Visina	[m]	3.8
Masa	[t]	40

Mjerenje predmontirane sekcije fotogrametrijskim sustavom obavljeno je na međuskladištu gotovih sekcija, gdje je sekcija, nakon što je površinski zaštićena, odložena do termina montaže. Postavljena je u okrenutom položaju na dvije okvirne potklade, kako je prikazano slikom 76.



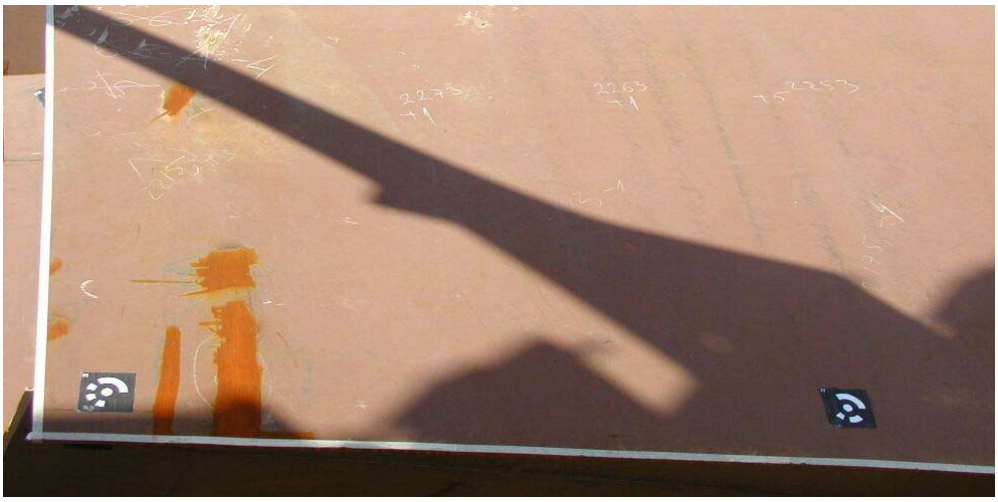
Slika 76: Sekcija na okvirnim potkladama

Na površine i bridove dijelova sekcije postavile su se kodirane i nekodirane mjerne točke promjera 22 mm. Broj postavljenih kodiranih točaka na dijelovima sekcije određen je prema njihovim dimenzijama. Tako je na poprečnu pregradu postavljeno 10 kodiranih točaka, na uzdužnoj pregradi i platformi strojarnice 20, a na vanjskoj oplati 30. Radi lakšeg praćenja obrade fotografija i snalaženja u analizi rezultata kodirane mjerne točke postavljale su se po grupama rednih brojeva od rednog broja 20 do 100 prema slijedećem rasporedu:

- druga platforma strojarnice – kodirane mjerne točke od broja 50 do broja 70,
- uzdužna pregrada - kodirane mjerne točke od broja 30 do broja 50,
- vanjska oplata - kodirane mjerne točke od broja 70 do broja 100,
- poprečna pregrada na rebru 42 - kodirane mjerne točke od broja 20 do broja 30.

Osim kodiranih i nekodiranih mjernih točaka, uz rub nekih okvirnih rebara i na rubu vanjske oplate zalijepila se samoljepljiva traka širine 20 mm kao što je prikazano slikom 77. Na sekciji je ukupno postavljeno 150 kodiranih i nekodiranih mjernih točaka, a dvojici ljudi je za to trebalo dva sata.

Nakon postavljanja mjernih točaka pristupilo se snimanju mjernog objekta. Snimanje je obavljeno digitalnim fotoaparatom Kodak DCS460 sa širokokutnim objektivom marke Nikkor žarišne daljine 24 mm. Postavili su se i fiksirali unutrašnji parametri fotoaparata, a to su veličine otvora blende i brzine zatvarača. Izbor veličina otvora blende i brzine zatvarača mora omogućiti oštru fotografiju radi lakše automatske obrade fotografija u programskom paketu. Izabrana je veličina otvora blende 11 koja će dati dobru dubinsku oštrinu fotografije što je važno kod snimanja objekata s veće udaljenosti. Brzina zatvarača postavlja se na veće vrijednosti da bi se onemogućila mutna fotografija zbog pomicanja fotoaparata, a kod snimanja sekcije izabrana je vrijednost 250.



Slika 77: Postavljanje kodiranih mjernih točaka i samoljepljive trake na vanjsku oplatu sekcije

Objekt velikog volumena kakav je izabrana sekcija potrebno je obići sa svih strana i snimiti s različitih visina, što je obavljeno pomoću pomične skele kako je prikazano slikom 78. Visina sekcije na potkladama bila je oko 5,5 m, a slične visine je i pomična skela.

Prvi problem koji se pojavio kod snimanja sekcije bio je njen položaj na međuskladištu gdje je bila okružena drugim sekcijama koje su stajale preblizu, pa je postavljanje skele bilo otežano.

Preporuke za korištenje fotogrametrije u kontroli dimenzija i oblika predmontiranih sekcija je postavljanje sekcija na međuskladište sa slobodnim prostorom od 5-6 m da bi se oko sekcija moglo proći sa pomičnom skelom.



Slika 78: Snimanje sekcije s pomične skele

Drugi problem koji se pojavio tokom snimanja sekcije vezan je za broj snimljenih fotografija i njihovu memorijsku veličinu. Snimljeno je 300 fotografija prosječne veličine 4 MB. Veći broj fotografija veće rezolucije i memorijske veličine omogućuje jednostavniju obradu fotografija na računalu te veću točnost mjernih rezultata. Nedostatak se sastoji u čestom zaustavljanju snimanja radi prebacivanja fotografija u prijenosno računalo te punjenju baterija fotoaparata i prijenosnog računala koji nisu mogli raditi u kontinuitetu duže od 2 sata, što nije dovoljno za cjelokupno snimanje. Baterije fotoaparata i prijenosnog računala morale su se napuniti, pa se postupak snimanja bitno usporio. Ovaj nedostatak bi se riješio spajanjem punjača baterija na prikladnu električnu mrežu od 220 V.

Preporuka za riješenje ovog problema koji se javlja je korištenje dodatnih setova baterija za fotoaparat koje će se promjeniti kada se baterije isprazne, te korištenje memorijskih kartica fotoaparata najvećeg kapaciteta.

Rad prijenosnog računala ne može se produžiti na ovaj način, već je potrebno prijenosno računalo spojiti na električnu mrežu i napon od 220 V. Ako takve mreže nema rad prijenosnog računala može se ograničiti na kratko vrijeme, kada se fotografije prebacuju s

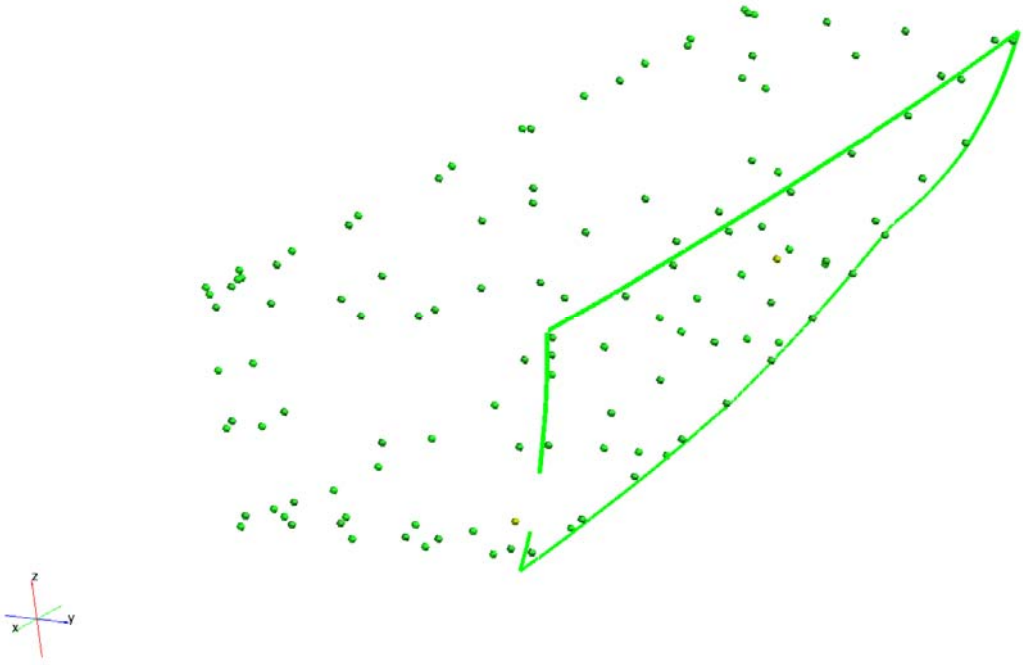
fotoaparata što zahtijeva dobro uhodanu mjeriteljsku ekipu koja mjerenje može napraviti bez pomoći prijenosnog računala. U tom slučaju obrada fotografija se radi naknadno nakon mjerenja, ali se tada odmah, na mjestu snimanja ne vide rezultati obrade. Ovdje se pod pojmom 'pomoć' prijenosnog računala podrazumjeva obrada fotografija u programskom paketu nakon prebacivanja pojedine grupe fotografija. Tada se istovremeno sa snimanjem druge grupe fotografija može na računalu pratiti obrada i mjerni rezultat prve grupe.

Ako na nekom dijelu mjernog objekta nije napravljen dovoljan broj fotografija ili mjerni volumeni nisu bili dobro preklopljeni, mjeritelj će dobiti upozorenje da napravi dodatnu grupu fotografija s kojima će ispraviti nedostatke. Posebno su kritična mjesta spoja dijelova mjernog objekta koji zatvaraju kut manji od 90º. Položaj mjernih točaka na fotografijama može biti nepovoljan, pa se mjerne točke u programskom paketu ne mogu prepoznati. Radi toga se postavljaju dodatne mjerne točke s gušćim rasporedom u blizini spoja dijelova sekcije pomoću kojih se povezuju mjerne točke na obje plohe u zajednički oblak mjernih točaka. Slikom 79 prikazan je primjer oštrog kuta između vanjske oplate i druge platforme sekcije.



Slika 79: Prijelaz vanjske oplate i druge platforme sekcije

Rezultat obrade fotografija u programskom paketu je oblak mjernih točaka i rub vanjske oplate kao što je prikazano slikom 80. U oblaku mjernih točaka sadržane su sve kodirane i nekodirane mjerne točke koje su postavljene na mjerni objekt. Pomoću njih se konstruiraju elementi mjerenja tj. plohe i rubovi svih dijelova sekcije koji će se koristiti u analizi rezultata mjerenja. U ovom mjerenju konstruirane su plohe i rubovi platforme strojarnice, uzdužne i poprečne pregrade, te vanjske oplate sekcije.



Slika 80: Oblak mjernih točaka dijelova sekcije i rub vanjske oplate

Nakon obrade fotografija i proračuna položaja mjernih točaka slijedi analiza mjernih rezultata predmontirane sekcije u koju spadaju:

- Kontrola oblika dijelova sekcije, gdje se kontrolira ravnoća uzdužne pregrade, poprečne pregrade na rebru 42 i druge platforme strojarnice, te oblik vanjske oplate.
- Kontrola međusobnog položaja dijelova sekcije, gdje se kontrolira okomitost i međusobna udaljenost dijelova sekcije. Obavlja se također poseban zadatak kontrole, a to je kontrola položaja donjeg ruba okvirnih rebara prema donjem rubu uzdužne pregrade. Donji bridovi okvirnih rebara i uzdužne pregrade moraju biti u istoj ravnini. Na tim elementima nužna je točnost, jer nemaju montažnog viška, a pri montaži sekcije u trup postavljaju se na ravnu platformu već postavljene sekcije.
- Kontrola mjera zadanih tehnološkom uputom izrade sekcije i mjernim skicama dimenzijske kontrole brodogradilišta.
- Kontrola dimenzija i oblika mjernih rezultata sekcije preklapanjem sa CAD modelom.

5.1.1. Kontrola oblika dijelova sekcije

Kontrola oblika dijelova sekcije sastoji se od kontrole ravnih i zakrivljenih dijelova strukture.

Kod ravnih dijelova strukture mjeri se odstupanje mjernih točaka od kontrolne ravnine, a kod zakrivljenih dijelova mjeri se odstupanje mjernih točaka od plohe CAD modela

zakrivljene strukture. Ravni dijelovi strukture sekcije sastoje se od uzdužne i poprečne pregrade i druge platforme strojarnice, a zakrivljeni dio je vanjska oplata.

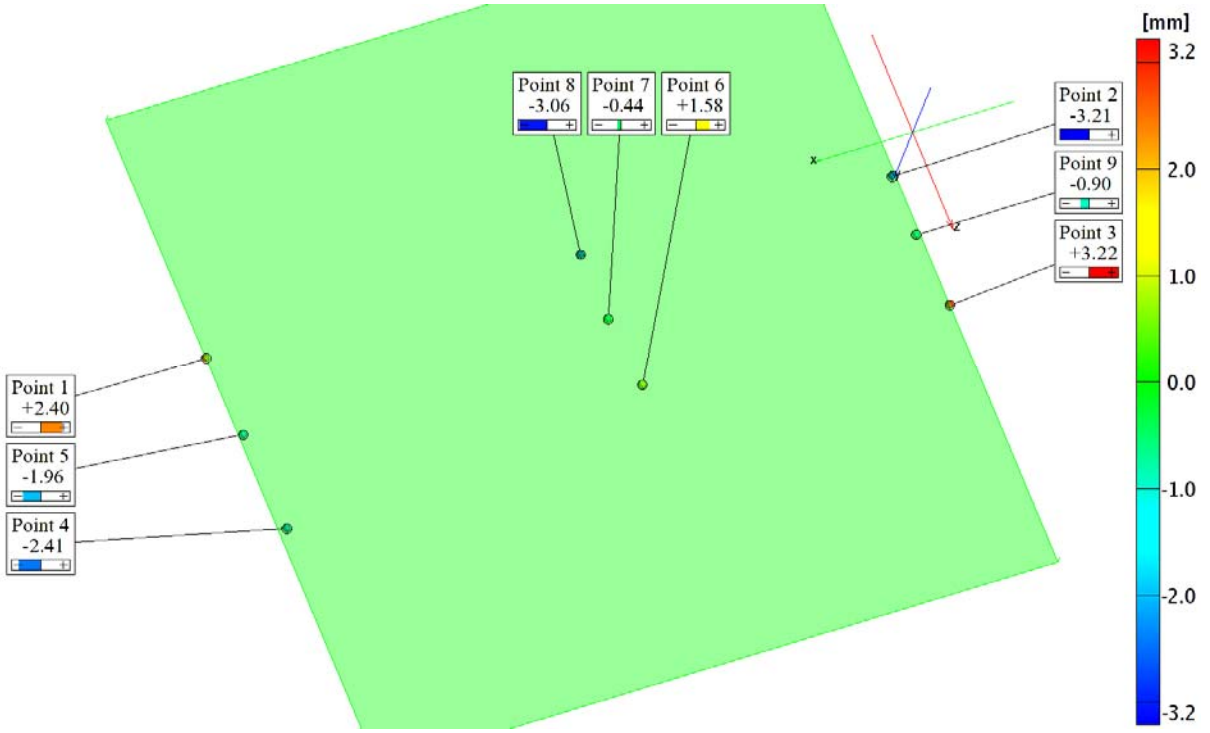
Rezultati mjerenja prikazuju se grafički i tablično. Vrijednosti odstupanja izraženi su u milimetrima. Na grafičkom prikazu rezultata u programskom paketu vrijednosti su izmjerene u stotinku milimetra što je nepotrebno za brodograđevne potrebe gdje se tolerance odstupanja izražavaju u milimetrima. Radi toga su u tabličnom prikazu vrijednosti zaokružene na desetinku milimetra, a u komentaru rezultata obuhvaćen je interval odstupanja izražen u milimetrima.

- **Kontrola ravnih dijelova strukture**

Slikom 81 prikazana je kontrola ravnoće uzdužne pregrade na kojoj se kontrolira odstupanje 9 mjernih točaka od kontrolne ravnine. Vrijednosti odstupanja mjernih točaka, prikazani također u tablici 6, nalaze se u rasponu od –3 mm do +3 mm, što zadovoljava vrijednosti dopuštenih odstupanja od 10 mm za brodograđevni proizvodni proces.

Tablica 6: Rezultati kontrole ravnoće uzdužne pregrade sekcije

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	+2.4	-3.2	+3.2	-2.4	-2.0
Mjerna točka broj	6	7	8	9	
Odstupanje [mm]	+1.6	-0.4	-3.0	-0.9	

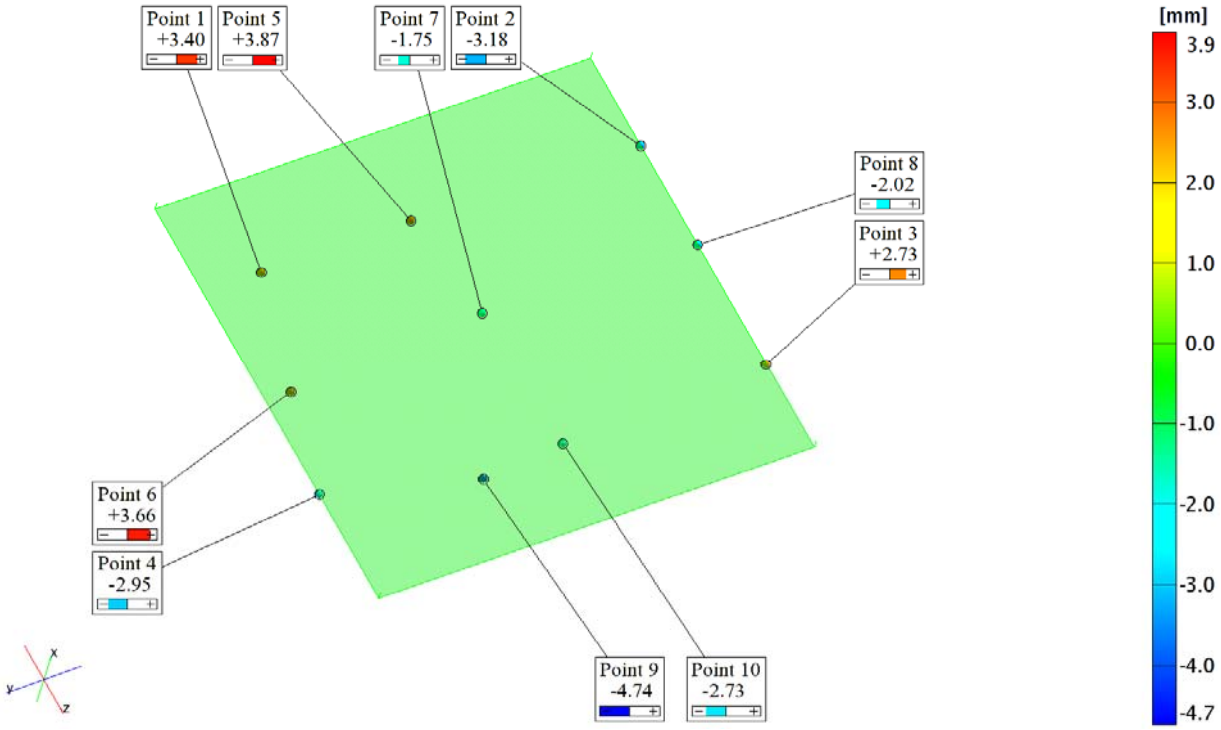


Slika 81: Kontrola ravnoće uzdužne pregrade sekcije

Kontrola ravnoće poprečne pregrade na rebru 42 prikazana je slikom 82, a vrijednosti odstupanja mjernih točaka dani su u tablici 7. Kontroliraju se odstupanja 10 mjernih točaka, a vrijednosti se nalaze u intervalu od –5 mm do 4 mm što je za brodograđevnu proizvodnju unutar dopuštenih odstupanja.

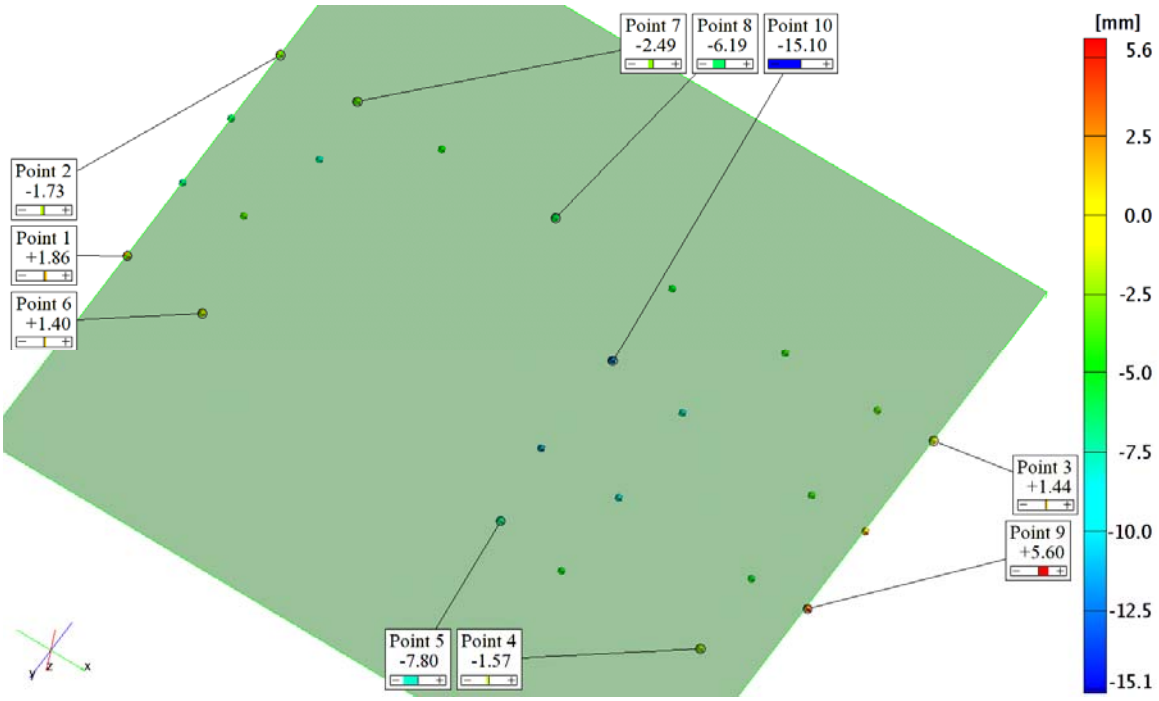
Tablica 7: Rezultati kontrole ravnoće poprečne pregrade sekcije

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	+3.4	-3.2	+2.7	-2.9	+3.8
Mjerna točka broj	6	7	8	9	10
Odstupanje [mm]	+3.6	-1.7	-2.0	-4.7	-2.73



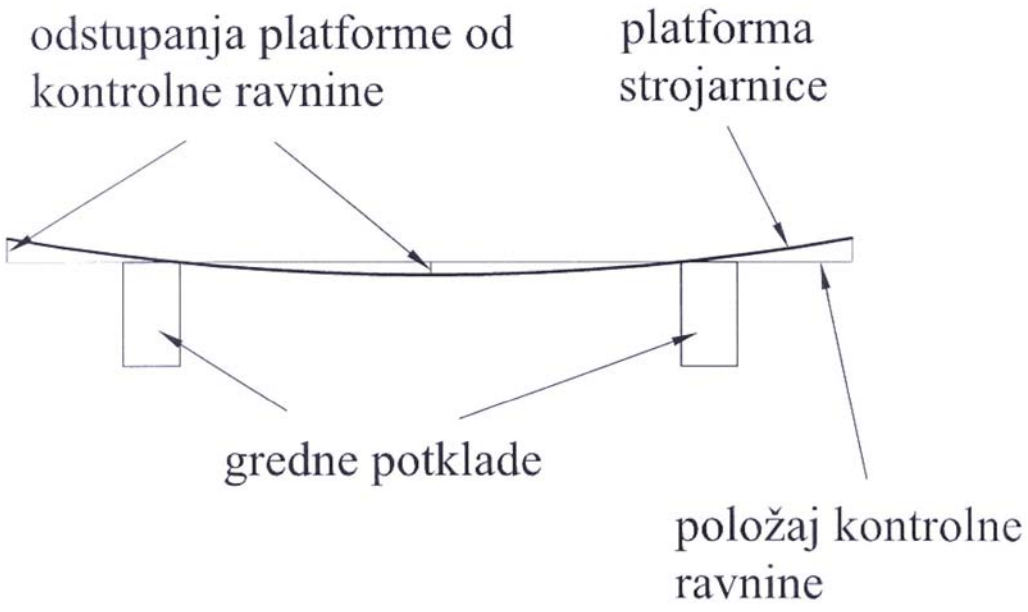
Slika 82: Kontrola ravnoće poprečne pregrade sekcije

Kontrola ravnoće druge platforme prikazana je slikom 83. Na platformi se kontrolira 10 mjernih točaka. Vrijednosti odstupanja prikazani su u tablici 8. Nalaze se u intervalu od -15 do +5 mm, a raspoređene su tako da su na krajevima platforme (mjerne točke 1,3,5,6) pozitivne vrijednosti, a u sredini negativne.



Slika 83: Kontrola ravnoće druge platforme sekcije

Razlog ovakvoj raspodjeli vrijednosti odstupanja mogu biti u lokalnim deformacijama platforme izazvanim postavljanjem sekcije na gredne potklade međuskladišta. Sekcija je bila oslonjena na dvije gredne potklade, te je uslijed težine na sredini mogao nastati progib, što je ilustrirano slikom 84.



Slika 84: Uzdužni presjek platforme na grednim potkladama

Tablica 8: Rezultati kontrole ravnoće druge platforme sekcije

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	+1.8	-1.7	+1.4	-1.5	-7.8
Mjerna točka broj	6	7	8	9	10
Odstupanje [mm]	+1.4	-2.5	-6.2	+5.6	-15.1

Temeljem kontrole ravnoće dijelova sekcije zaključuje se da nema većih odstupanja i da su gledajući pojedinačno dijelovi sekcije ravni.

- **Kontrola zakrivljenih dijelova strukture**

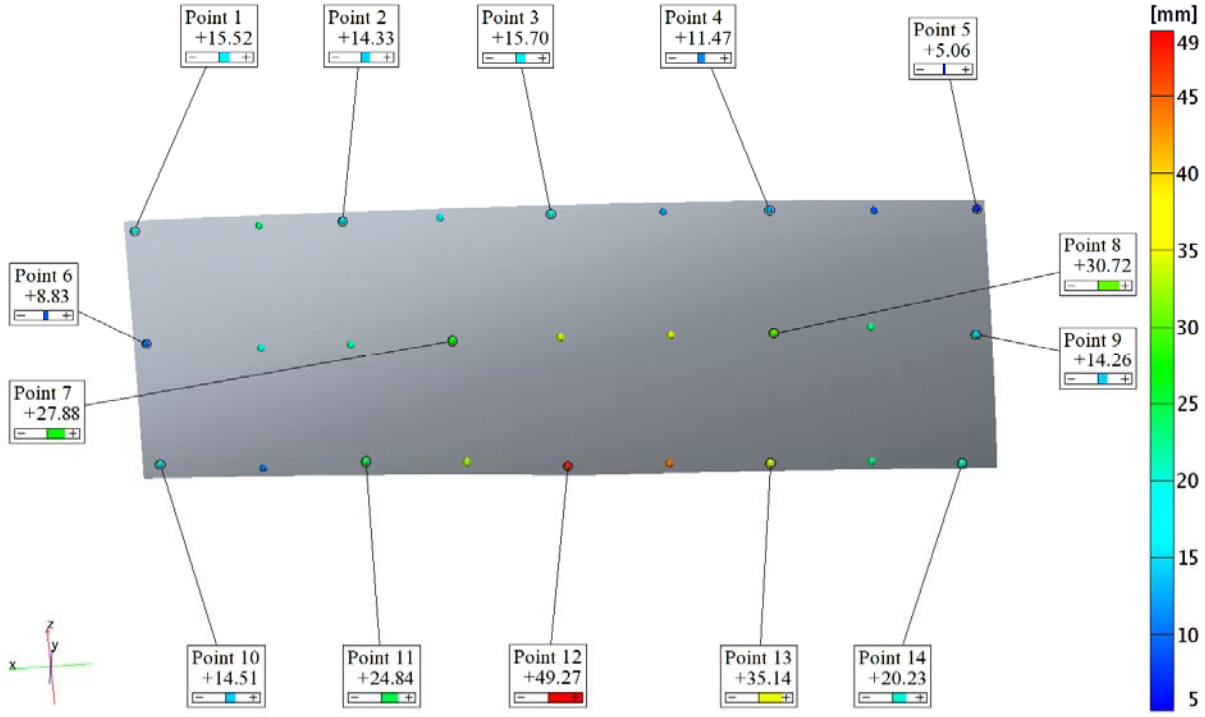
Kontrola zakrivljenih dijelova strukture obavljena je na vanjskoj oplati sekcije. Kontrolira se oblik vanjske oplate preklapanjem rezultata mjerenja napravljenih fotogrametrijskim sustavom i CAD modela u zajedničkom koordinatnom sustavu, kako je prikazano slikom 85. Mjerena su odstupanja mjernih točaka sekcije od plohe CAD modela, a za analizu rezultata uzeto je 14 mjernih točaka. Rezultati mjerenja dati su u tablici 9.

Tablica 9: Rezultati kontrole oblika vanjske oplate sekcije

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	+15.5	+14.3	+15.7	+11.4	+5.0
Mjerna točka broj	6	7	8	9	10
Odstupanje [mm]	+8.8	+27.9	+30.7	+14.2	+14.5
Mjerna točka broj	11	12	13	14	
Odstupanje [mm]	+24.8	+49.3	+35.1	+20.2	

Odstupanja svih mjernih točaka su pozitivnog predznaka, a vrijednosti se kreću od 5 do 50 mm. Odstupanja na dijelu gornjeg šava, gdje se nalaze mjerne točke od rednog broja 1 do 5, približno su jednaka i iznose oko 15 mm. Vrijednosti odstupanja povećavaju se prema sredini oplate (mjerne točke 7 i 8) gdje je vidljiva veća zakrivljenost od teorijske.

U području donjeg šava na krmenoj i pramčanoj strani (mjerne točke 10 i 14), vrijednosti odstupanja približno su jednaka onima na gornjem šavu, dok se na sredini donjeg šava pojavljuje vrijednost najvećeg odstupanja vanjske oplate od CAD modela u iznosu od 50 mm. Pregledom fotografija na tom dijelu vanjske oplate sekcije uočena je lokalna deformacija uzrokovana na mjestu zavara (stika) limova.



Slika 85: Kontrola oblika vanjske oplate sekcije

5.1.2. Kontrola položaja dijelova sekcije

Kontrola položaja dijelova sekcije provodi se unutar rezultata mjerenja sekcije napravljenih fotogrametrijskim sustavom. Kontrola se može sastojati od:

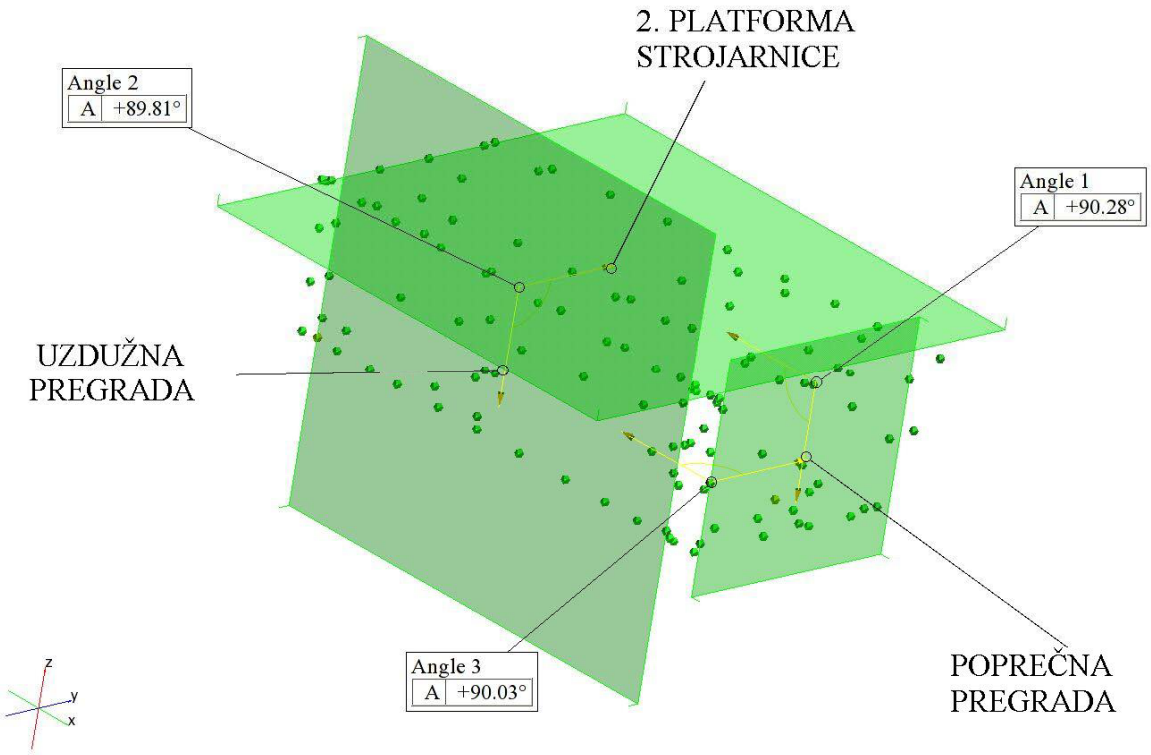
- kontrole kuteva između dijelova sekcije,
- kontrole udaljenosti između dijelova sekcije i
- posebnih zadataka kontrole položaja dijelova sekcije koji se mogu zahtjevati za pojedinu sekciju.

Rezultati mjerenja prikazuju se grafički i tablično, a uspoređuju se s teorijskim vrijednostima kuteva ili udaljenosti. Teorijske vrijednosti kuteva i udaljenosti definirane su radioničkim nacrtom sekcije.

- **Kontrola kuteva između dijelova sekcije**

Slikom 86 prikazana je kontrola okomitosti elemenata mjerenja napravljenih fotogrametrijskim sustavom. Kroz mjerne točke na uzdužnoj, poprečnoj pregradi i platformi strojarnice postavljene su ravnine, te je mjeren kut između ravnina. Kod kontrole kuteva u ovom primjeru, između dijelova sekcije teorijska vrijednost kuta iznosi 90 stupnjeva. Usporedbom rezultata ustanovljeno je da se izmjerene vrijednosti razlikuju od teorijskih za

najviše 1/3 stupnja. Rezultati mjerenja te usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti dana je u tablici 10.



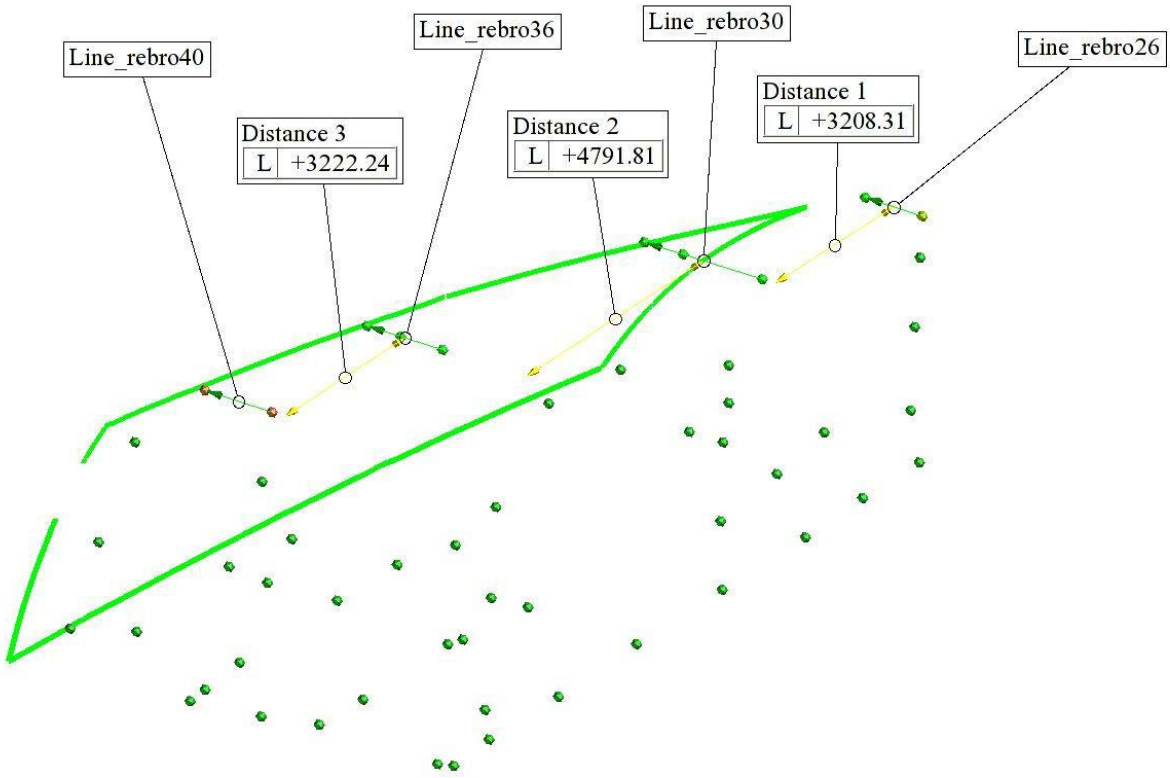
Slika 86: Kontrola okomitosti dijelova sekcije

Tablica 10: Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti kontrole okomitosti dijelova sekcije

Pozicija	Izmjerena vrijednost [°]	Teorijska vrijednost [°]	Razlika izmjerene i teorijske vrijednosti [°]
Uzdužna pregrada – poprečna pregrada	90.03	90	+ 0.03
Druga platforma strojarnice – poprečna pregrada	90.28	90	+0.28
Druga platforma strojarnice – uzdužna pregrada	89.81	90	- 0.19

- **Kontrola udaljenosti dijelova sekcije**

Slikom 87 prikazana je kontrola udaljenosti dijelova sekcije na primjeru mjerenja razmaka okvirnih rebara. Na okvirnim rebrima broj 26, 30, 36 i 40 postavljene su po dvije mjerne točke. Između mjernih točaka na svakom rebru konstruira se linija ruba, na slici označena nazivom 'Line_rebro'. Razmak okvirnih rebara dobiti će se mjerenjem udaljenosti konstruiranih rubova.



Slika 87: Kontrola udaljenosti dijelova sekcije

Izmjerene vrijednosti uspoređuju se s teorijskim, a rezultati su prikazani u tablici 11. Teorijski razmak rebara je 800 mm. Razlika izmjerenih i teorijskih vrijednosti u dva mjerenja je ±8 mm, a u trećem mjerenju +22 mm. Kod trećeg mjerenja udaljenost između rebara je veća, jer nije uzeta u obzir debljina lima na rebru 40. Mjerne točke na rebru 40 nisu postavljene s iste strane rebra kao kod ostalih rebara. Kad se uzme u obzir debljina lima rebra 40 koja iznosi 8 mm udaljenost između rebara je 3214 mm, a razlika izmjerenih i teorijskih vrijednosti je 14 mm.

Tablica 11: Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti kontrole udaljenosti dijelova sekcije

Udaljenost	Izmjerena vrijednost [mm]	Teorijska vrijednost [mm]	Razlika izmjerene i teorijske vrijednosti [mm]
Rebro 26 - Rebro 30	3208.3	3200	+ 8.3
Rebro 30 – Rebro 36	4791.8	4800	- 8.2
Rebro 36 – Rebro 40	3222.2	3200	+22.2

- **Posebni zadaci kontrole položaja elemenata**

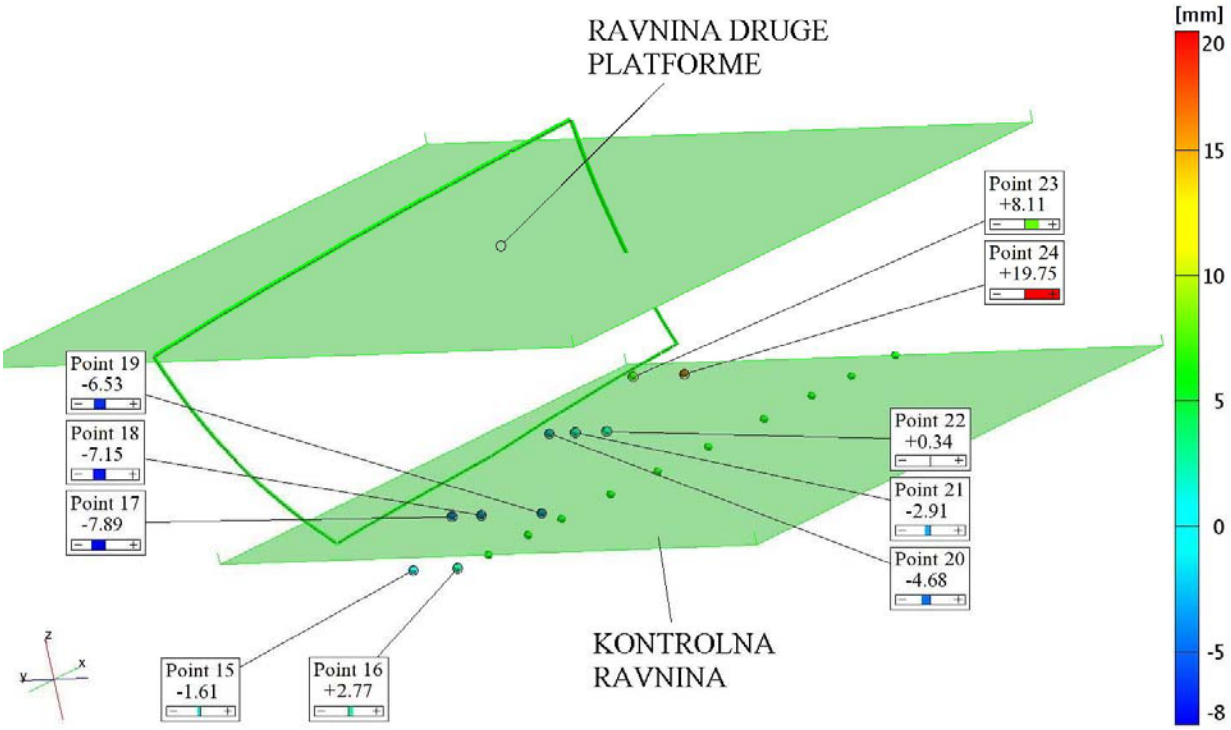
Osim prikazanih primjera mjerenja kuta i udaljenosti između dijelova sekcije, definiran je i specifičan zadatak kontrole položaja dijelova sekcije. Radi se o kontroli položaja okvirnih rebara prema uzdužnoj pregradi sekcije. Donji rubovi okvirnih rebara i donji rub uzdužne pregrade moraju se nalaziti u istoj ravnini koja je paralelna s ravninom platforme strojarnice. Prilikom montaže sekcije u trup na dilju, uzdužna pregrada i okvirna rebra postavljaju se na ravnu platformu prethodno montiranih sekcija. Točnost položaja okvirnih rebara i uzdužne pregrade je nužna, jer ovi dijelovi strukture obično nemaju montažni višak radi korekcije podrezivanjem.

U rezultatima mjerenja napravljenim fotogrametrijskim sustavom, kontrola se provodi tako da se kroz mjerne točke donjeg ruba uzdužne pregrade postavlja kontrolna ravnina paralelna s platformom strojarnice. Mjere se odstupanja mjernih točaka koje se nalaze na donjem rubu okvirnih rebara kako je prikazano slikom 88.

Zelenom bojom prikazane su mjerne točke donjeg ruba uzdužne pregrade, a mjerne točke okvirnih rebara postavljene su uz rub izabranih rebara. Mjerne točke s rednim brojevima 15 i 16 nalaze se na rebru 26, mjerne točke s rednim brojem 17, 18 i 19 nalaze se na rebru 30, mjerne točke s rednim brojem 20, 21 i 22 nalaze se na rebru 36, a mjerne točke s rednim brojem 23 i 24 nalaze se na rebru 40.

Vrijednosti izmjerenih odstupanja dane su u tablici 12. Na rebru 26 odstupanja iznose od – 2 do +3 mm, na rebru 30 oko –7 mm, na rebru 36 od –5 do 1 mm, dok na rebru 40 iznose od 8 do 20 mm. Pozitivne vrijednosti odstupanja znače da se točke na okvirnim rebrima nalaze iznad kontrolne ravnine, a negativne da su ispod kontrolne ravnine.

Kada se promatraju vrijednosti odstupanja, uočava se još jedna pravilnost, a to je da su na svim rebrima veće vrijednosti odstupanja točaka prema sredini tj. prema uzdužnoj pregradi. Najveća razlika je na rebru 40 i iznosi 11 mm. Izmjerene vrijednosti odstupanja mjernih točaka okvirnih rebara od kontrolne ravnine su unutar dozvoljenih odstupanja koja iznose 10 mm, osim na na rebru 40. Položaj rebra 40 nakon montaže sekcije potrebno je dodatno vizualno kontrolirati, jer je prilikom ovakve analize nemoguće simulirati ili predvidjeti elastičnost sekcije da bi se zaključilo što će se dogoditi na poziciji rebra 40 kada se sekcija montira. Kada bi se sekcija ponašala kao kruto tijelo moglo bi se zaključiti da će rebro 40 biti u zraku i da će trebati nadoknaditi nedostatak materijala, a kako je čelična konstrukcija elastična vjerojatno će se sva okvirna rebra osloniti na ravnu platformu.



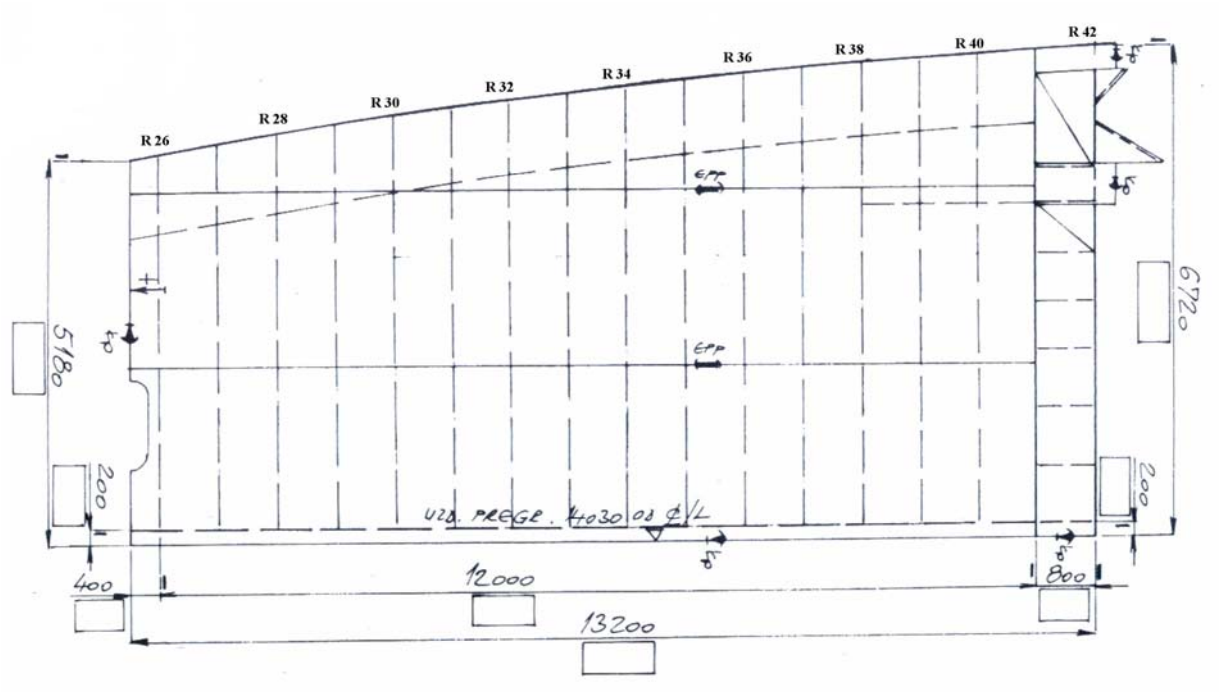
Slika 88: Kontrola položaja okvirnih rebara i uzdužne pregrade

Tablica 12: Izmjerena odstupanja mjernih točaka od kontrolne ravnine

Položaj rebra i mjerne točke		Izmjerena vrijednost odstupanja [mm]
Rebro 26	Mjerna točka br. 15	-1.61
	Mjerna točka br. 16	+2.77
Rebro 30	Mjerna točka br. 17	-7.89
	Mjerna točka br. 18	-7.15
	Mjerna točka br. 19	-6.53
Rebro 36	Mjerna točka br. 20	-4.68
	Mjerna točka br. 21	-2.91
	Mjerna točka br. 22	+0.34
Rebro 40	Mjerna točka br. 23	+8.11
	Mjerna točka br. 24	+19.75

5.1.3. Usporedba dimenzija i oblika sekcije s tehnološkom uputom

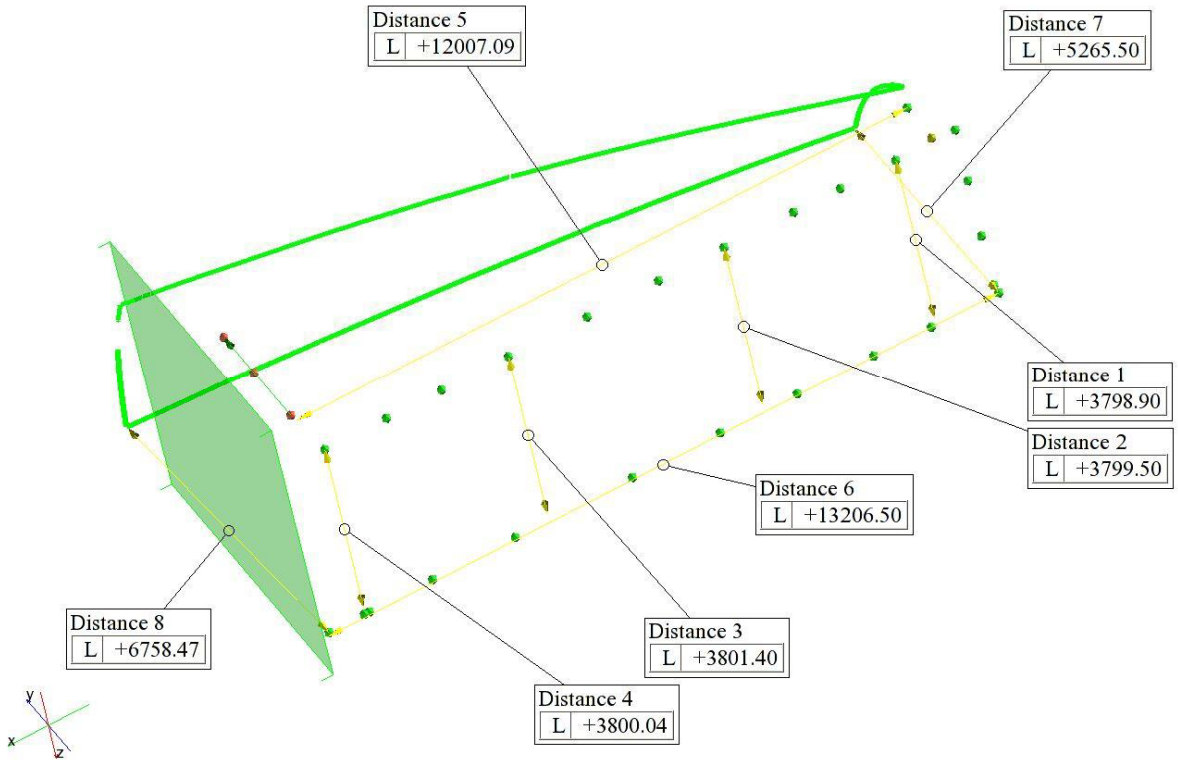
Tehnološke upute za izradu sekcije sadrže mjerne skice prema kojima se obavlja kontrola dimenzija. Primjer mjerne skice dimenzijske kontrole za izabranu sekciju prikazan je slikom 89. Na mjernoj skici definirane su mjere koje treba kontrolirati, a to su duljina, širina i visina sekcije, te udaljenosti uzdužne pregrade od ruba opločenja platforme. Naznačene su teorijske mjere, a u kvadratiće ispod upisuju se izmjerene vrijednosti.



Slika 89: Mjerne skice dimenzijske kontrole sekcije

Kontrola mjera zadanih tehnološkom uputom može se provesti u rezultatima mjerenja sekcije napravljenim fotogrametrijom. Slikom 90 prikazano je mjerenje zahtjevanih udaljenosti. Radi jasnijeg prikaza i lakšeg snalaženja, na slici su izdvojeni elementi mjerenja rub vanjske oplate, ravnina poprečne pregrade na rebru 42 i mjerne točke na uzdužnoj pregradi. Žutom kotom označena je udaljenost koja se mjeri, a njoj je pridružen kvadratić u kojem se nalazi naziv mjere i vrijednost u milimetrima. Visina sekcije izmjerena je na četiri mjesta uzdužne pregrade što je na slici označeno nazivom Distance 1-4. Zatim, izmjerena je duljina sekcije, širina na pramčanom i krmenom dijelu te udaljenost između rebara 26 i 41.

U tablici 13 nalaze se rezultati mjerenja te usporedba s teorijskim vrijednostima. Vrijednosti odstupanja su po duljini i visini sekcije unutar tolerancijskih granica, a veće vrijednosti odstupanja se uočavaju kod mjerenja širine. Na pramčanom dijelu izmjerena vrijednost se razlikuje od teorijske za 38 mm, dok je na krmenom dijelu razlika 85 mm. Ova razlika je realno manja za vrijednost montažnog viška od 30 mm koji se nalazi na šavu druge platforme strojarnice. Uzevši u obzir korekciju vrijednosti, razlika bi na pramčanom dijelu bila 8 mm, što je prihvatljiva vrijednost, dok na krmenom dijelu ostaje odstupanje od 55 mm, što nije zanemarivo, a regulirat će se prilikom montaže sekcije.



Slika 90: Mjerenje udaljenosti zadanih mjernim skicama dimenzijske kontrole

Tablica 13: Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti u kontroli udaljenosti

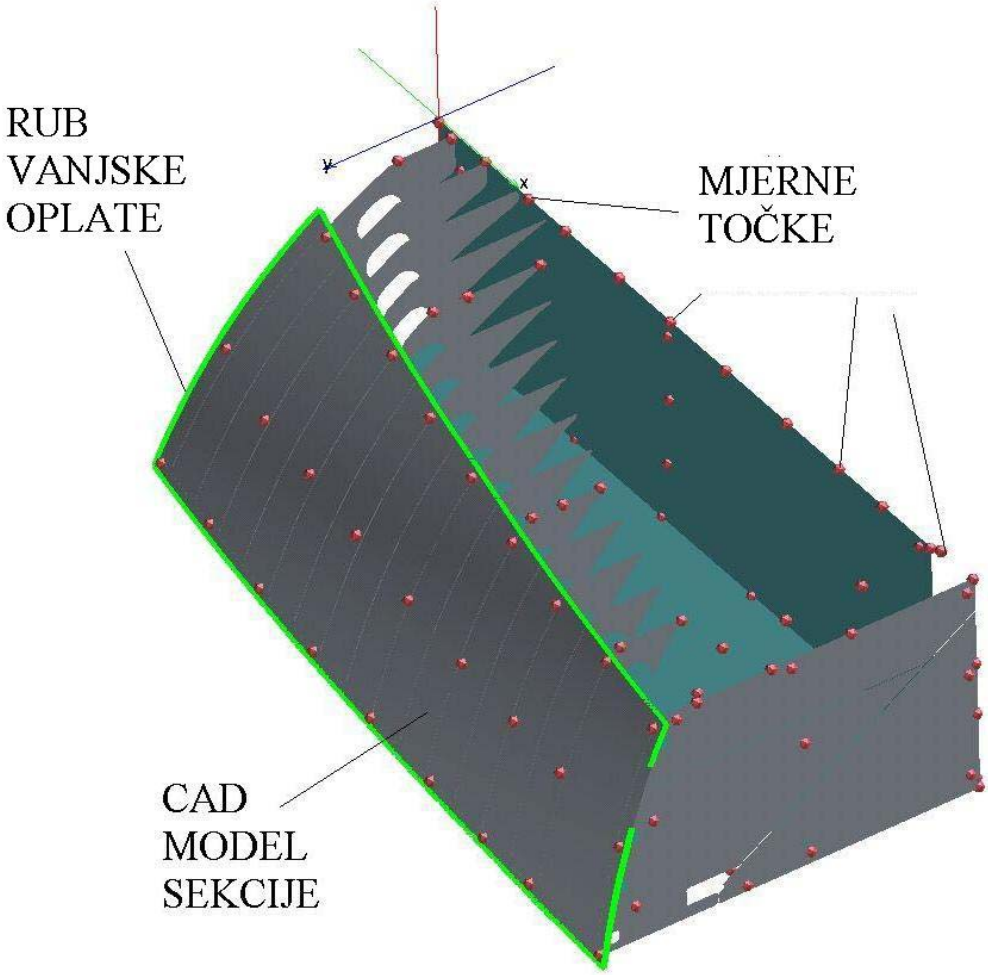
Mjerenje		Izmjerena vrijednost [mm]	Teorijska vrijednost [mm]	Razlika izmjerene i teorijske vrijednosti [mm]
Visina sekcije	Udaljenost 1	3798.9	3800	- 1.1
	Udaljenost 2	3799.5		- 0.5
	Udaljenost 3	3801.4		+ 1.4
	Udaljenost 4	3800.0		0.0
Duljina sekcije	Udaljenost 6	13206.5	13200	+ 6.5
Širina sekcije na pramčanom dijelu	Udaljenost 8	6758.4	6720	+ 38.4
Širina sekcije na krmenom dijelu	Udaljenost 7	5265.5	5180	+ 85.5
Udaljenost između rebara 26 i 41	Udaljenost 5	12007.1	12000	+ 7.1

5.1.4. Usporedba dimenzija i oblika sekcije sa CAD modelom

Kontrola dimenzija i oblika sekcije preklapanjem sa CAD modelom obavlja se tako da se u zajednički koordinatni sustav postavljaju rezultati mjerenja i CAD model sekcije. Preklapanje, prikazano slikom 91, obavlja se istovremenim preklapanjem uzdužne pregrade, poprečne pregrade i platforme CAD modela sekcije s istim elementima mjerenja metodom

kvadrata najmanjih odstupanja. Preklapanje preko tri međusobno okomite ravnine obuhvatit će sva rotacijska i translacijaska gibanja rezultata mjerenja i CAD modela. Na slici su dijelovi CAD modela prikazani sivom bojom, dok su mjerne točke crvene, a rub vanjske oplate zelene boje.

Analiza odstupanja prikazana je posebno za svaki dio sekcije, a odstupanje izraženo u milimetrima je najmanja udaljenost pojedine mjerne točke od plohe CAD modela. Rezultati analize prikazuju se grafički i tablično. U grafičkom prikazu su plohe CAD modela i mjerne točke dijela sekcije koji se kontrolira. Izabranim mjernim točkama pridružena je vrijednost odstupanja i identifikacijsko ime, a to su ujedno i podaci koji se nalaze u tablici rezultata.



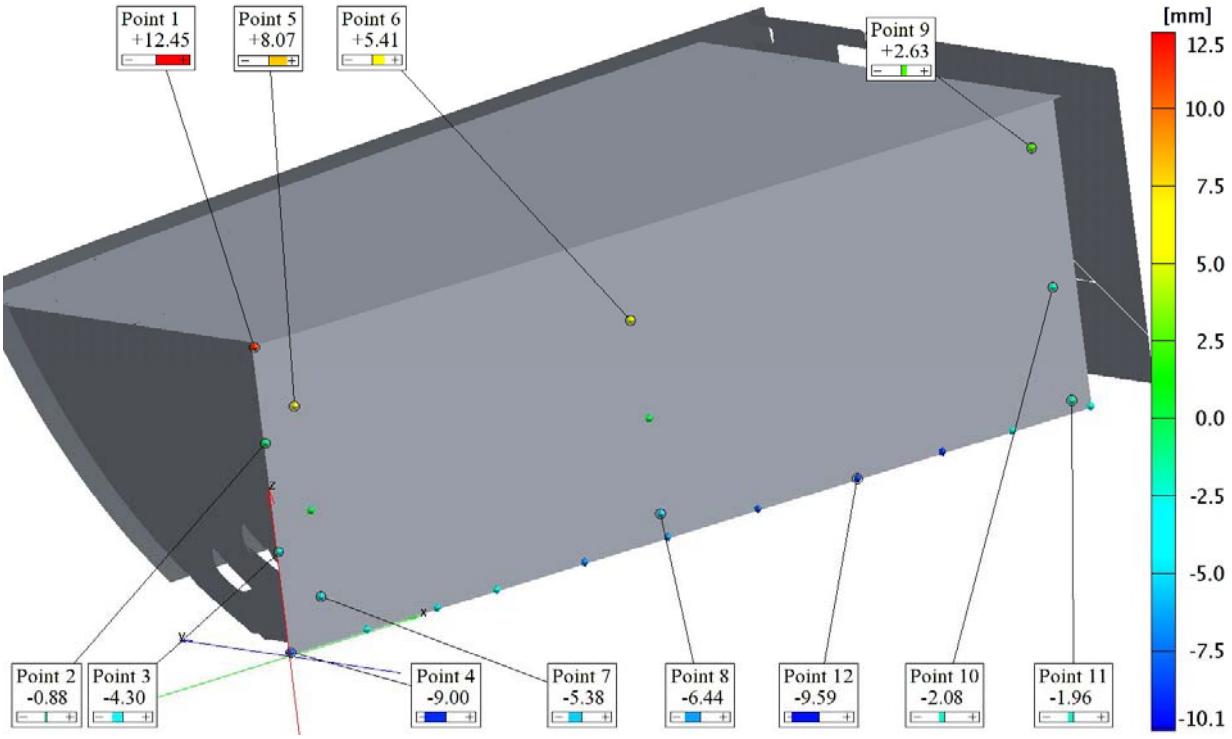
Slika 91: Preklapanje rezultata mjerenja i CAD modela sekcije

Slikom 92 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka uzdužne pregrade od CAD modela sekcije. Za kontrolu je uzeto 12 mjernih točaka uzdužne pregrade čije su vrijednosti odstupanja u intervalu od –10 do +12 mm, što je prihvatljivo za brodograđevne standardne. Vrijednosti odstupanja su pozitivnog i negativnog predznaka i pravilno su raspoređene po

pregradi. Pozitivne vrijednosti odstupanja su u gornjem dijelu pregrade prema drugoj platformi, a negativne u donjem dijelu, što znači da je pregrada sekcije u odnosu na pregradu CAD modela u donjem dijelu šira tj. otvorenija. Ovo odstupanje će se regulirati pri montaži sekcije u trup kada se uzdužna pregrada postavlja na teorijski položaj. Vrijednosti odstupanja mjernih točaka uzdužne pregrade od CAD modela dane su u tablici 14.

Tablica 14: Rezultati kontrole odstupanja uzdužne pregrade sekcije od CAD modela

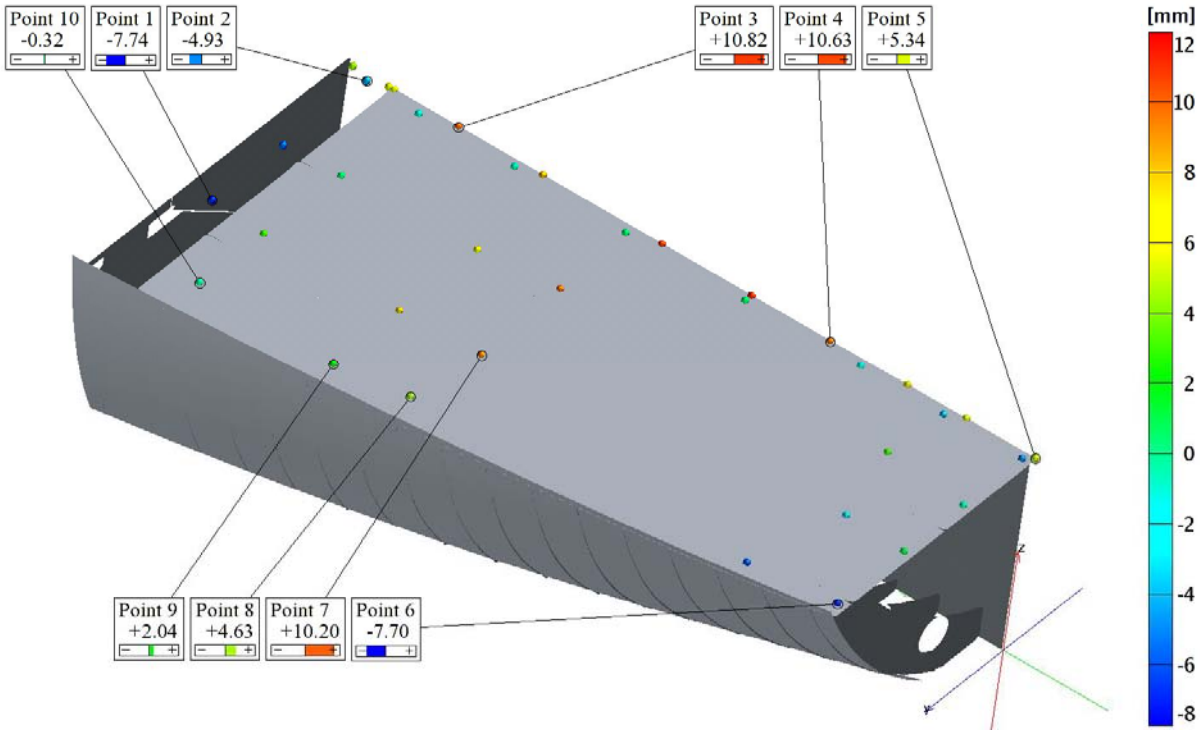
Mjerna točka broj	1	2	3	4	5	6
Odstupanje [mm]	+12.4	-0.9	-4.3	-9.0	+8.0	+5.4
Mjerna točka broj	7	8	9	10	11	12
Odstupanje [mm]	-5.4	-6.4	+2.6	-2.0	-2.0	-9.6



Slika 92: Odstupanja mjernih točaka uzdužne pregrade od CAD modela sekcije

Slikom 93 prikazana je analiza odstupanja 10 mjernih točaka na drugoj platformi sekcije od CAD modela. Izabrane su mjerne točke uz rub opločenja te na sredini platforme. Vrijednosti odstupanja su u intervalu od –8 do +11 mm. Pozitivne su vrijednosti odstupanja uz rub opločenja prema uzdužnoj pregradi i na sredini platforme, a negativne na krajevima u pramčanom i krmenom dijelu. Razlog takvom rasporedu odstupanja je način oslanjanja sekcije na potkladama u međuskladištu, gdje je sekcija u preokrenutom položaju, pa dolazi do lokalnih deformacija strukture pogotovo uz rub opločenja gdje su slobodni krajevi.

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka od CAD modela druge platforme strojarnice dane su u tablici 15.



Slika 93: Odstupanja mjernih točaka druge platforme od CAD modela sekcije

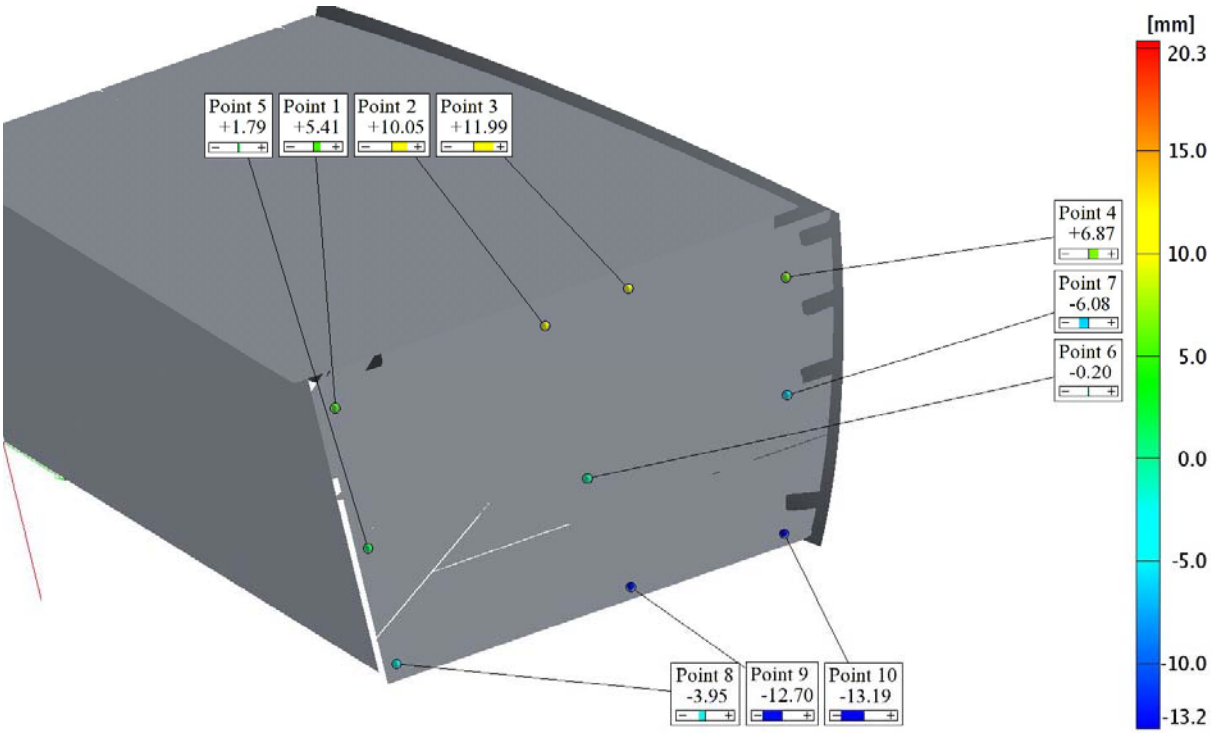
Tablica 15: Rezultati kontrole odstupanja druge platforme sekcije od CAD modela

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	-7.7	-4.9	+10.8	+10.6	+5.3
Mjerna točka broj	6	7	8	9	10
Odstupanje [mm]	-7.7	+10.2	+4.6	-2.0	-0.3

Slikom 94 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka poprečne pregrade u odnosu na CAD model. Vrijednosti odstupanja, prikazane također u tablici 16, nalaze se u intervalu od –13 do + 12 mm, a raspoređene su tako da su pozitivne vrijednosti odstupanja u gornjem dijelu pregrade, a negativne u donjem dijelu. Uočena odstupanja pravilno su raspoređena po pregradi, a korigirat će se prilikom montaže sekcije u trup broda. Vrijednosti odstupanja mjernih točaka od CAD modela poprečne pregrade dane su u tablici 16.

Tablica 16: Rezultati kontrole odstupanja poprečne pregrade sekcije od CAD modela

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje [mm]	+5.4	10.0	+12.0	+6.8	+1.8
Mjerna točka broj	6	7	8	9	10
Odstupanje [mm]	-0.2	-6.0	-4.0	-12.7	-13.2



Slika 94: Odstupanja mjernih točaka poprečne pregrade od CAD modela sekcije

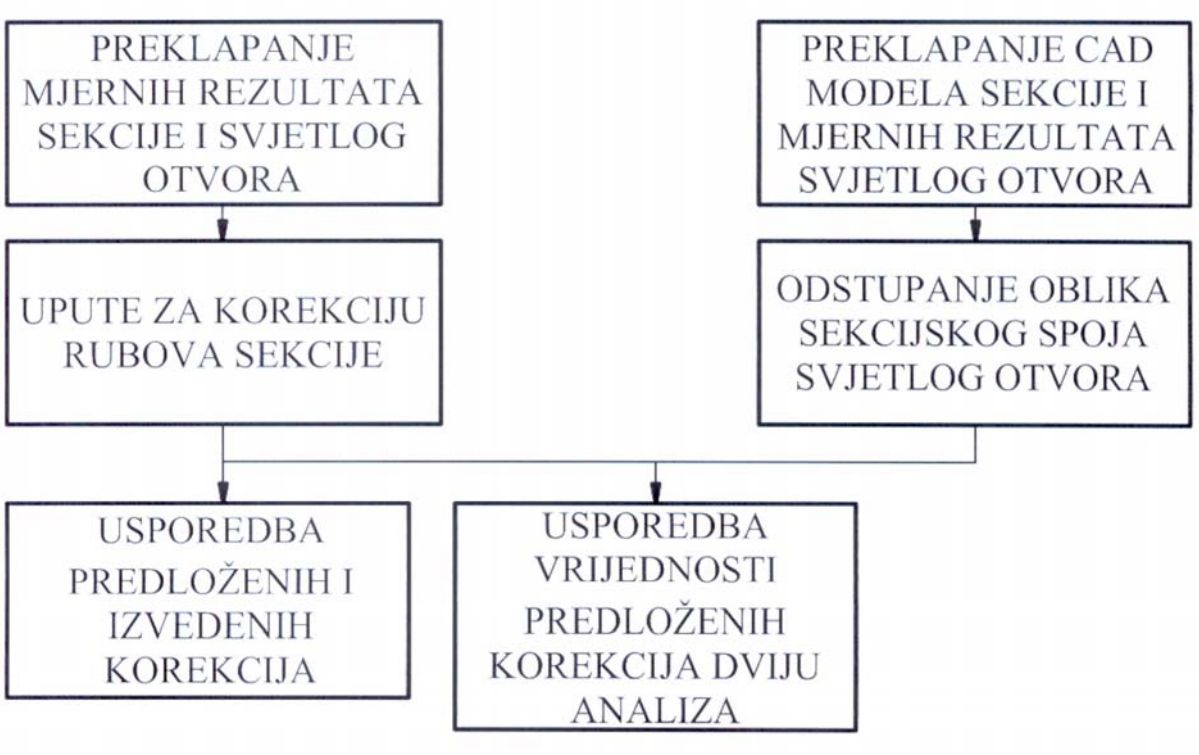
5.2. Kontrola dimenzija i oblika sekcije pri montaži

Zadatak kontrole dimenzija i oblika sekcije u fazi montaže sastoji se u analizi odstupanja spoja rubova sekcije i pozicija na trupu broda gdje se sekcija montira. Mjerenje se obavlja fotogrametrijskim sustavom. Za kontrolu odstupanja sekcijskog spoja potrebna su dva mjerenja:

- Mjerenje sekcije fotogrametrijskim sustavom. Rezultati mjerenja služe za konstruiranje ruba sekcijskog spoja na sekciji.
- Mjerenje na poziciji na brodu gdje se sekcija montira u trup. Takvo mjesto se u brodograđevnoj terminologiji zove 'svjetli otvor'. Rezultati mjerenja služe za konstruiranje ruba sekcijskog spoja na svjetlom otvoru.

Postupak mjerenja jednak je za oba mjerna objekta, a provodi se kako je prikazano dijagramom toka na slici 74 u poglavlju 5.

U fazi montaže karakteristično je da se analiza odstupanja provodi uspoređivanjem mjernih rezultata sekcije i svjetlog otvora preklopljenih u zajedničkom koordinatnom sustavu s definiranim kriterijima preklapanja. Preklapanje rezultata mjerenja u programskom paketu obavlja se metodom najmanjih kvadratnih odstupanja. Analiza odstupanja rubova na sekcijskom spoju sekcije provodi se dvojako, kako je prikazano dijagramom toka na slici 95.

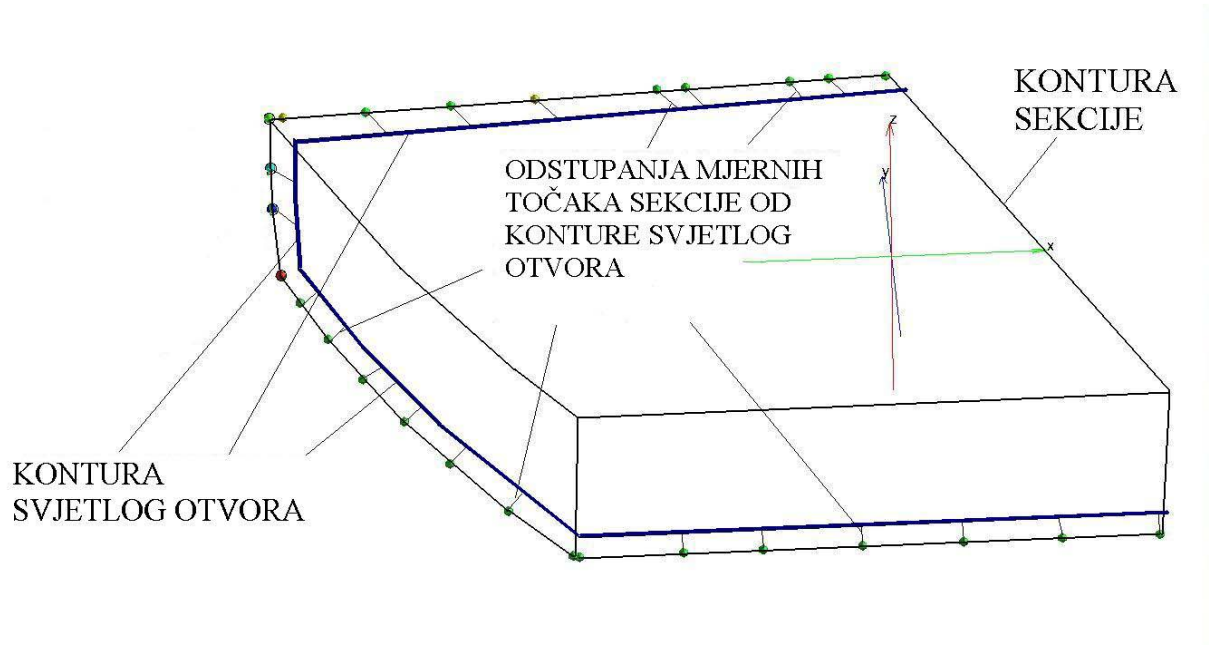


Slika 95: Dijagram toka analize mjernih rezultata pri montaži sekcija

Prvo treba u zajednički koordinatni sustav preklopiti mjerne rezultate sekcije i svjetlog otvora. Analiza odstupanja rubova na sekcijskom spoju dati će upute za korekciju ruba sekcije da bi se montaža sekcije obavila uz što manje korekcija na dilju.

Nakon toga treba CAD model sekcije s mjernim rezultatima svjetlog otvora preklopiti u zajednički koordinatni sustav. Rezultati analize su odstupanja oblika konture svjetlog otvora koja su nastala montažom prethodnih sekcija u trup broda.

U oba slučaja mjere se odstupanja mjernih točaka na rubovima sekcije od konture svjetlog otvora kako je prikazano slikom 96. Položaj ruba svjetlog otvora proglašava se pri tom kao nepomičan i referentan.



Slika 96: Mjerenje odstupanja mjernih točaka sekcije od konture svjetlog otvora

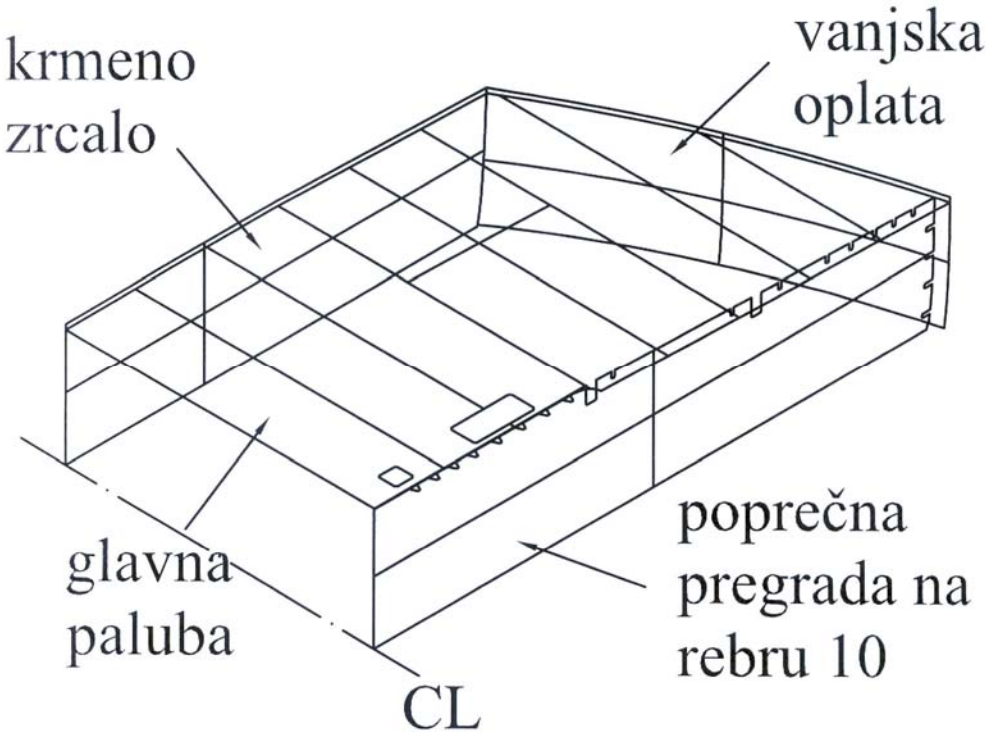
Da bi se ocijenila točnost fotogrametrijske metode i pouzdanost rezultata mjerenja vrijednosti predloženih korekcija ruba sekcije usporedile su se s vrijednostima stvarnih korekcija izvedenih rezanjem preklopa opločenja prilikom montaže sekcije u trup broda.

Osim toga, radi se usporedba vrijednosti predloženih korekcija dvaju napravljenih analiza da bi se procjenila dimenzijska točnost sekcije, te utjecaj metode preklapanja na rezultate mjerenja. Ako je utjecaj metode preklapanja u računalu na rezultate mjerenja značajan, rezultati mjerenja postaju nepouzdani i ne mogu se koristiti u izradi uputa za korekciju brida sekcije.

5.2.1. Mjerenje sekcije

Mjerenje sekcije fotogrametrijskim sustavom uključuje poznavanje njene strukture. Sekcija na krmi broda sastoji se od glavne palube, vanjske oplate na boku i krmenog zrcala, te poprečne pregrade na rebru 10, kao što je prikazano na slici 97.

Na sekciju su postavljene samoljepljive kodirane i nekodirane mjerne točke promjera 30 mm. Probnim fotografijama određena je potrebna udaljenost mjeritelja od objekta da se fotografijom zauzme što veći mjerni volumen, a da se ne ugroze osnovni zahtjevi mjerenja fotogrametrijskim sustavom, kao što su veličina centra mjerne točke veća od 10 pixela te 6 i više kodiranih mjernih točaka na jednoj fotografiji.



Slika 97: Aksonometrijski prikaz sekcije

Sekcija je snimljena ispred čela dilja prije montaže u trup broda. Postavljena je u uspravan položaj, poprečnom pregradom i vanjskom oplatom oslonjena na drvene gredice. Kodirane mjerne točke postavljane su po vanjskim plohama građevnih jedinica sekcije, a to su poprečna pregrada na rebru 10, vanjska oplata na boku i krmeno zrcalo. Nekodirane mjerne točke su postavljene na rubovima sekcijskog spoja koji je određen donjim rubom poprečne pregrade, rubom palube i boka na stiku ispred rebra 10, donjim rubom vanjske oplate boka i krmenog zrcala. Položaj mjernih točaka na sekciji prikazan je primjerima na slikama 98 i 99.

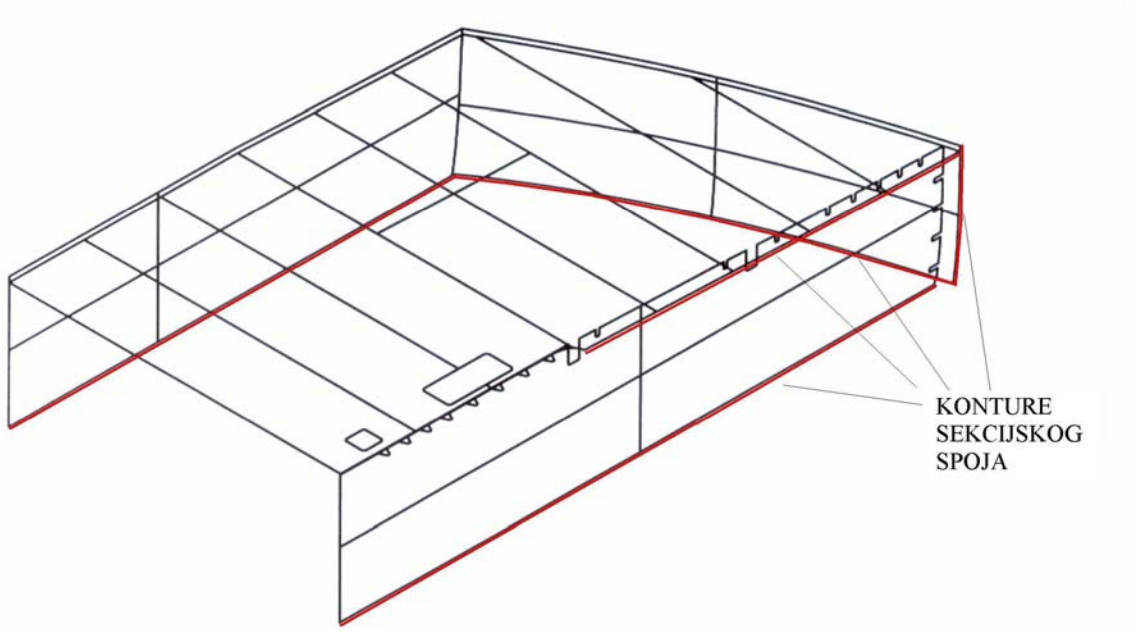


Slika 98: Mjerne točke na poprečnoj pregradi na rebru 10



Slika 99: Mjerne točke na vanjskoj oplati na boku broda

Kontura sekcijskog spoja prikazana je slikom 100 gdje se vidi struktura sekcije, te sekcijski spoj istaknut crvenom bojom.



Slika 100: Kontura sekcijskog spoja

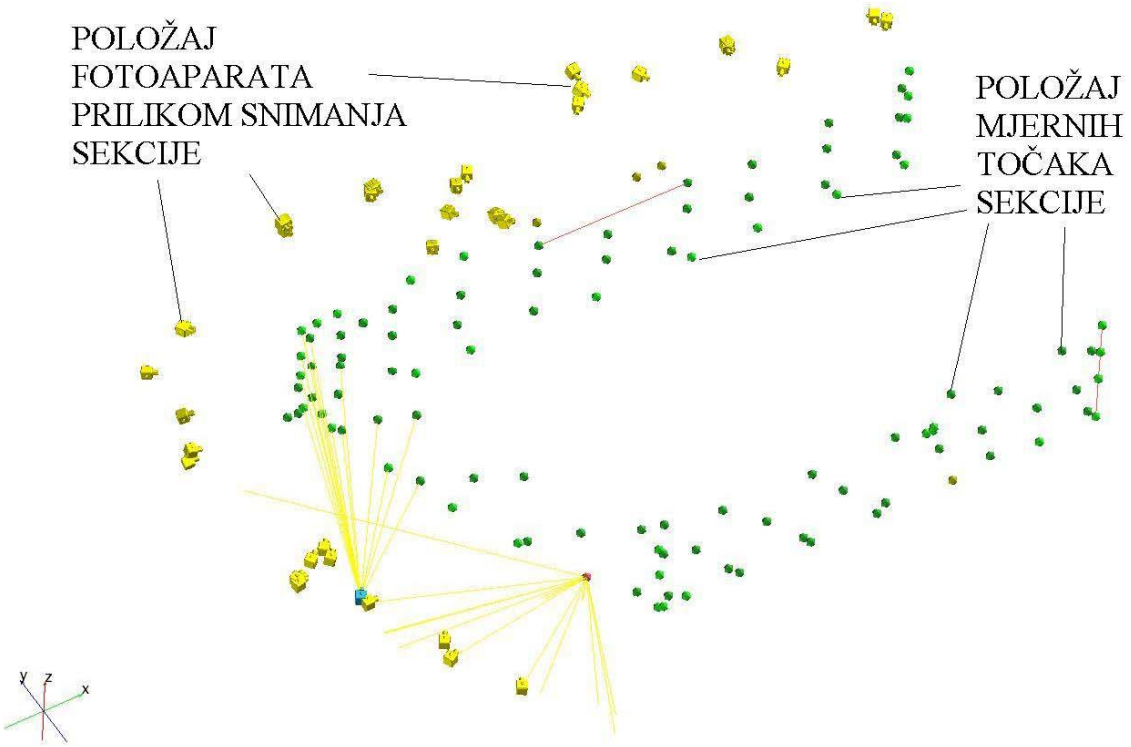
Nakon postavljanja mjernih točaka slijedi namještanje parametara fotoaparata i njihovo fiksiranje. Veličina otvora blende je 11, a brzina zatvarača 250.

Snimanjem se obilazi oko cijele sekcije, a radi točnosti mjernih rezultata treba je snimiti iz barem dvije visine snimanja. Sekcija je ispred dilja oslonjena na drvene grede na podu, pa je prvi nivo snimanja stajaća visina mjeritelja. Za snimanje s drugih nivoa korištene su okolne sekcije.

Nakon obavljenog snimanja, obrade fotografija i proračuna u programskom paketu rezultati mjerenja prikazani su na slici 101. Na slici 101 prikazan je prostorni položaj mjernih točaka, te položaj fotoaparata prilikom snimanja sekcije. Na slici su također na jednom primjeru prikazani pravci optičkih zraka iz jednog fotoaparata do mjernih točaka koje se vide u tom pogledu. U drugom primjeru prikazani su pravci optičkih zraka koje dolaze u jednu mjernu točku iz svih položaja fotoaparata koji tu točku vide.

Iz oblaka mjernih točaka konstruiraju se elementi mjerenja tj. plohe poprečne pregrade, vanjske oplate i krmenog zrcala, te rubovi sekcijskog spoja na šavu i stikovima koji će se koristiti za analizu rezultata mjerenja. Pri tom je potrebno uzeti u obzir da se u programskom paketu odredilo središte mjerne točke, a ne realni položaj ruba, pa je potrebno konstruiranu liniju ruba pomaknuti za vrijednost širine nekodirane točke koja u ovom mjerenju iznosi 33.5

mm. Ovisno o kojem se rubu sekcije ili pozicije na brodu radi, pomaci se izvode u smjeru koordinatnih osi X, Y i Z.



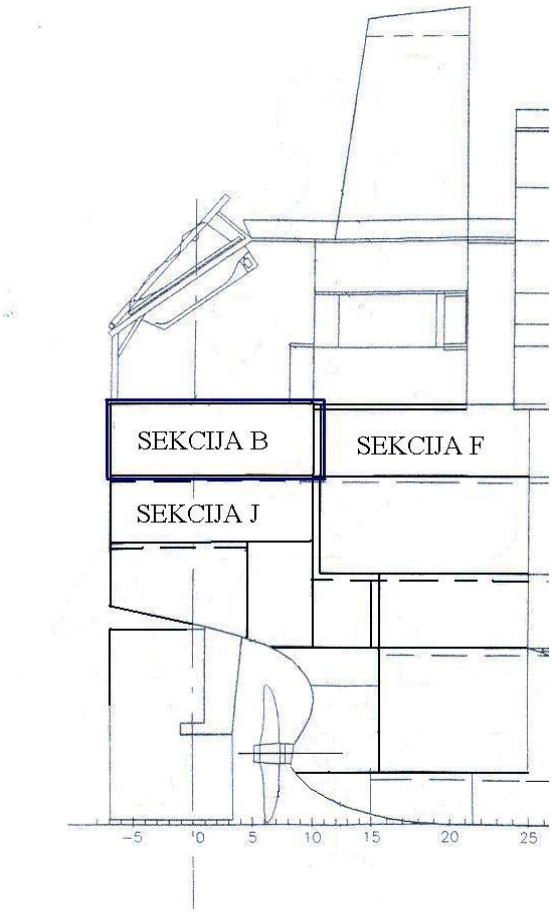
Slika 101: Položaj fotoaparata i mjernih točaka kod snimanja sekcije

5.2.2. Mjerenje svjetlog otvora na trupu broda

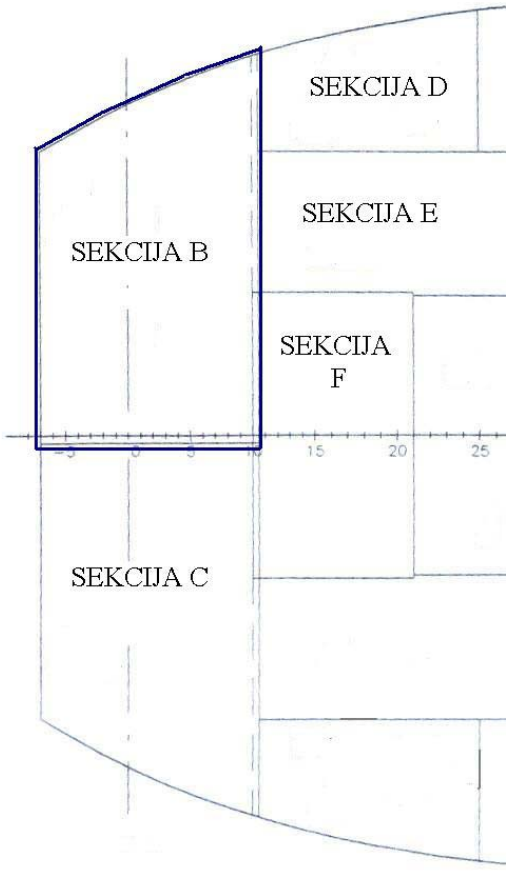
Drugo mjerenje napravljeno je na brodu na poziciji gdje se sekcija ugrađuje u trup tj. na svjetlom otvoru. Dok postupak mjerenja sekcije zahtijeva poznavanje njene strukture, za planiranje i izradu mjerenja svjetlog otvora potrebno je poznavati strukturu okolnih sekcija na koje se sekcija montira. Slikama 102 i 103 prikazani su dijelovi nacrta na kojima je prikazan položaj sekcije B na brodu te raspored okolnih sekcija.

Na slici 102 prikazan je uzdužni presjek broda. Sekcija se postavlja na palubu sekcije koja se nalazi ispod. Na palubi, sekcija se spaja sa drugim sekcijama koje se nalaze ispred sekcije, kako je prikazano slikom 103. Na slici 103 prikazan je pogled na glavnu palubu.

Mjerne točke postavljaju se na plohe i bridove sekcija koje su već montirane u trup broda. Kodirane mjerne točke postavljaju se na plohe sekcija, a nekodirane postavljaju se na rub svjetlog otvora. Primjeri postavljanja mjernih točaka prikazani su slikama 104 i 105.



Slika 102: Položaj sekcije na brodu - uzdužni presjek



Slika 103: Položaj sekcije na brodu - pogled na glavnu palubu



Slika 104: Mjerne točke na sekcijama svjetlog otvora

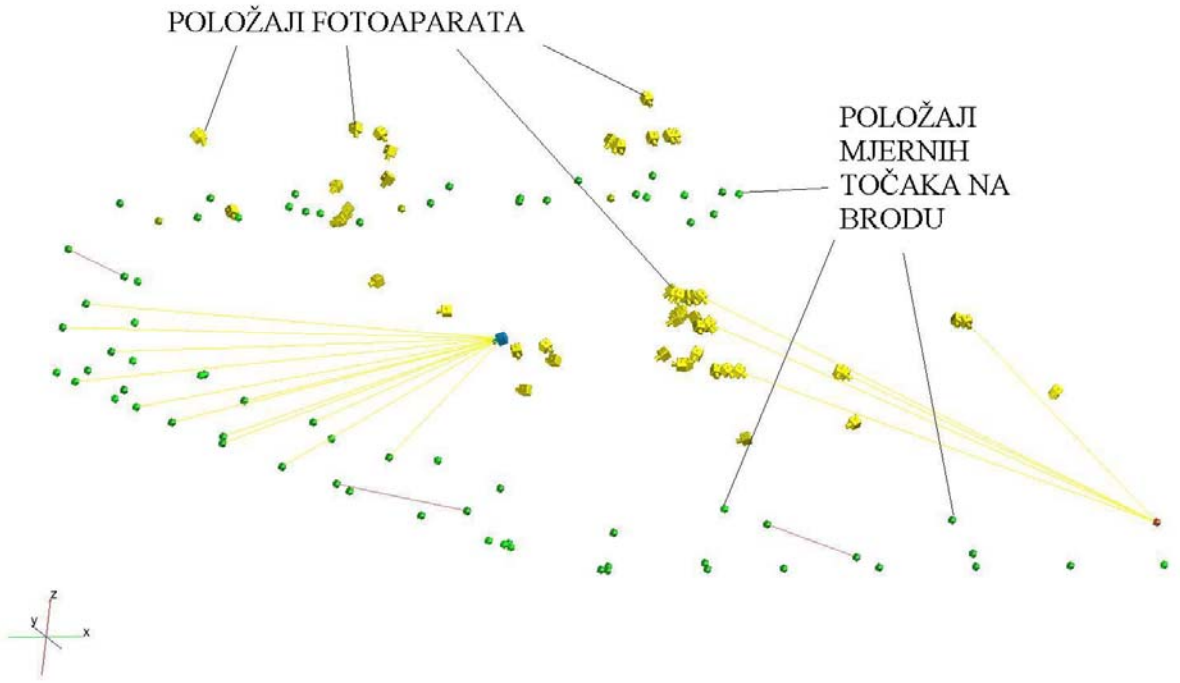


Slika 105: Mjerne točke na sekcijama svjetlog otvora

Parametri fotoaparata, otvor blende i brzina zatvarača ostaju isti kao i kod snimanja sekcije, te slijedi snimanje svjetlog otvora. Osnovni nivo snimanja je paluba svjetlog otvora, a za druge nivoe snimanja korištena je struktura montiranih sekcija kao i pomoćne visine koje se mogu iskoristiti na brodu, a to su ljestve, skele i slično.

Kao i na primjeru mjerenja sekcije fotogrametrijskom metodom, nakon obavljenog snimanja, obrade fotografija i proračuna u programskom paketu rezultati mjerenja prikazani su na slici 106. Na slici 106 prikazan je prostorni položaj mjernih točaka te položaj fotoaparata prilikom snimanja svjetlog otvora. Na slici su također prikazani pravci optičkih zraka iz jednog fotoaparata do mjernih točaka koje se vide u tom pogledu, te pravci optičkih zraka koje dolaze u jednu mjernu točku iz svih položaja fotoaparata koji tu točku vide.

Rezultati mjerenja sadržani su u oblaku mjernih točaka u kojem se konstruiraju rubovi sekcijskog spoja i plohe svjetlog otvora. Kao i kod mjerenja sekcije potrebno je uzeti u obzir da se u programskom paketu odredilo središte mjerne točke, a ne realni položaj ruba, pa je potrebno konstruiranu liniju ruba pomaknuti za vrijednost širine nekodirane točke koja u ovom mjerenju iznosi 33.5 mm. Ovisno o kojem se rubu sekcije ili pozicije na brodu radi, pomaci se izvode u smjeru koordinatnih osi X, Y i Z.



Slika 106: Položaj fotoaparata i mjernih točaka kod snimanja na brodu

5.2.3. Odstupanja sekcijskog spoja od svjetlog otvora

Analiza odstupanja sekcijskog spoja slijedi nakon preklapanja rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora u zajednički koordinatni sustav u programskom paketu. Da bi rezultati analize bili pouzdani nužno je napraviti što vjernije preklapanje rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora. Dijagramom na slici 107 definirane su aktivnosti koje je potrebno ispuniti kod preklapanja rezultata mjerenja.



Slika 107: Dijagram toka aktivnosti kod preklapanja rezultata mjerenja

Kod preklapanja rezultata mjerenja u fazi montaže najčešće se uzima da su mjerni rezultati svjetlog otvora nepomični i referentni. Mjerni rezultati sekcije pri tome se mogu pomicati, a postavljaju se prema referentnim rezultatima mjerenja svjetlog otvora preko definiranih kriterija preklapanja.

Kriteriji preklapanja definiraju se tako da slijede realni postupak postavljanja sekcije u trup broda kakav se provodi prilikom montaže sekcije na dilju. Definiraju se plohe i rubovi svjetlog otvora i sekcije koji se preklapaju tako da se rezultati mjerenja postave u najbolji međusobni položaj.

Za definirane kriterije preklapanja na rezultatima mjerenja sekcije i svjetlog otvora napravljenim fotogrametrijskim sustavom konstruiraju se elementi preklapanja, a nakon toga se u programskom paketu obavlja preklapanje.

Nakon preklapanja sekcije i svjetlog otvora elementi preklapanja se kontroliraju mjerenjem njihovog međusobnog odstupanja. Ako elementi preklopa imaju veća odstupanja, utjecati će negativno na preklapanje mjernih rezultata, te na rezultate mjerenja odstupanja sekcijskog spoja koji postaju nepouzdani. Preklapanje rezultata mjerenja u programskom paketu provodi se po metodi najmanjih kvadratnih odstupanja. Elementi preklopa postavljaju

se u srednji položaj tako da su odstupanja jednoliko raspoređena na negativne i pozitivne vrijednosti.

- **Kriteriji preklapanja**

Montaža sekcije u trup broda obavlja se tako da se poprečna pregrada postavlja na teorijsku poziciju na brodu, ali tako da se vertikalni rub pregrade postavi u ravninu centralne linije broda, čime se regulira položaj sekcije po duljini i po širini. Nakon toga slijedi fino pozicioniranje pomicanjem sekcije, dok ne dođe u traženi položaj.

Takav scenarij potrebno je ostvariti i kod virtualne montaže sekcije u programskom paketu. Razlika u odnosu na stvarni postupak montaže je u tome što se kod virtulanog preklapanja sekcije i svjetlog otvora definiraju kriteriji preklapanja u sve tri osi koordinatnog sustava da bi položaj rezultata mjerenja bio jednoznačno određen u smjeru visine, širine i duljine.

Kriteriji preklapanja sekcije i svjetlog otvora:

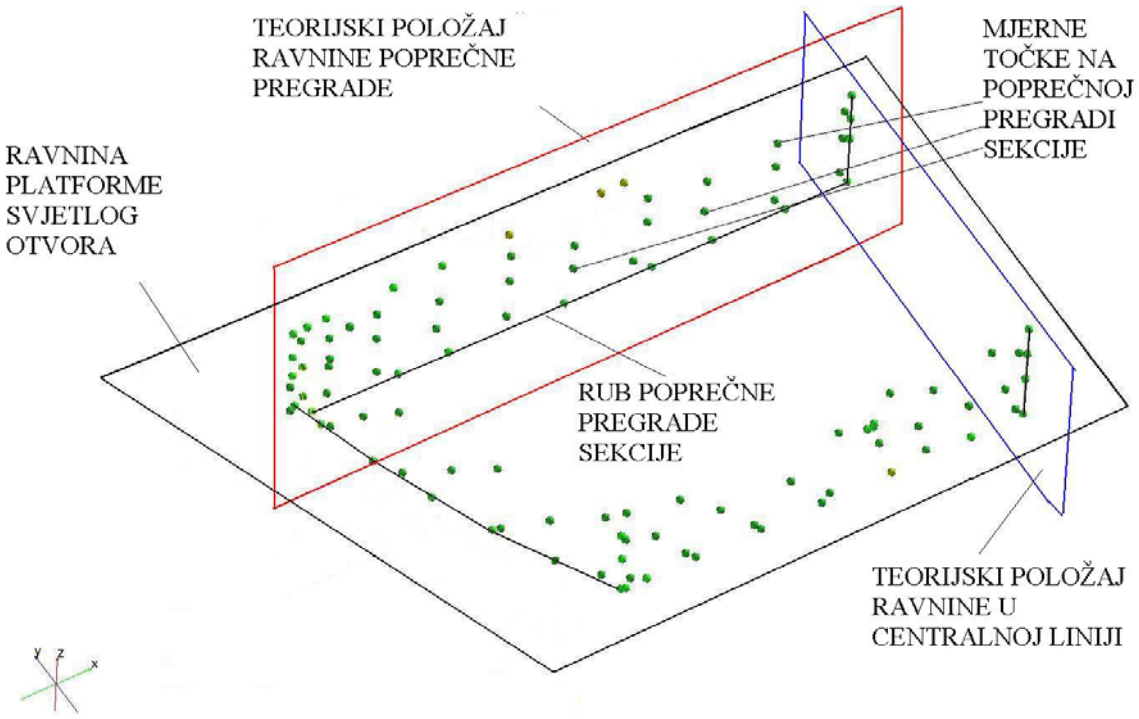
1. donji rub poprečne pregrade sekcije postavlja se u ravninu platforme na brodu,
2. ravnina poprečne pregrade postavlja se na teorijski položaj na rebru 10 i
3. vertikalni rubovi poprečne pregrade i krmenog zrcala sekcije postavljaju se u uzdužnu ravninu postavljenu u centralnoj liniji broda.

Ad 1) Prvi kriterij preklapanja regulira postavljanje sekcije svjetli otvor po visini. Na svjetlom otvoru kroz kodirane mjerne točke konstruira se ravnina platforme na koju se postavlja poprečna pregrada sekcije, a na sekciji definira se rub poprečne pregrade koji se postavlja u ravninu platforme. Rub poprečne pregrade sekcije konstruira se kroz nekodirane mjerne točke.

Ad 2) Drugi kriterij preklapanja služi za postavljanje sekcije u trup po duljini. Na svjetlom otvoru definira se teorijski položaj ravnine poprečne pregrade, a na sekciji se označavaju kodirane i nekodirane mjerne točke na poprečnoj pregradi.

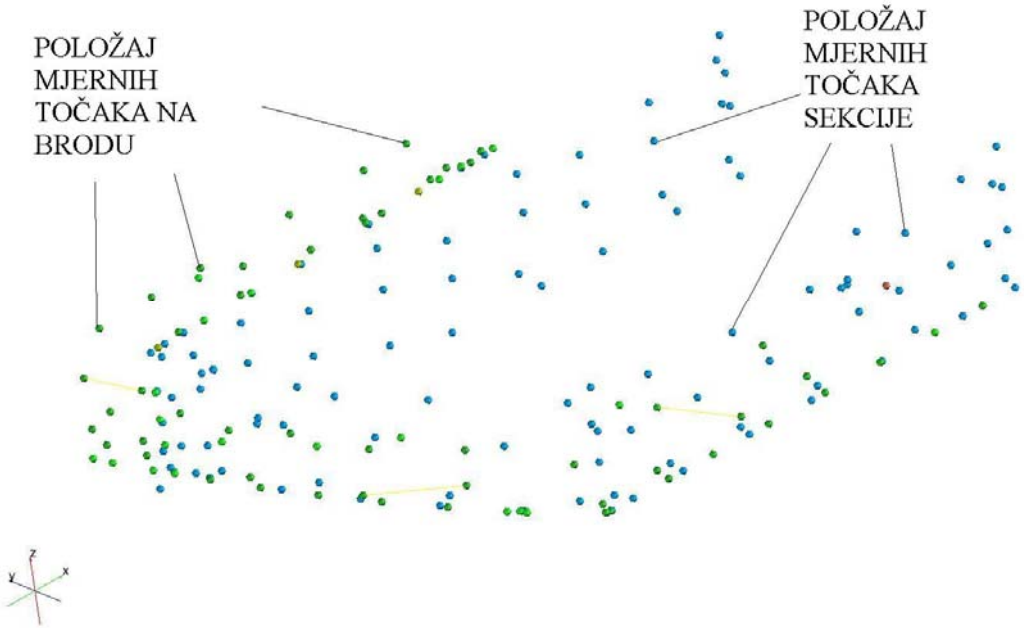
Ad 3) Treći kriterij preklapanja služi za postavljanje sekcije u trup broda po širini. Ostvaruje se tako da se na svjetlom otvoru definira teorijski položaj uzdužne pregrade u centralnoj liniji, u koju se postavljaju vertikalni rub poprečne pregrade i krmenog zrcala.

Nakon definiranja kriterija preklapanja na mjernim rezultatima se konstruiraju elementi preklopa, te se u programskom paketu obavi preklapanje. Slikom 108 prikazani su elementi preklopa rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora.



Slika 108: Elementi preklopa rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora

Primjer preklapanja rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora prikazan je slikom 109. Na slici su plavom bojom prikazane mjerne točke na sekciji, a zelenom na svjetlom otvoru. Lokalni koordinatni sustav postavlja se na svijetlom otvoru koji se postavlja kao nepomičan i referentan. Uzdužna koordinatna os duljine broda je os Y, poprečna koordinatna os širine broda je os X, a koordinatna os visine je os Z.



Slika 109: Preklapanje rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora

- **Kontrola elemenata preklopa sekcije i svjetlog otvora**

Definirani elementi preklopa sekcije i svjetlog otvora kontroliraju se u programskom paketu mjerenjem odstupanja mjernih točaka elemenata preklopa sekcije i svjetlog otvora. Elementi preklopa svjetlog otvora definirani su kao referentni. Kontrola se može napraviti za sve elemente preklopa. U radu je prikazana kontrola elemenata preklopa prvog i drugog kriterija preklapanja sekcije i svjetlog otvora. Kontrolom se mjere:

1. odstupanje ruba poprečne pregrade sekcije od ravnine platforme svjetlog otvora kod prvog kriterija preklapanja i
2. odstupanje mjernih točaka poprečne pregrade sekcije od ravnine teorijskog položaja poprečne pregrade na svjetlom otvoru kod drugog kriterija preklapanja.

Ad 1) Slikom 110 prikazana je kontrola odstupanja elemenata preklopa za prvi kriterij preklapanja. Mjere se odstupanja mjernih točaka donjeg ruba poprečne pregrade sekcije od ravnine platforme na svjetlom otvoru.

Zelenom bojom prikazana je ravnina platforme na koju se postavlja poprečna pregrada sekcije. Prikazane su također mjerne točke na donjem rubu poprečne pregrade za koje se mjere odstupanja u smjeru visine. Za kontrolu je izabrano 7 mjernih točaka. Svaka od mjernih točaka ima svoje identifikacijsko ime i iznos odstupanja. Vrijednosti odstupanja pozitivnog su i negativnog predznaka, a dane su i u tablici 17. Raspoređene su linearno, pozitivne su prema boku broda, a negativne prema sredini što znači da sekcija nije postavljena ravno na platformu nego je zarotirana prema sredini broda. Prikloni kut postavljanja donjeg brida pregrade prema platformi iznosi $\beta = 0° 1' 54''$, a računa se preko izraza:

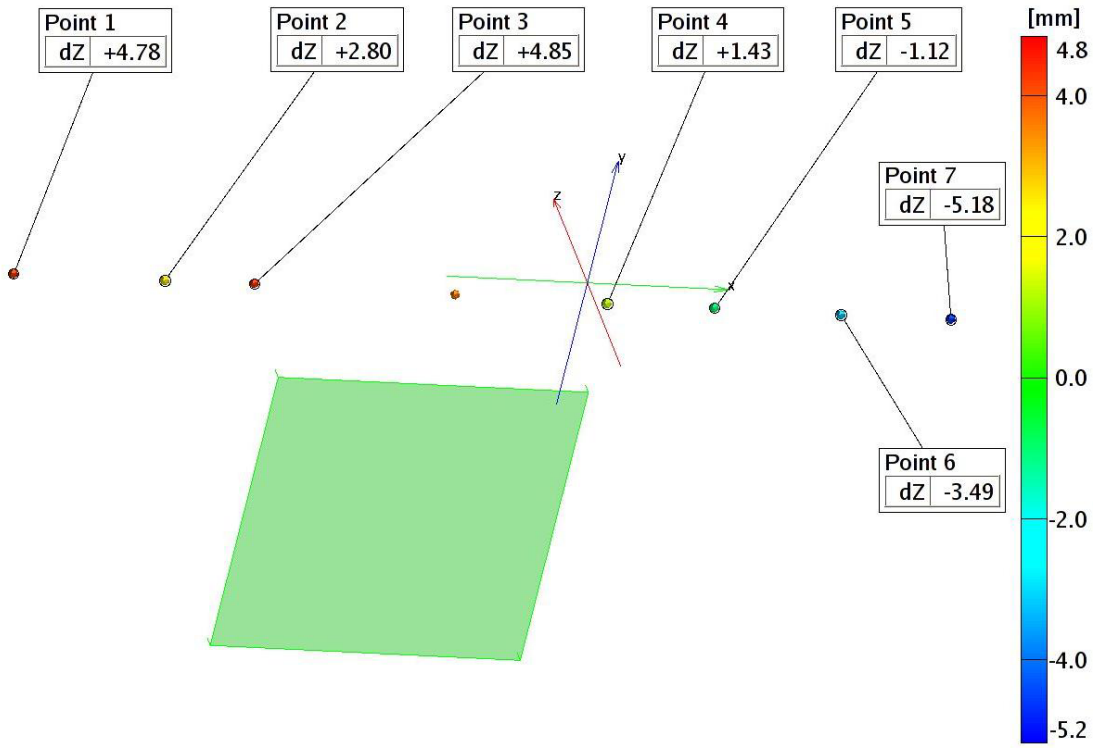
$\operatorname{tg} \beta = d / L$, gdje su:

d – razlika najvećeg i najmanjeg iznosa odstupanja, a iznosi 10 mm,

L – duljina pregrade; L = 18000 mm

Tablica 17: Rezultati kontrole preklapanja ruba poprečne pregrade i platforme

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5	6	7
Odstupanje [mm]	+4.7	+2.8	+4.8	+1.4	-1.1	-3.5	-5.2



Slika 110: Kontrola odstupanja elemenata preklopa za prvi kriterij preklapanja

Ad 2) Kontrola odstupanja elemenata preklopa za drugi kriterij uključuje mjerenje odstupanja mjernih točaka na poprečnoj pregradi sekcije od teorijskog položaja ravnine poprečne pregrade na brodu.

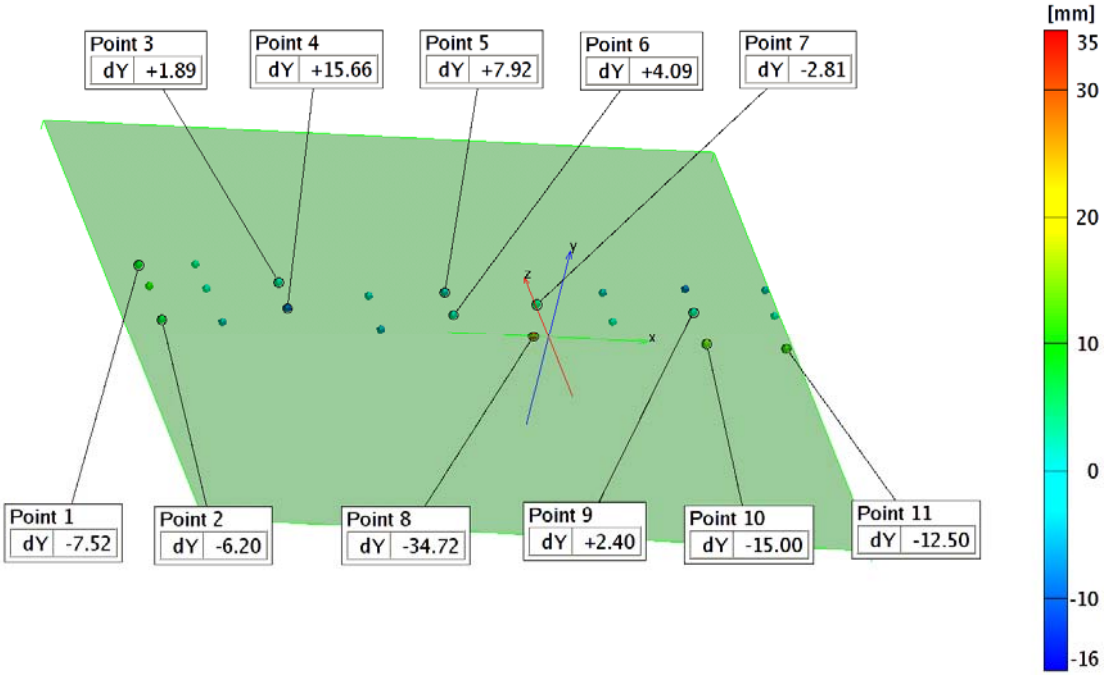
Preklop mjernih točaka poprečne pregrade sekcije i teorijskog položaja pregrade prikazan je slikom 111. Zelenom bojom prikazana je ravnina poprečne pregrade na koju se postavljaju mjerne točke poprečne pregrade sekcije. Za kontrolu je izabrano 11 mjernih točaka. Svaka od mjernih točaka ima svoje identifikacijsko ime i iznos odstupanja.

Vrijednosti odstupanja izabranih mjernih točaka od referentne ravnine prikazani su u tablici 18. Nalaze se u intervalu od –15 mm do +15.6 mm, a raspoređene su tako da su pozitivna odstupanja u gornjem dijelu pregrade kod mjernih točaka rednog broja 3 do 7, a negativna u donjem dijelu na položaju mjernih točaka 2, 8, 10 i 11. Zaključak je da je sekcija zarotirana prema pramcu, te da je krmeni dio sekcije u odnosu na svijetli otvor podignut.

Po širini pregrade, pozitivne vrijednosti odstupanja su raspoređene prema boku, a negativne prema sredini broda. To znači da je sekcija zarotirana oko koordinatne osi Z prema boku broda.

Najveći je iznos odstupanja na položaju mjerne točke broj 8 i iznosi –35 mm. Korištenje fotogrametrijskog sustava u kontroli dimenzija i oblika u ovakvom slučaju je pogodno, jer se pojava većih vrijednosti odstupanja može provjeriti na fotografijama. U ovom slučaju je

pregledom fotografija na položaju mjerne točke broj 8 uočena lokalna deformacija poprečne pregrade.



Slika 111: Kontrola odstupanja elemenata preklopa za drugi kriterij preklapanja

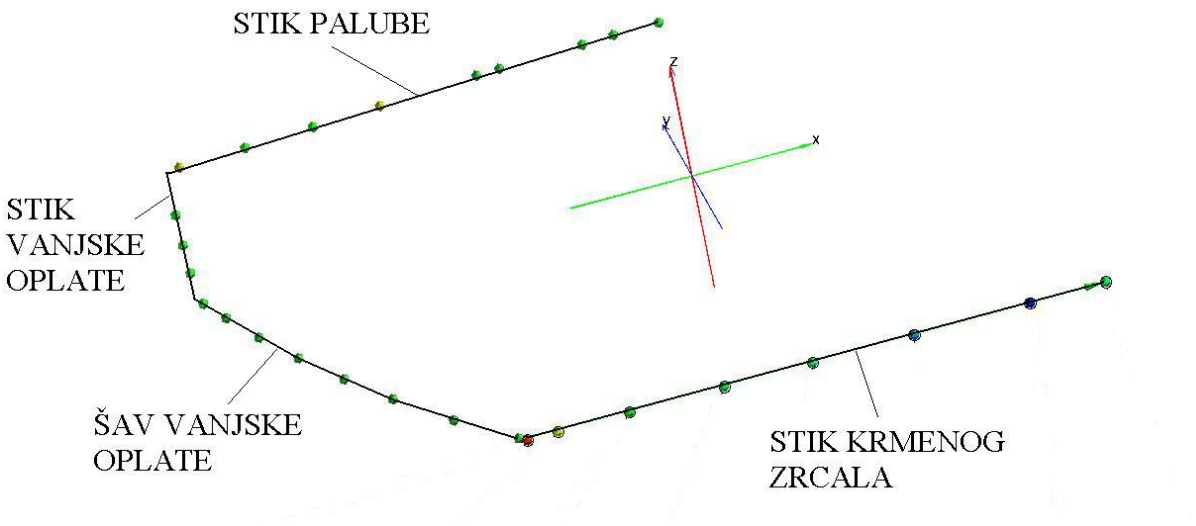
Tablica 18: Rezultati kontrole preklapanja mjernih točaka poprečne pregrade sekcije i referentne ravnine

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5	6
Odstupanje [mm]	-7.5	-6.2	+1.9	+15.6	+8.0	+4.1
Mjerna točka broj	7	8	9	10	11	
Odstupanje [mm]	-2.8	-34.7	+2.4	-15.0	-12.5	

- **Odstupanja sekcijskog spoja**

Nakon preklapanja rezultata mjerenja slijedi analiza odstupanja rubova sekcije i svjetlog otvora duž sekcijskog spoja. Referentni i nepomični dio je kontura svjetlog otvora koja se sastoji od stika na palubi, stika i šava vanjske oplate, te stika na krmenom zrcalu kako je prikazano slikom 112.

Dimenzijska kontrola obuhvaća mjerenje odstupanja mjernih točaka na rubovima sekcije. Analiza rezultata prikazat će se posebno za svaki pojedini dio konture sekcijskog spoja radi lakšeg praćenja i jednostavnijeg načina prikazivanja rezultata. Rezultati se prikazuju grafički i tablično.



Slika 112: Kontura svjetlog otvora

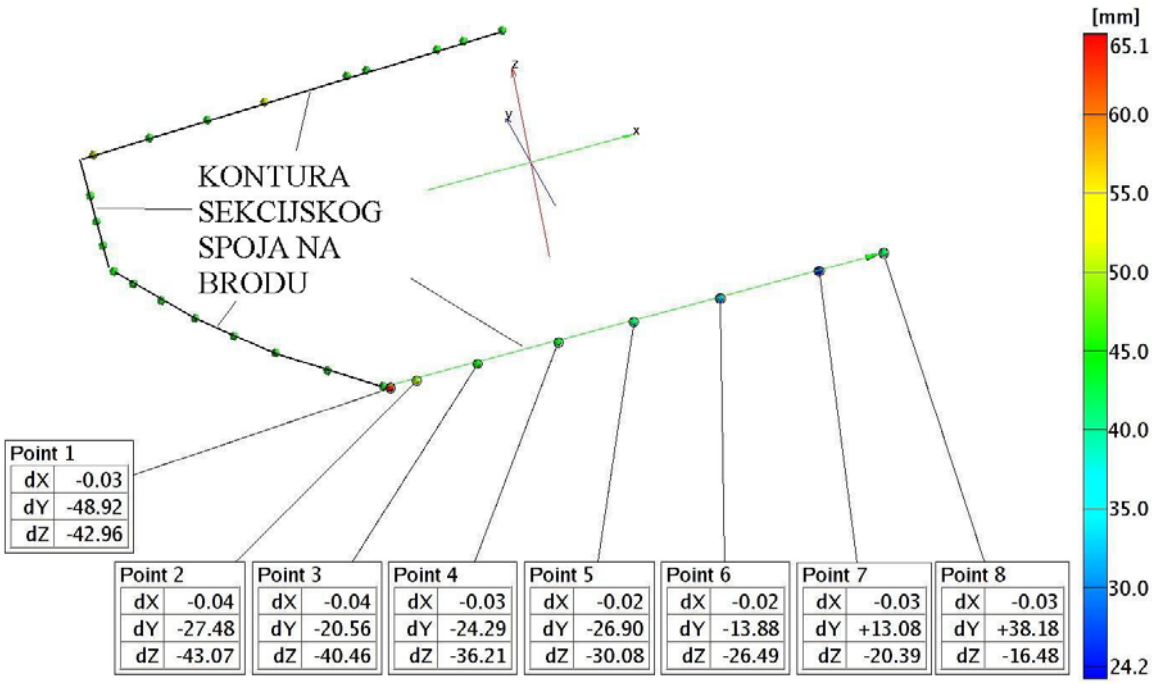
Grafički prikaz analize odstupanja, kakav se može napraviti u programskom paketu, sadrži prikaz položaja dijela konture svjetlog otvora koji je referentan, te mjernih točaka na rubu sekcije čija se odstupanja analiziraju. Mjera odstupanja prikazana je stupcem. Najveća pozitivna odstupanja prikazuju se crvenom bojom, a najveća negativna plavom. Mjerni rezultat prikazuje se za svaku izabranu mjernu točku, sadrži identifikacijsko ime točke i 3 vrijednosti odstupanja, a to su odstupanja po koordinatnim osima X, Y i Z. Tablični način prikaza rezultata za promatranu mjernu točku sadrži vrijednosti dominatnih odstupanja za pojedini rub, a to su rezultati odstupanja u dva smjera koordinatnih osi.

Analiza odstupanja mjernih točaka sekcije na krmenom zrcalu

Slikom 113 prikazana je analiza odstupanja 8 mjernih točaka ruba sekcije na krmenom zrcalu. Mjerni rezultati dani su u tablici 19.

Tablica 19: Odstupanja mjernih točaka sekcije na krmenom zrcalu

Mjerna točka broj	1	2	3	4
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	-49.0	-27.5	-20.5	-24.3
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	-43.0	-43.0	-40.5	-36.2
Mjerna točka broj	5	6	7	8
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	-26.9	-13.9	+13.0	+38.2
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	-30.0	-26.5	-20.4	-16.5



Slika 113: Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku krmenog zrcala

Dominantna odstupanja mjernih točaka sekcije na krmenom zrcalu u smjeru su koordinatne osi Z tj. visine i u smjeru koordinatne osi Y tj. duljine. Analizom odstupanja u smjeru koordinatne osi Z zaključuje se da je opločenje sekcije i svjetlog otvora preklopljeno, te je potrebno odrezati višak. Izmjerene vrijednosti preklopa su od 16.5 mm na mjernoj točki broj 8 do 43mm na mjernoj točki broj 2. Odstupanja u smjeru osi Y predstavljaju neravnost sekcijskog spoja, a korigiraju se u pripremi sekcijskog spoja za zavarivanje. Vrijednosti odstupanja su pozitivnog i negativnog predznaka, a nalaze se u intervalu od –49 do +38.2mm. Širina intervala odstupanja u smjeru duljine iznosi blizu 90mm što znači da je donji brid krmenog zrcala sekcije prilično deformiran. Negativne vrijednosti odstupanja raspoređene su prema boku broda, a pozitivne prema sredini. Deformacije ruba sekcije u smjeru duljine korigirat će se kod pripreme sekcijskog spoja za zavarivanje.

Analiza odstupanja mjernih točaka sekcije na palubi

Slikom 114 prikazana je analiza odstupanja 8 mjernih točaka ruba sekcije na palubi. Mjerni rezultati dani su u tablici 20.

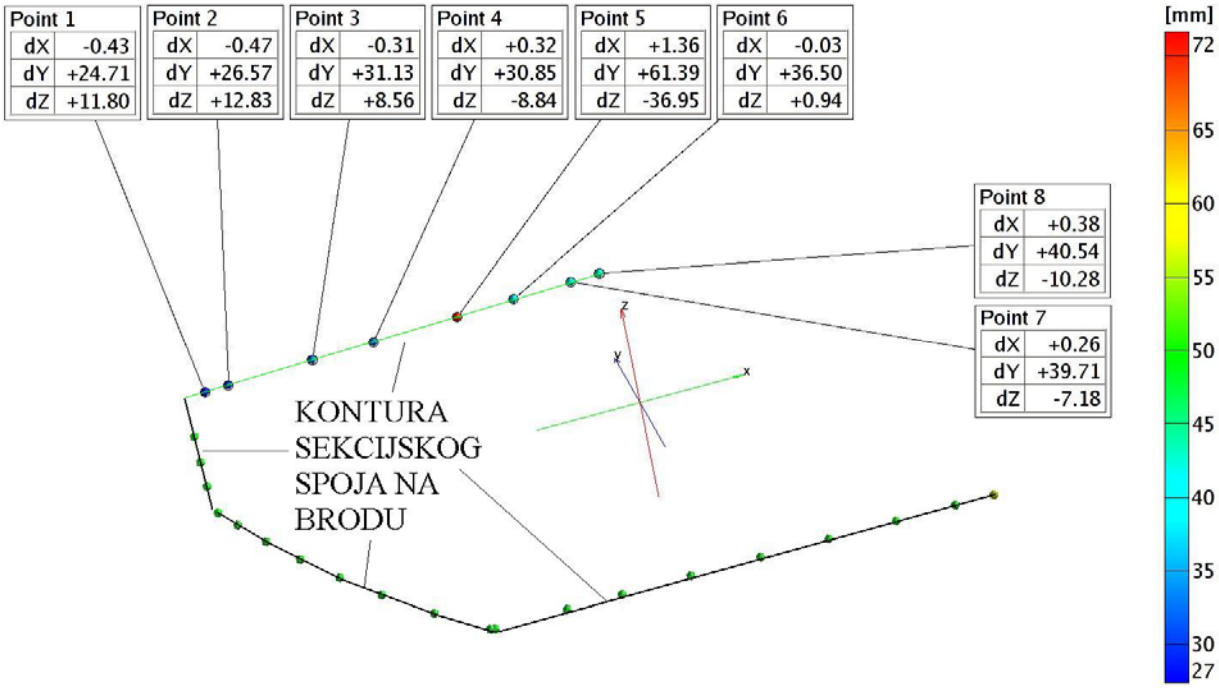
Dominantna odstupanja mjernih točaka sekcije na palubi su u smjeru osi Y tj. duljine i u smjeru osi Z tj. visine. Analizom odstupanja u smjeru koordinatne osi Y zaključuje se da je opločenje sekcije i svjetlog otvora preklopljeno, te je potrebno odrezati višak. Izmjerene vrijednosti preklopa su intervalu od 24.7mm do 61.4mm. Odstupanja u smjeru osi Z predstavljaju neravnost sekcijskog spoja, a korigiraju se u pripremi sekcijskog spoja za

zavarivanje. Vrijednosti odstupanja su pozitivnog i negativnog predznaka, a nalaze se u intervalu od –37mm do +12.8mm.

Kod mjerne točke broj 5 vrijednosti odstupanja u oba smjera razlikuju se od vrijednosti koje imaju okolne točke. Razlog ovakvih odstupanja rezultata u smjeru duljine je u postavljanju mjerne točke koja nije bila zalijepljena uz sami rub opločenja. Razlog odstupanja u smjeru visine je lokalna deformacija opločenja na poziciji mjerne točke broj 5 što se može provjeriti kontrolom fotografija na promatranom području.

Tablica 20: Odstupanja mjernih točaka sekcije na palubi

Mjerna točka broj	1	2	3	4
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	+24.7	+26.5	+31.1	+30.8
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	+11.8	+12.8	+8.5	-8.8
Mjerna točka broj	5	6	7	8
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	+61.4	+36.5	+39.7	+40.5
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	-37.0	+1.0	-7.1	-10.3



Slika 114: Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku palube

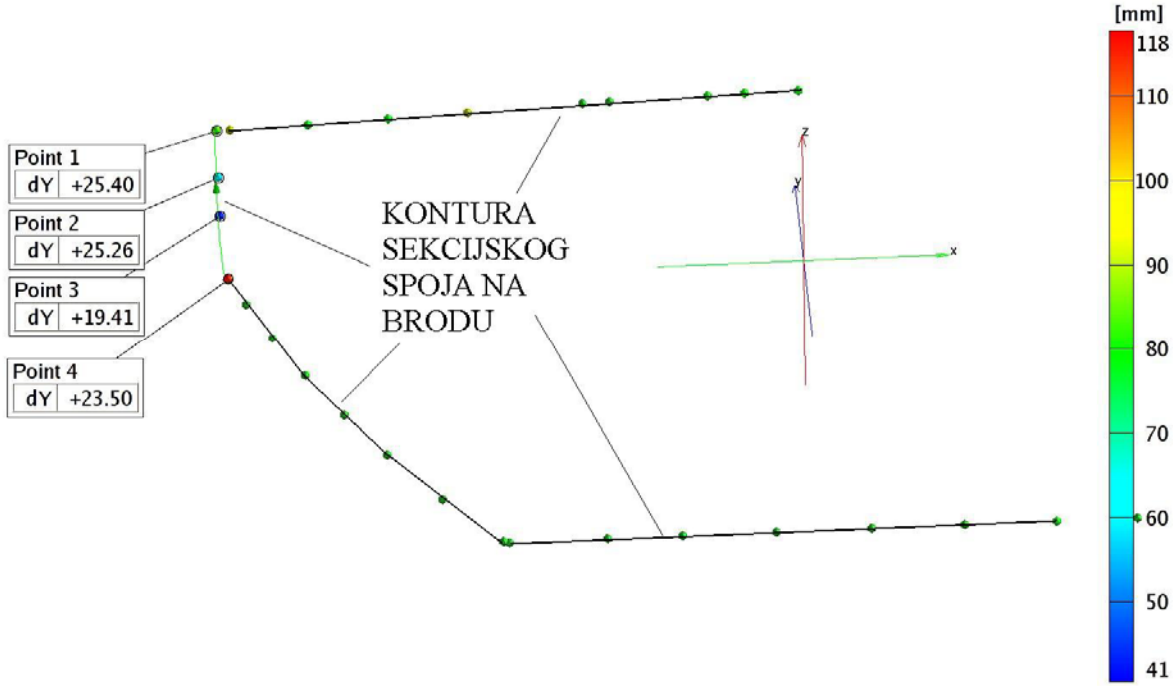
Analiza odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku vanjske oplate

Slikom 115 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka ruba sekcije na stiku vanjske oplate. Mjerni rezultati dani su u tablici 21.

Na slici je prikazano mjerenje odstupanja četiri mjerne točke sekcije, čija su dominantna odstupanja u smjeru duljine broda tj. u smjeru koordinatne osi Y. Na stiku vanjske oplate je preklop opločenja, a vrijednosti odstupanja su u intervalu od 19.4mm do 25.4mm. Vrijednosti preklopa oplate na boku broda slični su po iznosu vrijednostima preklopa na palubi.

Tablica 21: Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku vanjske oplate

Mjerna točka broj	1	2	3	4
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	+25.4	+25.2	+19.4	+23.5



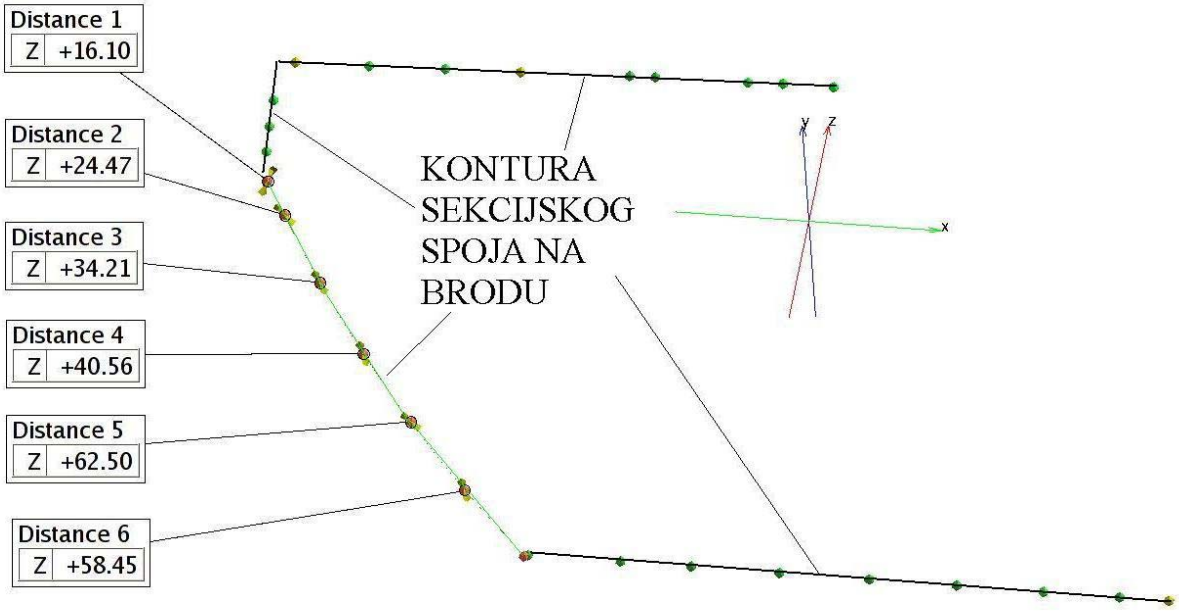
Slika 115: Odstupanja mjernih točaka sekcije na stiku vanjske oplate

Analiza odstupanja mjernih točaka sekcije na šavu vanjske oplate

Slikom 116 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka ruba sekcije na šavu vanjske oplate. Mjerni rezultati dani su u tablici 22.

Tablica 22: Odstupanja mjernih točaka sekcije na šavu vanjske oplate

Mjerna točka broj	1	2	3
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	+16.1	+24.5	+34.2
Mjerna točka broj	4	5	6
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	+40.5	+62.5	+58.5



Slika 116: Odstupanja mjernih točaka sekcije na šavu vanjske oplate

Analiza obuhvaća mjerenje odstupanja 6 kontrolnih mjernih točaka. Najdominantnije odstupanje je u smjeru koordinatne osi Z koje predstavlja preklop opločenja vanjske oplate sekcije. Vrijednosti odstupanja su u intervalu od 16.1mm do 62.5mm, a veće vrijednosti preklopa izmjerene su prema krmi broda. Razlika veličine preklopa mjerne točke broj 1 na pramčanom dijelu i mjerne točke broj 5 na krmenom dijelu je izražena, te iznosi 46mm.

Razlog ovoj razlici može biti:

- dimenzionalna netočnost sekcije,
- dimenzionalna netočnost konture svjetlog otvora ili
- utjecaj metode preklapanja u programskom paketu na rezultate mjerenja

Prijedlog korekcija sekcijskog spoja na sekciji

Prijedlog korekcija sekcijskog spoja definira se i propisuje za rub sekcije na kojoj se predviđene korekcije mogu jednostavnije napraviti nego na svjetlom otvoru.

Rezultati mjerenja odstupanja rubova sekcije pokazali su da je na svim segmentima sekcijskog spoja uočen preklop opločenja kojeg treba odrezati prilikom montaže sekcije u trup broda.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 23. U tablici se nalaze vrijednosti odstupanja promatranih mjernih točaka rubova sekcije koja predstavljaju preklop opločenja na

sekcijskom spoju. Na stiku palube i vanjske oplate to su odstupanja u smjeru koordinatne osi Y, a za šav vanjske oplate i stik krmenog zrcala to su odstupanja u smjeru koordinatne osi Z.

Upute za korekciju rubova sekcije sadržavaju naziv dijela sekcijskog spoja i vrijednost širine preklopa kojeg je potrebno odrezati. Širina preklopa za korekciju je srednja vrijednost odstupanja promatranih mjernih točaka na dijelu sekcijskog spoja, a nalazi se u zadnjem retku tablice 23.

Tablica 23: Odstupanja mjernih točaka na sekcijskom spoju

Naziv sekcijskog spoja	Stik na palubi	Stik na vanjskoj oplati	Šav vanjske oplate	Stik krmenog zrcala
Redni broj mjerne točke	Odstupanja u smjeru osi Y [mm]	Odstupanja u smjeru osi Y [mm]	Odstupanja u smjeru osi Z [mm]	Odstupanja u smjeru osi Z [mm]
1	24.7	25.4	16.1	43.0
2	26.5	25.2	24.5	43.0
3	31.1	19.4	34.2	40.4
4	30.8	23.5	40.5	36.2
5	61.4	-	62.5	30.0
6	36.5	-	58.5	26.5
7	39.7	-	-	20.4
8	40.5	-	-	16.5
Srednja vrijednost odstupanja [mm]	36.4	23.4	39.4	32.0

5.2.4. Usporedba predloženih i izvedenih korekcija

Da bi se ocijenila točnost fotogrametrijske metode i pouzdanost rezultata mjerenja treba usporediti rezultate napravljene fotogrametrijskom metodom s vrijednostima širina traka na rubovima sekcijskog spoja koje su stvarno izrezane prilikom montaže sekcije u trup broda. Realni montažni višak ne nalazi se samo na sekciji ili samo na svjetlom otvoru nego je podijeljen tako da se na svjetlom otvoru višak nalazi na stiku palube i vanjske oplate ispred rebra 10, dok se montažni višak na sekciji nalazi na šavu vanjske oplate boka i stiku krmenog zrcala.

Rezultati usporedbe dani su u tablici 24. U prvom stupcu je naziv dijela sekcijskog spoja. U drugom stupcu su vrijednosti širine trake stvarno odrezanog montažnog viška po stikovima i šavu. Treći stupac sadrži vrijednosti predloženih korekcija rubova sekcije

napravljenih mjerenjem fotogrametrijskom metodom iz tablice 23, a u četvrtom stupcu su razlike predloženih i izvedenih korekcija.

Vrijednosti predloženih korekcija na šavu vanjske oplate i na stiku krmenog zrcala odgovaraju vrijednostima izvedenih korekcija na montaži sekcije. Na stikovima palube i vanjske oplate predložene korekcije manje su od izvedenih za 13 i 26 mm.

Usporedba rezultata pokazuje da je metoda fotogrametrije u kontroli dimenzija i oblika u fazi montaže točna i pouzdana.

Tablica 24: Usporedba vrijednosti predloženih i izvedenih korekcija sekcijskog spoja

Naziv dijela sekcijskog spoja	Širina izrezane trake montažnog viška [mm]	Srednja vrijednost odstupanja mjernih točaka [mm]	Razlika izvedenih i predloženih korekcija [mm]
Stik na palubi	50	36.4	+ 13.6
Stik na vanjskoj oplati	50	23.4	+26.6
Šav vanjke oplate	40	39.4	+0.6
Stik krmenog zrcala	30	32.0	-2.0

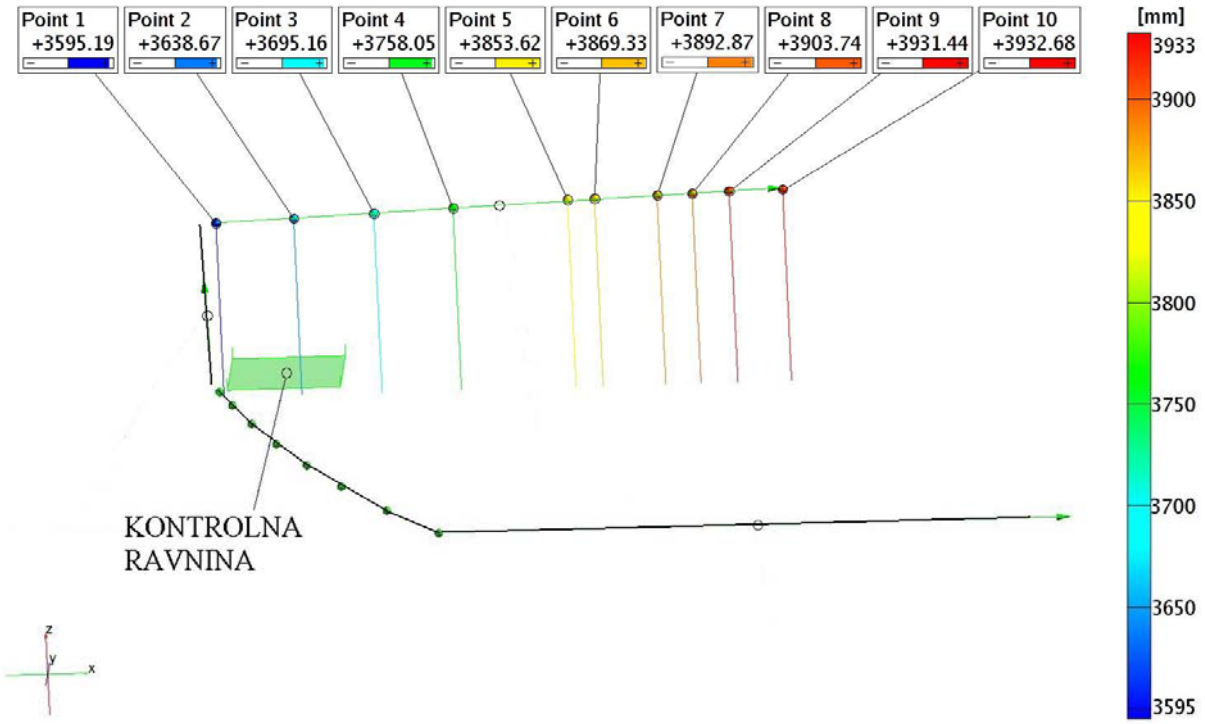
5.2.5. Dodatni zadaci kontrole sekcije i svjetlog otvora

Rezultati jednom napravljenih fotogrametrijskih mjerenja sekcije brodskog trupa ili svjetlog otvora na brodu mogu se koristiti i za druge zadatke dimenzijske kontrole. U ovom mjerenju prikazan je primjer kontrole visine palube svjetlog otvora.

Paluba svjetlog otvora poduprta je privremenom uporom dok se sekcija ne montira u trup, pa je potrebno provjeriti njen položaj. Postoji mogućnost da je radi težine sekcije ili radi neodgovarajuće visine upore paluba svjetlog otvora niža od palube sekcije, što zahtjeva opsežnije radove pripreme sekcijskog spoja na stiku palube.

Kontrola se obavlja tako da se mjeri udaljenost nekodiranih mjernih točaka postavljenih uz rub opločenja palube svjetlog otvora od kontrolne ravnine na platformi. Grafički prikaz mjerenja je na slici 117 gdje su za 10 mjernih točaka izmjerene udaljenosti.

Izmjerene vrijednosti uspoređuju se s teorijskim vrijednostima visina koje su uzete iz CAD modela sekcije na položajima koji približno odgovaraju položajima točaka rezultata mjerenja svjetlog otvora napravljenih fotogrametrijskim sustavom.



Slika 117: Kontrola visine palube svjetlog otvora

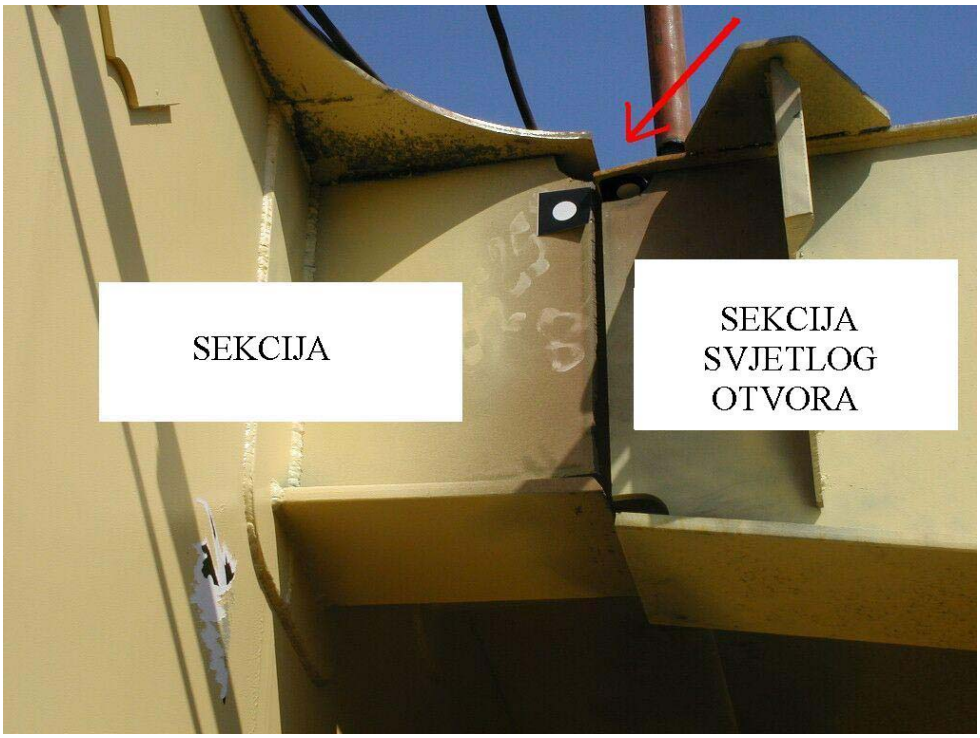
Usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti prikazana je u tablici 25. U prvom stupcu tablice nalazi se redni broj mjerne točke. U drugom stupcu su izmjerene vrijednosti visina palube, a u trećem teorijske vrijednosti visina. Četvrti stupac sadrži razlike izmjerenih i teorijskih visina.

Tablica 25: Usporedba vrijednosti izmjerenih i teorijskih visina palube svjetlog otvora

Mjerna točka broj	Izmjerena visina palube [mm]	Teoretska visina palube [mm]	Razlika izmjerenih i teoretskih vrijednosti [mm]
1	3595	3594	+ 1
2	3638	3623	+ 15
3	3695	3699	- 4
4	3758	3803	- 45
5	3853	3837	+ 16
6	3869	3868	+ 1
7	3892	3892	0
8	3903	3918	- 15
9	3931	3948	- 17
10	3932	3985	- 53

Razlike izmjerenih i teorijskih vrijednosti visina palube iz tablice 25 za promatrane mjerne točke su većim dijelom slične. Na položajima mjernih točaka 4 i 10 razlike rezultata su veće. Izmjerene visine palube na tim mjestima niže su od teorijske za 45 i 53 mm. Razlog

su lokalne deformacije opločenja palube svjetlog otvora koje će se korigirati u pripremi sekcijskog spoja kada se pozicionira sekcija. Potvrda rezultata mjerenja visine na položaju mjerne točke 10 prikazana je slikom 118 koja je snimljena nakon postavljanja sekcije u trup broda. Na slici je crvenom strelicom označena razlika visina palube sekcije i svjetlog otvora. Stvarna razlika visine paluba na položaju mjerne točke 10 odgovara vrijednosti izmjerene razlike visina.



Slika 118: Paluba sekcije i svjetlog otvora na poziciji mjerne točke broj 10

5.2.6. Preklapanje CAD modela sekcije i svjetlog otvora

Drugi način analize odstupanja sekcijskog spoja provodi se preklapanjem CAD modela sekcije i rezultata mjerenja svjetlog otvora u zajedničkom koordinatnom sustavu. Rezultati analize su odstupanja oblika konture svjetlog otvora koja su nastala montažom prethodnih sekcija u trup broda.

CAD model sekcije kreiran je u nekom od programskih paketa za modeliranje strukture trupa broda. Za analizu odstupanja konture svjetlog otvora bitno je da se u programski paket može ubaciti model kreiran u drugom programskom paketu.

Mjerenje svjetlog otvora fotogrametrijskom metodom opisano je u poglavlju 5.2.2. Rezultati mjerenja su prostorni položaji mjernih točaka na svjetlom otvoru pomoću kojih se konstruiraju elementi preklapanja.

Preklapanje CAD modela sekcije i svjetlog otvora provodi se u programskom paketu tako da se rezultati mjerenja svjetlog otvora postave kao nepomični i referentni, a u zajednički koordinatni sustav postavlja se CAD model sekcije.

Preklapanje se provodi preko definiranih kriterija preklapanja. Kao i kod preklapanja rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora, kriteriji preklapanja definiraju se tako da slijede realni postupak postavljanja sekcije u trup broda kakav se provodi prilikom montaže sekcije na dilju. Za definirane kriterije preklapanja na CAD modelu sekcije i rezultatima mjerenja svjetlog otvora napravljenim fotogrametrijskim sustavom konstruiraju se elementi preklopa, a nakon toga se u programskom paketu obavlja preklapanje.

U ovom slučaju, kod preklapanja CAD modela i svjetlog otvora nije potrebno kontrolirati elemente preklapanja, kao što je trebalo kod preklapanja mjernih rezultata sekcije i svjetlog otvora, jer su svi elementi preklapanja ravni. Metoda najmanjih kvadratnih odstupanja koja se koristi kao metoda preklapanja na rezultate mjerenja u ovom slučaju nema utjecaja.

- **Kriteriji preklapanja**

Postupak virtualnog preklapanja CAD modela sekcije i svjetlog otvora u programskom paketu slijedi realni način montaže sekcije u trup broda. Kriteriji preklapanja ostaju isti kao i kod preklapanja rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora, a to su:

1. donji rub poprečne pregrade sekcije postavlja se u ravninu platforme na brodu,
2. ravnina poprečne pregrade postavlja se na teorijski položaj na rebru 10 i
3. rub poprečne pregrade sekcije postavlja se u uzdužnu ravninu u centralnoj liniji.

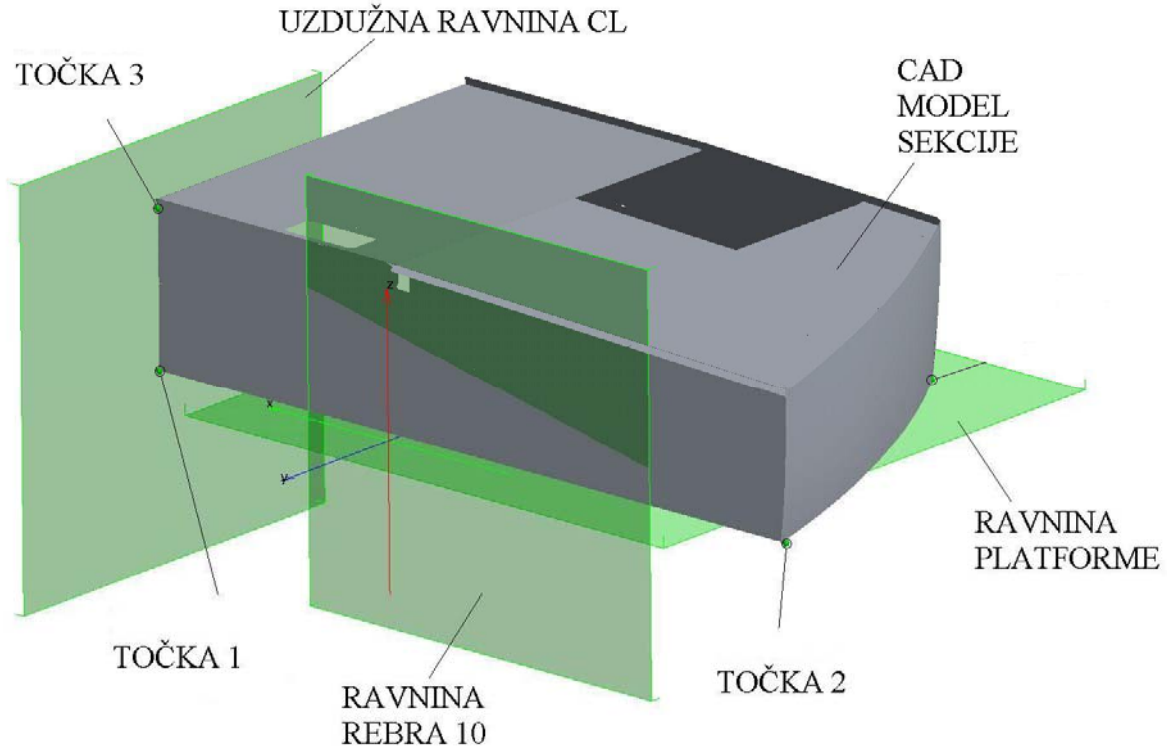
Ad 1) Prvi kriterij preklapanja regulira postavljanje CAD modela sekcije u svjetli otvor po visini. Na svjetlom otvoru kroz kodirane mjerne točke konstruira se ravnina platforme na koju se postavlja poprečna pregrada CAD modela. Na CAD modelu rub poprečne pregrade definiran je točkama 1 i 2, kako je prikazano slikom 119.

Ad 2) Drugi kriterij preklapanja služi za postavljanje CAD modela sekcije u svjetli otvor po duljini. Na svjetlom otvoru definira se teorijski položaj ravnine poprečne pregrade, a na CAD modelu sekcije ravnina poprečne pregrade je definirana točkama 1, 2 i 3 koje se nalaze na poprečnoj pregradi.

Ad 3) Treći kriterij preklapanja služi za postavljanje CAD modela sekcije u svjetli otvor po širini. Ostvaruje se tako da se na svjetlom otvoru definira položaj uzdužne pregrade u

centralnoj liniji, a u uzdužnu pregradu postavlja se vertikalni rub poprečne pregrade CAD modela koji je definiran točkama 1 i 3.

Postavljanje CAD modela i svjetlog otvora u zajednički koordinatni sustav prikazan je slikom 119. Elementi preklapanja kod svjetlog otvora su ravnina platforme, ravnina rebra 10 i uzdužna ravnina CL. Sivim plohama prikazan je CAD model sekcije na kojem su izdvojene 3 karakteristične točke preklapanja. Točkama 1 i 2 definira se donji rub poprečne pregrade sekcije koji se koristi u prvom kriteriju preklapanja. Sve tri karakteristične točke nalaze se na poprečnoj pregradi sekcije i koriste se kod drugog kriterija preklapanja, a točkama 1 i 3 definira se vertikalni rub poprečne pregrade koji služi za preklapanje po trećem kriteriju.



Slika 119: Preklapanje CAD modela sekcije i svjetlog otvora

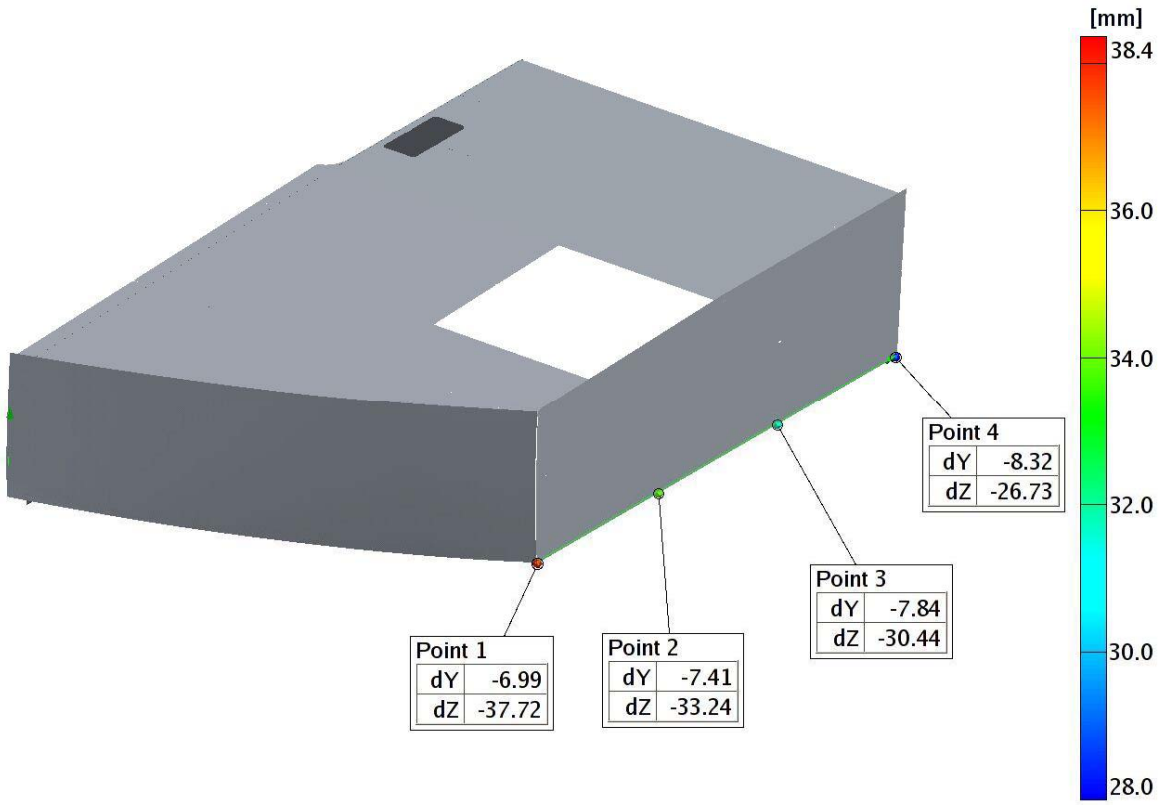
- **Odstupanja CAD modela sekcije od svjetlog otvora**

Nakon preklapanja CAD modela i svjetlog otvora slijedi analiza odstupanja rubova CAD modela sekcije od svjetlog otvora duž sekcijskog spoja. Dimenzijska kontrola obavlja se mjerenjem udaljenosti mjernih točaka rubova CAD modela sekcije od konture svjetlog otvora. Na rubovima CAD modela definiraju se kontrolne mjerne točke. Analiza odstupanja obaviti će se posebno za svaki pojedini dio konture sekcijskog spoja radi lakšeg praćenja i jednostavnijeg načina prikazivanja rezultata. Izmjerena odstupanja su netočnosti konture svijetlog otvora koje su nastale montažom prethodnih sekcija u trup broda.

Rezultati mjerenja prikazuju se grafički i tablično. Grafički prikaz analize odstupanja sadrži prikaz položaja CAD modela sekcije i izabranih kontrolnih točaka, te liniju ruba svijetlog otvora koji je referentan. Mjera odstupanja točaka od ruba prikazana je stupcem. Najveća pozitivna odstupanja prikazuju se crvenom bojom, a najveća negativna plavom. Mjerni rezultat prikazuje se za svaku mjernu točku, sadrži redni broj mjerne točke i vrijednosti dominantnih odstupanja po koordinatnim osima X, Y i Z. Tablični način prikaza rezultata također sadrži vrijednosti dominatnih odstupanja mjernih točaka za pojedini rub, a to su rezultati odstupanja u dva smjera koordinatnih osi.

Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu

Slikom 120 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka ruba CAD modela sekcije na krmenom zrcalu. Analiziraju se odstupanja 4 kontrolne točke. Mjerni rezultati dani su u tablici 26.



Slika 120: Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu

Tablica 26: Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu

Mjerna točka broj	1	2	3	4
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	-7.0	-7.4	-7.8	-8.3
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	-37.7	-33.2	-30.4	-26.7

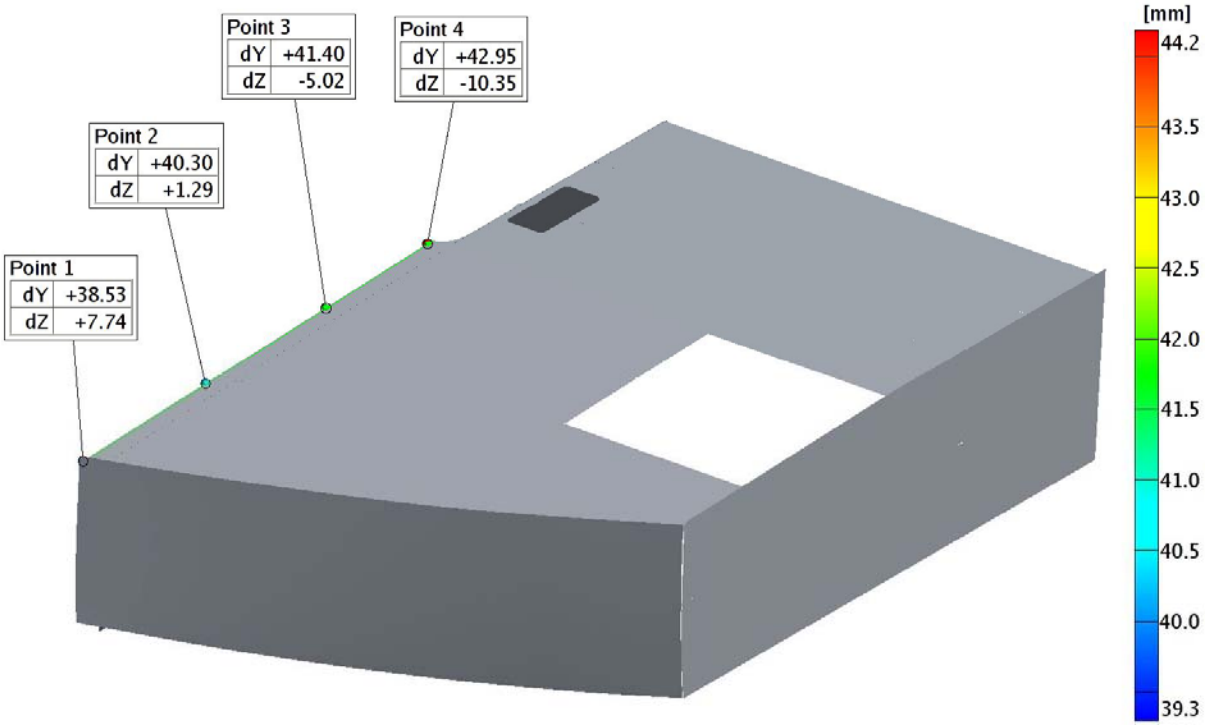
Dominantna odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na krmenom zrcalu su u smjeru osi Z tj. visine i u smjeru osi Y tj. duljine.

Analizom odstupanja u smjeru koordinatne osi Z zaključuje se da je opločenje sekcije i svjetlog otvora preklopljeno, te je potrebno odrezati višak. Izmjerene vrijednosti preklopa su u intervalu od 26.7mm do 37.7mm. Vrijednosti preklopa veće su prema boku broda u području mjernih točaka 1 i 2 od vrijednosti preklopa prema sredini za 11 mm što znači da je kontura krmenog zrcala na tom dijelu viša i nagnuta prema sredini broda.

Odstupanja u smjeru osi Y predstavljaju neravnost sekcijskog spoja. Vrijednosti odstupanja su po cijeloj dužini konture svjetlog otvora jednake i iznose između 7 i 8mm što znači da je rub krmenog zrcala svjetlog otvora ravan.

Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi

Slikom 121 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi. Analiziraju se odstupanja 4 kontrolne točke, a mjerni rezultati dani su u tablici 27.



Slika 121: Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi

Dominantna odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi su u smjeru koordinatne osi Y tj. duljine i u smjeru koordinatne osi Z tj. visine.

Tablica 27: Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na palubi

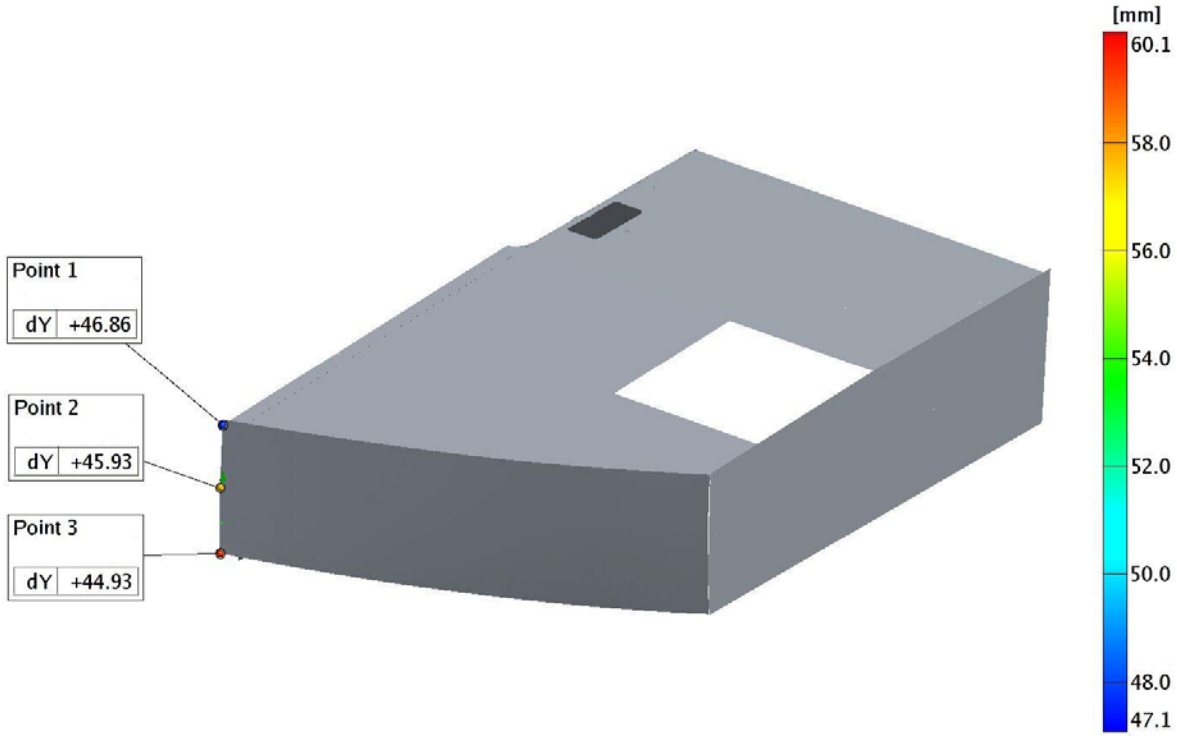
Mjerna točka broj	1	2	3	4
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	+38.5	+40.3	+41.4	+42.9
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	+7.7	+1.3	-5.0	-10.3

Analizom odstupanja u smjeru koordinatne osi Y zaključuje se da je opločenje sekcije i svjetlog otvora preklopljeno, te je potrebno odrezati višak. Izmjerene vrijednosti preklopa su u intervalu od 38.5 do 42.9mm.

Odstupanja u smjeru osi Z predstavljaju neravnost sekcijskog spoja. Vrijednosti odstupanja su pozitivnog i negativnog predznaka, a nalaze se u intervalu od –10.3 do +7.7mm. Pozitivne vrijednosti odstupanja su na području mjernih točaka 3 i 4 koje su smještene prema boku broda, a to znači da je paluba CAD modela sekcije viša od palube svjetlog otvora. Negativne vrijednosti odstupanja su u području mjernih točaka 1 i 2 prema sredini broda, pa je na tim mjestima paluba CAD modela niža od palube svjetlog otvora.

Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate

Slikom 122 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate. Analiziraju se odstupanja 3 kontrolne točke. Mjerni rezultati dani su u tablici 28.



Slika 122: Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate

Tablica 28: Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate

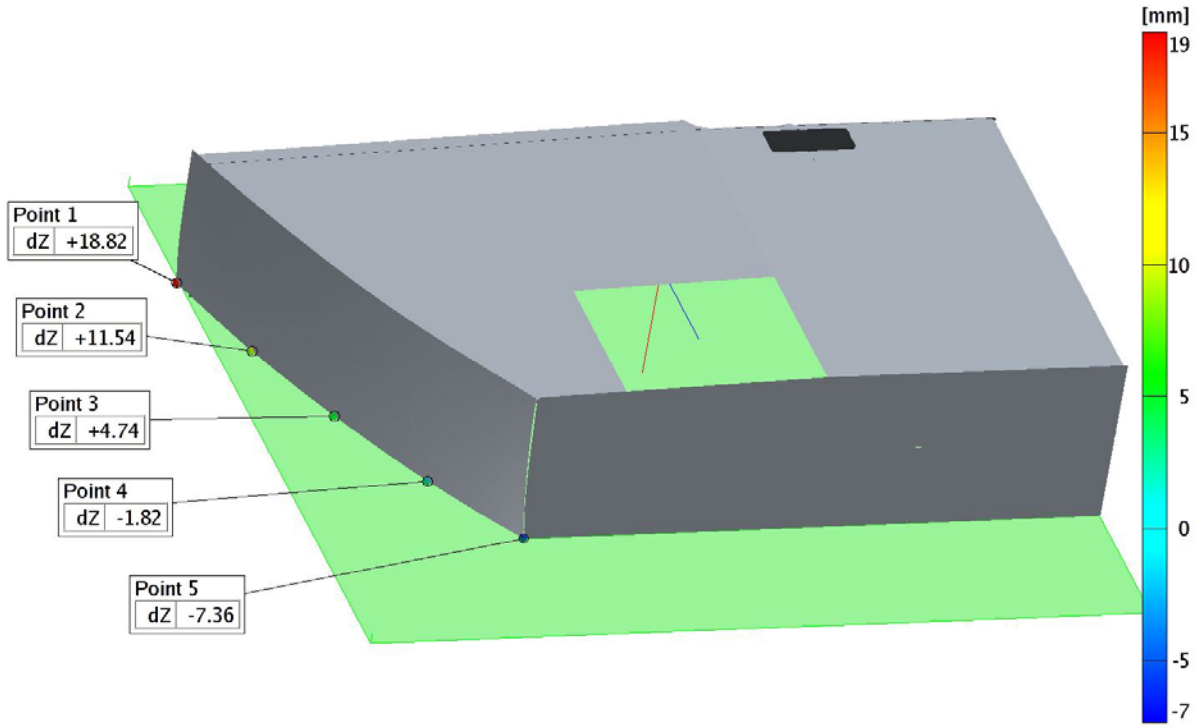
Mjerna točka broj	1	2	3
Odstupanje u smjeru osi Y [mm]	+46.8	+46.0	+45.0

Dominantna odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na stiku vanjske oplate su u smjeru koordinatne osi Y tj. duljine. Analizom odstupanja u smjeru koordinatne osi Y zaključuje se da je opločenje sekcije i svjetlog otvora preklopljeno, te je potrebno odrezati višak. Izmjerene vrijednosti preklopa približno su 46 mm, te prate po iznosu vrijednosti preklopa opločenja na palubi.

Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate

Slikom 123 prikazana je analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate. Analiziraju se odstupanja 5 mjernih točaka.

Odstupanja mjernih točaka su njihove udaljenosti od kontrolne ravnine koja se kreira na šavu vanjske oplate svjetlog otvora. Na slici 123 kontrolna ravnina je prikazana zelenom bojom. Najdominantnija su odstupanja u smjeru koordinatne osi Z koja predstavljaju preklop opločenja vanjske oplate CAD modela sekcije i svjetlog otvora.



Slika 123: Analiza odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate

Tablica 29: Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije na šavu vanjske oplate

Mjerna točka broj	1	2	3	4	5
Odstupanje u smjeru osi Z [mm]	+18.8	+11.5	+4.7	-1.8	-7.3

Za analizu rezultata mjerenja bitno je naglasiti da na šavu vanjske oplate CAD modela sekcije nema montažnog viška od 30 mm. Kada bi oblik svjetlog otvora bio točan, mjerne točke šava vanjske oplate CAD modela sekcije morale bi se nalaziti u kontrolnoj ravnini. Mjerni rezultati dani su također i u tablici 29.

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka šava vanjske oplate CAD modela sekcije od kontrolne ravnine pozitivnih su i negativnih vrijednosti, a nalaze se u intervalu od –7.3 do +18.8mm.

Pozitivne vrijednosti odstupanja raspoređene su prema pramcu broda u području točaka 1, 2 i 3 gdje je šav vanjske oplate CAD modela viši od konture svjetlog otvora.

Negativne vrijednosti odstupanja raspoređene su prema krmi broda u području točaka 4 i 5 gdje je šav vanjske oplate CAD modela sekcije niži od svjetlog otvora.

Razlika vrijednosti odstupanja mjernih točaka na pramčanom i krmenom dijelu iznosi 26mm. Zaključak analize odstupanja na šavu vanjske oplate je da je krmeni dio konture svjetlog otvora viši za 26mm od pramčanog dijela.

Prijedlog korekcija sekcijskog spoja na CAD modelu sekcije

Analizom mjernih rezultata daje se prijedlog korekcija sekcijskog spoja kada bi se u trup broda montirala sekcija jednaka idealnom CAD modelu sekcije.

Rezultati mjerenja odstupanja rubova sekcijskog spoja CAD modela sekcije pokazali su da je na svim segmentima sekcijskog spoja uočen preklop opločenja.

U tablici 30 dane su vrijednosti izmjerenih odstupanja mjernih točaka CAD modela od konture svjetlog otvora po svim elementima sekcijskog spoja. Naznačena su dominantna odstupanja koja predstavljaju preklop opločenja na sekcijskom spoju.

Na stiku palube i vanjske oplate to su odstupanja u smjeru osi Y, a na stiku krmenog zrcala to su odstupanja u smjeru osi Z. Širina preklopa za korekciju rubova CAD modela sekcije je srednja vrijednost odstupanja promatranih mjernih točaka na dijelu sekcijskog spoja, a nalazi se u zadnjem retku tablice.

Tablica 30: Odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije

Naziv dijela sekcijskog spoja	Stik na palubi	Stik na vanjskoj oplati	Stik krmenog zrcala
Redni broj mjerne točke	Odstupanja u smjeru osi Y [mm]	Odstupanja u smjeru osi Y [mm]	Odstupanja u smjeru osi Z [mm]
1	38.5	46.8	37.7
2	40.3	46.0	33.2
3	41.4	45.0	30.4
4	42.9	-	26.7
Srednja vrijednost odstupanja [mm]	40.8	46.0	32.0

5.2.7. Usporedba predloženih korekcija rubova sekcije i CAD modela

Rezultati mjerenja sekcije i svjetlog otvora napravljeni fotogrametrijskim sustavom koristili su se za kontrolu dimenzija i oblika sekcijskog spoja u fazi montaže trupa. Napravile su se dvije analize odstupanja rubova sekcijskog spoja:

- Analiza odstupanja rubova sekcijskog spoja preklapanjem rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora. Rezultat analize je prijedlog korekcija rubova sekcije. Predložene korekcije jednostavnije je izvesti na sekciji nego na konturi svjetlog otvora budući da sekcija još nije montirana u trup.
- Analiza odstupanja rubova sekcijskog spoja preklapanjem CAD modela sekcije i svjetlog otvora. Rezultat analize je definicija netočnosti konture svjetlog otvora koje su generirane na prethodno montiranim sekcijama.

Za obje provedene analize vrijedi da je kontura svijetlog otvora nepomična i referentna, a rezultati mjerenja sekcije i CAD model sekcije preklapaju se s referentnim svjetlim otvorom.

Razlike u rezultatima mjerenja koje će se dobiti usporedbom predloženih korekcija rubova sekcijskog spoja nastaju radi:

- dimenzijske netočnosti sekcije i
- utjecaja metode preklapanja rezultata mjerenja u programskom paketu.

Radi jednostavnijeg i lakšeg praćenja, usporedba rezultata mjerenja odstupanja prikazat će se za pojedini stik i šav sekcijskog spoja.

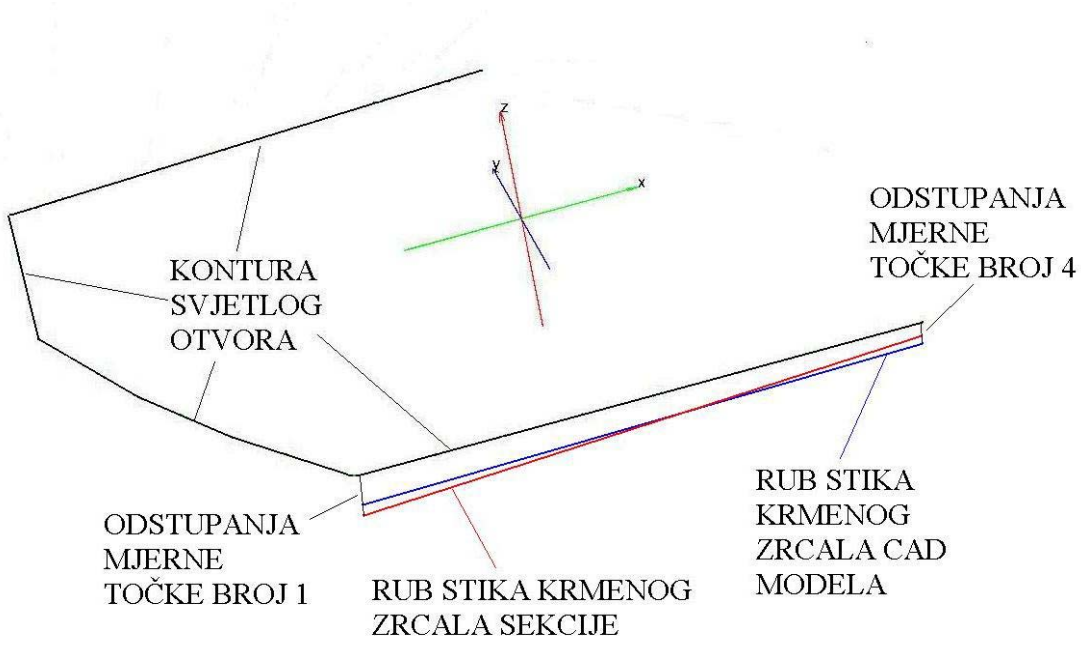
Ulazni podaci za usporedbu sadržani su u tablicama analize odstupanja rubova sekcije i CAD modela sekcije iz točaka 5.2.3 i 5.2.6.

Analiza rezultata odstupanja rubova sekcijskog spoja kod preklapanja CAD modela sekcije i svjetlog otvora napravljena je za 4 mjerne točke, dok je kod preklapanja rezultata mjerenja sekcije mjerena odstupanja barem za šest ili više mjernih točaka. Za usporedbu predloženih korekcija u ovom poglavlju uzet će se vrijednosti za 4 mjerne točke ruba sekcije koje se nalaze na približno istim položajima kao na CAD modelu sekcije.

Rezultati analize prikazat će se u tabličnom obliku. Prvi stupac tablice sadrži redni broj mjerne točke. Drugi i treći stupac sadrže vrijednosti odstupanja mjernih točaka sekcije i CAD modela sekcije od referentnog ruba svjetlog otvora u smjeru koordinatnih osi.

- **Analiza odstupanja sekcijskog spoja na krmenom zrcalu**

Na sekcijskom spoju krmenog zrcala promatrana su odstupanja rubova sekcije i CAD modela od referentnog ruba svjetlog otvora. Slikom 124 prikazana je kontura svjetlog otvora i položaj rubova sekcije i CAD modela. Izmjerena su odstupanja rubova u smjeru koordinatne osi Z tj. po visini i u smjeru koordinatne osi Y tj. po duljini, a rezultati su prikazani u tablici 31.



Slika 124: Odstupanja krmenog zrcala sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora

Tablica 31: Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na krmenom zrcalu

Mjerna točka br.	Odstupanja ruba u smjeru Y osi [mm]		Odstupanja ruba u smjeru Z osi [mm]	
	Sekcija	CAD model	Sekcija	CAD model
1	-49.0	-7.0	-43.0	-37.7
2	-24.3	-7.4	-36.2	-33.2
3	-13.9	-7.8	-26.5	-30.4
4	+38.2	-8.3	-16.5	-26.7

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka CAD modela od konture svjetlog otvora po duljini su slične i iznose od 7 do 8mm, a to znači da je rub svjetlog otvora ravan i da nema deformacija nastalih prilikom montaže prethodnih sekcija.

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka sekcije od konture svjetlog otvora po duljini bitno su različite. Vrijednost odstupanja prve mjerne točke iznosi –49mm, a četvrte 38.2mm. Razlika vrijednosti odstupanja prve i četvrte točke približno je 90 mm što sugerira jaku deformaciju ruba krmenog zrcala sekcije i potrebu opsežne dorade prilikom pripreme sekcijskog spoja.

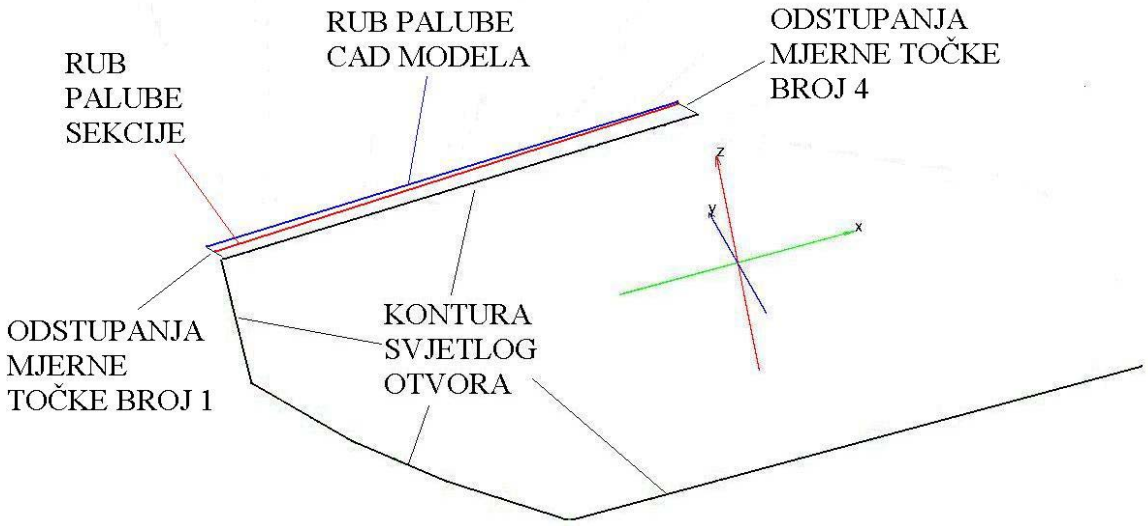
U smjeru visine tj. koordinatne osi Z na sekcijskom spoju, i kod CAD modela i kod sekcije pojavljuje se preklop opločenja. U oba slučaja preklop opločenja je veći prema boku broda, a manji prema sredini.

Vrijednost odstupanja mjerne točke broj 1 CAD modela iznosi –37.7mm, a mjerne točke broj 4 iznosi –26.7mm. Razlika vrijednosti odstupanja prve i četvrte mjerne točke je 11mm te je zaključak da je rub krmenog zrcala svjetlog otvora za taj iznos viši na boku u odnosu na sredinu broda.

Vrijednost odstupanja prve mjerne točke sekcije iznosi –43mm, a četvrte –16.5mm, a razlika odstupanja je 26.5mm Veličina preklopa ruba sekcije na boku broda kod točaka 1 i 2 veća je nego kod CAD modela sekcije. Vrijednosti preklopa ruba sekcije kod mjernih točaka 3 i 4 manja su od vrijednosti preklopa CAD modela prema sredini broda. Iz ovog proizilazi da je rub sekcije zakrenut prema boku broda što je nastalo kao utjecaj metode preklapanja rezultata u programskom paketu.

- **Analiza odstupanja sekcijskog spoja na palubi**

Na sekcijskom spoju palube promatrana su odstupanja rubova sekcije i CAD modela od referentnog ruba svijetlog otvora. Slikom 125 prikazana je kontura svjetlog otvora te položaj rubova sekcije i CAD modela. Izmjerena su odstupanja rubova u smjeru koordinatne osi Y i po visini u smjeru osi Z, a rezultati su prikazani u tablici 32.



Slika 125: Odstupanja palube sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora

Tablica 32: Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na palubi

Mjerna točka br.	Odstupanja ruba u smjeru Y osi [mm]		Odstupanja ruba u smjeru Z osi [mm]	
	Sekcija	CAD model	Sekcija	CAD model
1	+24.7	+38.5	+11.8	+7.7
2	+31.1	+40.3	+8.5	+1.3
3	+36.5	+41.4	+1.0	-5.0
4	+40.5	+42.9	-10.3	-10.3

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka u smjeru duljine i kod CAD modela i kod rezultata mjerenja sekcije mjernog projekta sekcije su pozitivne, što znači da se radi o preklopu opločenja. Oblik ruba sekcije i CAD modela je sličan. Vrijednosti odstupanja su manje prema boku, a blago se povećavaju prema sredini broda.

Vrijednost odstupanja prve mjerne točke CAD modela iznosi 38.5mm, a četvrte 42.9mm. Razlika vrijednosti odstupanja prve i četvrte točke je 4mm, te se zaključuje da je stik

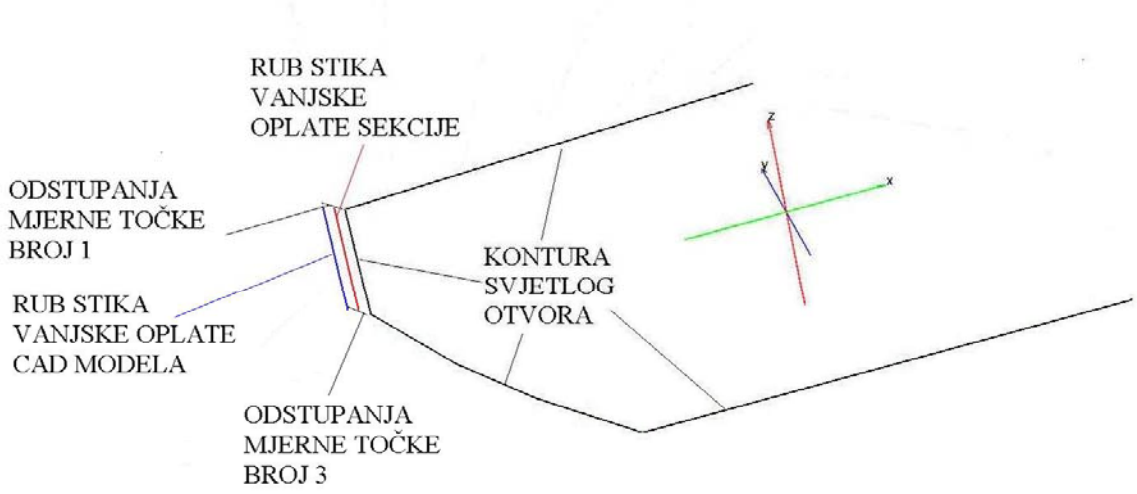
palube svjetlog otvora ravan i nema deformacija nastalih prilikom montaže prethodnih sekcija.

Vrijednost odstupanja prve mjerne točke rezultata mjerenja sekcije iznosi 24.7mm, a četvrte 40.5mm. Razlika vrijednosti odstupanja prve i četvrte točke je 16mm. Uzrok veće razlike vrijednosti odstupanja ruba sekcije od CAD modela je utjecaj metode preklapanja rezultata u programskom paketu. Analizom odstupanja elemenata preklopa na poprečnoj pregradi u poglavlju 5.2.3. zaključeno je da je sekcija kod preklapanja rezultata mjerenja zakrenuta prema boku broda.

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka ruba sekcije i CAD modela po visini su slične. Prema boku broda paluba sekcije i CAD modela je viša od ruba svjetlog otvora, a prema sredini je niža. Odstupanja na sekcijskom spoju korigirati će pripremom sekcijskog spoja u fazi montaže sekcije.

- **Analiza odstupanja sekcijskog spoja na stiku vanjske oplate**

Na stiku vanjske oplate sekcijskog spoja promatrana su odstupanja rubova sekcije i CAD modela od referentnog ruba svjetlog otvora. Slikom 126 prikazana je kontura svjetlog otvora te položaj rubova sekcije i CAD modela. Izmjerena su odstupanja rubova po duljini u smjeru koordinatne osi Y, a rezultati su prikazani u tablici 33.



Slika 126: Odstupanja stika vanjske oplate sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora

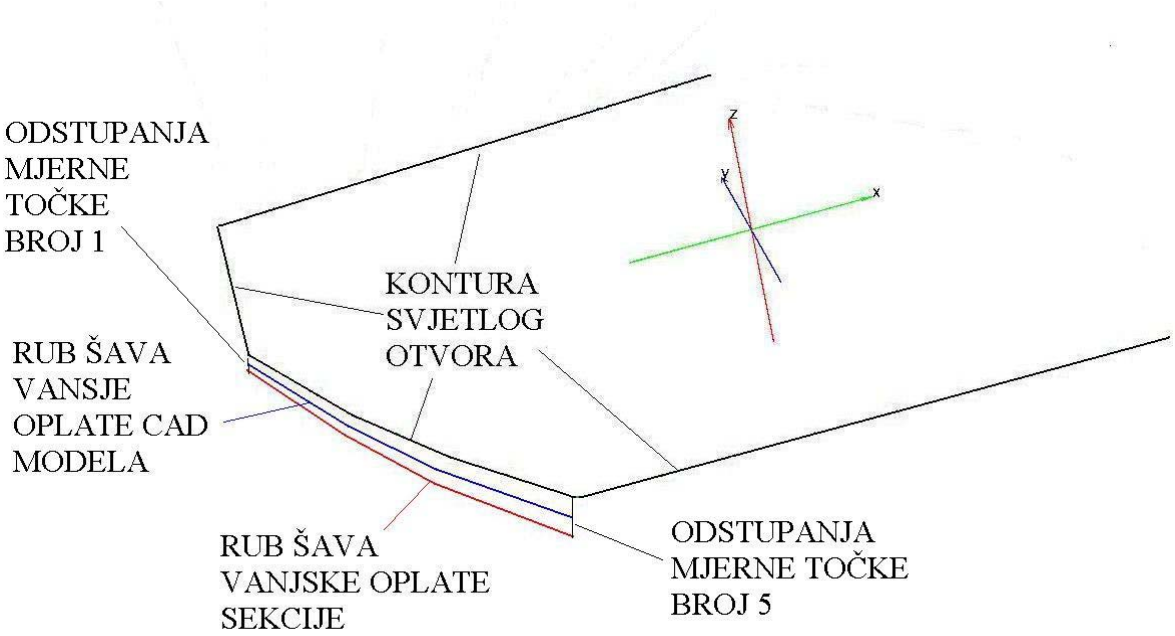
Tablica 33: Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora na stiku vanjske oplate

Mjerna točka br.	Odstupanja ruba u smjeru Y osi [mm]	
	Sekcija	CAD model
1	+25.4	+46.8
2	+19.4	+46.0
3	+23.5	+45.0

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka u smjeru duljine i kod CAD modela i kod sekcije su pozitivne što znači da se radi o preklopu opločenja. Preklop rubova CAD modela i svjetlog otvora prosječno iznosi 45 mm, a preklop rubova sekcije i svjetlog otvora 25 mm. Razlika veličine preklopa rubova CAD modela i sekcije iznosi 20 mm, a nastala je kao i kod analize odstupanja rubova sekcije i CAD modela na stiku palube, kao utjecaj metode preklapanja rezultata mjerenja na poprečnoj pregradi u programskom paketu.

- **Analiza odstupanja sekcijskog spoja na šavu vanjske oplate**

Na sekcijskom spoju šava vanjske oplate promatrana su odstupanja rubova sekcije i CAD modela od referentnog ruba svjetlog otvora. Slikom 127 prikazana je kontura svjetlog otvora te položaj rubova sekcije i CAD modela.



Slika 127: Odstupanja šava vanjske oplate sekcije i CAD modela od konture svjetlog otvora

Usporedba je napravljena prema podacima iz tablica 22 i 29 za 5 kontrolnih točaka duž šava vanjske oplate. Rezultati su prikazani u tablici 34.

U prvom stupcu tablice 34 nalazi se redni broj promatrane mjerne točke. U drugom stupcu su vrijednosti odstupanja brida sekcijskog spoja rezultata mjerenja sekcije. Vrijednosti iz tablica 22 i 29 promatrane su u različito postavljenim lokalnim koordinatnim sustavima, pa ih treba transformirati u zajednički koordinatni sustav kako bi se vrijednosti mogle usporediti. Transformacija rezultata će se napraviti tako da će se vrijednostima odstupanja mjernih točaka sekcije iz tablice 22 promijeniti predznak iz pozitivnog u negativni.

Treći stupac sadrži vrijednosti odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije iz tablice 29. Kako na šavu vanjske oplate CAD modela nema montažnog dodatka od 30 mm potrebno ga je dodati da bi se vrijednosti odstupanja mogle usporediti. Radi toga u tablici 34 četvrti stupac sadrži podatak o montažnom dodatku.

Vrijednosti u petom stupcu su odstupanja mjernih točaka CAD modela sekcije s dodanom vrijednošću montažnog dodatka.

Tablica 34: Vrijednosti odstupanja rubova sekcije i CAD modela na šavu vanjske oplate

Mjerna točka br.	Odstupanja ruba sekcije u smjeru Z osi – podaci iz tablice 22 [mm]	Odstupanje ruba CAD modela sekcije u smjeru Z osi bez montažnog dodatka – podaci iz tablice 29 [mm]	Montažni dodatak [mm]	Odstupanje ruba CAD modela sekcije u smjeru Z osi s montažnim dodatkom [mm]
1	-16.1	+18.8	30	-11.2
2	-24.5	+11.5	30	-18.5
3	-34.2	+4.7	30	-25.3
4	-40.5	-1.8	30	-31.8
5	-58.5	-7.3	30	-37.3

Usporedbom rezultata mjerenja uočava se da je oblik šava vanjske oplate CAD modela sličan obliku šava vanjske oplate sekcije. U oba slučaja na šavu vanjske oplate postoji preklop opločenja, te je vrijednost preklopa veća prema krmi broda. Razlike su u vrijednostima odstupanja mjernih točaka sekcije i CAD modela.

Vrijednost odstupanja prve mjerne točke CAD modela iznosi –11.2mm, a mjerne točke broj pet iznosi –37.3mm, što daje razliku od 26.1mm, pa se zaključuje kako je krmeni dio prethodno montiranih sekcija podignut za taj iznos.

Vrijednost odstupanja prve mjerne točake sekcije iznosi -16.1mm, a mjerne točke broj pet iznosi –58.5mm, što daje razliku od 42.4mm.

Vrijednosti odstupanja mjernih točaka sekcije veća su od vrijednosti odstupanja mjernih točaka CAD modela. Na prvoj mjernoj točci razlika veličine preklopa je 5mm, a na petoj 21mm, što znači da se veličina preklopa sekcije prema CAD modelu duž šava vanjske oplate povećava 16mm.

Razlog ovih razlika je utjecaj metode preklapanja rezultata u programskom paketu. Slično kao i kod analize odstupanja rubova sekcije i CAD modela na krmenom zrcalu došlo se do zaključka da je kod preklapanja rezultata u programskom paketu sekcija zakrenuta prema boku broda.

6. Prikladnost fotogrametrijske metode za brodogradnju

6.1. Potrebe i mogućnosti

Potreba svih faza brodograđevnog proizvodnog procesa je izrada dimenzijski točnih proizvoda te smanjenje grešaka i dodatnih radova za njihovo ispravljanje. U fazama predmontaže ova potreba je još izraženija, jer se znatno povećavaju mase i dimenzije proizvoda, sekcija i blokova. Dimenzijski točne sekcije ili blokovi preduvjet su njihove jednostavne i brze montaže u trup broda. Radi toga brodograđevni proces treba efikasnu i brzu metodu kontrole oblika i dimenzija.

Fotogrametrijska metoda može se uspješno koristiti u brodogradnji, što je u radu prikazano za faze predmontaže sekcije i montaže u trup broda.

U predmontaži sekcija, primjerima je pokazano da se mogu obaviti sve potrebne kontrole oblika, dimenzija i položaja dijelova sekcije te je moguće usporediti sekciju sa zamišljenim CAD modelom.

Specifičnosti mjerenja sekcija fotogrametrijskom metodom u predmontaži:

- Dostupnost sekcije, što znači da sekcija na međuskladištu mora biti postavljena tako da je se može nesmetano obići i snimiti s više različitih visina s pomične skele. Snimanje s različitih visina potrebno je radi točnosti rezultata mjerenja.
- Snimanje objekata velikih dimenzija, kakve su sekcije brodskog trupa, treba obaviti s preklapanjem fotografija tako da se sve postavljene mjerne točke nakon obrade fotografija i proračuna rezultata mjerenja mogu povezati u jednu cjelinu.
- Postavljanje dodatnih kodiranih mjernih točaka u okolini sekcije potrebno je da bi se mjerne točke koje se nalaze na različitim dijelovima sekcije povezale u jednu cjelinu. Često dijelovi sekcije zatvaraju šiljasti kut, pa se mjerne točke na različitim dijelovima jasno ne vide na jednoj fotografiji, već je potrebno postupno s većim brojem fotografija i dodatnim mjernim točkama prijeći s jednog dijela na drugi. Na oštrim prijelazima dijelova sekcije kodirane mjerne točke postavljaju se u gušćem rasporedu.
- Mogućnost preklapanja rezultata mjerenja i CAD modela u računalu preko tri međusobno okomite ravnine zahtijeva u planiranju i provođenju mjerenja definiranje elemenata preklapanja te postavljanje mjernih točaka. Kod sekcija brodskog trupa pogodno je što je struktura takva da se mogu izdvojiti dijelovi u tri međusobno okomite ravnine, čime je preklapanje jednoznačno određeno.

U fazi montaže potrebno je kontrolirati oblik svjetlog otvora prije montaže nove sekcije, predvidjeti položaj sekcije i svjetlog otvora te odrediti korekcije rubova sekcije kako bi se skratilo vrijeme i smanjili troškovi montaže broda na dilju.

Specifičnosti mjerenja u montaži:

- Na točnost rezultata mjerenja ovom metodom ne utječu vibracije ili pomaci podloge, što je slučaj kod korištenja klasičnih optičkih metoda mjerenja.
- Mogućnost preklapanja rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora u zajedničkom koordinatnom sustavu. Na sekciji i svjetlom otvoru potrebno je definirati elemente preklapanja na koje se postavljaju mjerne točke.
- Mogućnost usporedbe sekcije i svjetlog otvora te određivanje korekcija rubova sekcije.
- Mogućnost usporedbe CAD modela sekcije i svjetlog otvora kako bi se odredile netočnosti konture svjetlog otvora, nastale uslijed montaže sekcija.

Prema iskustvima s provedenih mjerenja u brodogradilištu, timu od dva člana treba 4 sata za mjerenje volumenske sekcije fotogrametrijskom metodom. Najveći dio vremena potreban je za postavljanje mjernih točaka te snimanje mjernog objekta. Trajanje obrade fotografija, proračuna i analize rezultata mjerenja u programskom paketu ovisi o složenosti sekcije i zadacima mjerenja te može biti u intervalu od nekoliko sati do najviše par dana.

Prema dostupnim mrežnim dijagramima predmontaže i montaže sekcija u brodogradilištu, potrebno vrijeme za mjerenje predmontirane sekcije može se izdvojiti, jer su sekcije nakon predmontaže barem 4 do 5 dana na međuskladištu, gdje čekaju termin antikorozivne zaštite. Toliko vremena sekcije provedu na međuskladištu i nakon antikorozivne zaštite kada čekaju termin montaže.

Obavljeno mjerenje predmontirane sekcije koristi se kasnije u montaži. U fazi montaže potrebno je i mjerenje svjetlog otvora, a to je moguće u trenutku kada su na brodu montirane sve prethodne sekcije. Mjerenje svjetlog otvora je jednostavnije, jer se postavlja manji broj mjernih točaka. Za mjerenje svjetlog otvora, prema iskustvima sa mjerenja, timu od dva člana potrebno je 3 sata.

Prema mrežnom dijagramu montaže sekcija u trup postoji vremenska rezerva od 2 do 3 dana do montaže sekcije u svjetli otvor, što je dovoljno za obradu fotografija i analizu mjerenja svjetlog otvora, preklapanje rezultata mjerenja sekcije i svjetlog otvora, analizu rezultata, pripremu uputa i izvedbu korekcija sekcije.

6.2. Razvoj

Opći ciljevi razvoja fotogrametrijske metode koja se koristi pri kontroli dimenzija i oblika različitih objekata odražavaju se u razvoju mogućnosti brzih i efikasnih mjerenja objekata bez obzira na njihovu veličinu i složenost.

Fotogrametrijski sustav razvijat će se u hardverskom i softverskom smislu.

Razvoj opreme, hardverskog dijela sustava, odnosi se na poboljšanje tehničkih značajki digitalnih fotoaparata i prijenosnih računala te razvoj novih uređaja s kojima bi se mogla unaprijediti mjerenja.

Digitalni fotoaparati veće rezolucije omogućuju bolju kvalitetu fotografija, a s tim bržu i kvalitetniju obradu fotografija u programskom paketu. Memorijskim karticama fotoaparata većeg kapaciteta, ubrzava se snimanje i izbjegava često prebacivanje fotografija u prijenosno računalo, što vrlo usporava snimanje.

Prijenosna računala bit će sve brža i omogućit će bržu obradu fotografija i proračun rezultata mjerenja.

Uređaji s kojima se znatno ubrzava mjerenje je oprema za bežični prijenos fotografija u prijenosno računalo. Vremena snimanja objekata te obrade fotografija i proračuni rezultata mjerenja moći će se preklapati, što može znatno ubrzati mjerenje. Memorijski kapacitet kartice fotoaparata ovdje ne predstavlja ograničenje.

Analiza rezultata mjerenja ubrzat će se korištenjem adaptera, posebno dizajniranih elemenata koji se postavljaju na mjerni objekt i automatski prepoznaju u programskom paketu. Postavljanjem adaptera postiže se brža i točnija konstrukcija rubova i karakterističnih dijelova mjernog objekta. Korištenjem adaptera pojednostavnit će se postavljanje mjernih točaka na objekt, jer će se smanjiti broj potrebnih nekodiranih točaka.

Softverski dio razvoja odnosi se na programski paket. Razvoj uređaja i pomagala za jednostavnije mjerenje uvjetuje razvoj programskog paketa.

U novijim verzijama programskih paketa radi se na tome da se prošire mogućnosti analize i prikaza mjernih rezultata. Radi se na mogućnosti automatskog prepoznavanja postavljenih traka ili rukom nacrtanih linija na osnovi kontrasta linije i podloge te automatskog definiranja ruba mjernog objekta na osnovu kontrasta ruba i okoline.

6.3. Uvjeti primjene

Uvjeti primjene fotogrametrijske metode u brodogradnji baziraju se na provedenim mjerenjima u brodogradilištu koji su prikazani u poglavljima 5.1 i 5.2.

Zadaci mjerenja bili su različiti, a različitost zadataka nije utjecala na postupak mjerenja fotogrametrijskim sustavom. Primijenila se procedura mjerenja, definirana sa 6 osnovnih koraka kako je prikazano u poglavlju 5. Zadatak mjerenja utjecao je na pojedine korake postupka mjerenja i to uglavnom na opseg provedbe.

Za korištenje fotogrametrijske metode u brodograđevnoj praksi potrebno je definirati uvjete primjene i standardizirati postupke mjerenja. U organizaciji sustavne i stalne kontrole dimenzija i oblika fotogrametrijskim sustavom u brodograđevnom proizvodnom procesu mogu se izdvojiti tri osnovna dijela:

- mjerno mjesto,
- mjeriteljski tim i
- fotogrametrijski sustav.

6.3.1. Mjerno mjesto

Na položaju mjernog objekta na kojem se obavlja mjerenje fotogrametrijskim sustavom važni su uvjeti okoline koji moraju biti ispunjeni za kvalitetno snimanje te automatsku obradu fotografija i proračun rezultata mjerenja, a odnose se na osvjetljenje, potreban prostor oko mjernog objekta i atmosferske prilike.

Snimanje mjernih objekata potrebno je obaviti na dobro osvjetljenom prostoru što je u brodogradnji slučaj kod mjerenja sekcije nakon predmontaže i kod mjerenja na montaži, jer se provode na otvorenom. Osvjetljenje je u tom slučaju prirodno, što je najbolje za zahtjevani kontrast i kvalitetu fotografija.

Nedostatak svjetla jako utječe na kvalitetu fotografija. Fotografije su tamnije, pa se teže ostvaruje jedan od osnovnih zahtjeva rada s fotogrametrijskim sustavom, a to je potreba izrazitog kontrasta mjerne točke i okoline. Slabiji kontrast između mjernih točaka i okoline na fotografijama utjecat će na njihovu obradu u programskom paketu i rezultirati detektiranjem manjeg broja mjernih točaka na objektu. S manjim brojem mjernih točaka smanjuje se točnost rezultata mjerenja, kao i kvaliteta analize rezultata.

Kada se snimanja obavljaju u zatvorenom prostoru zahtijeva se što bolje umjetno osvjetljenje mjernog objekta ili korištenje bljeskalice. S obzirom na velike dimenzije mjernih

objekata u brodograđevnom procesu i na veće udaljenosti snimanja upitna je kvaliteta fotografija napravljenih u zatvorenom prostoru korištenjem bljeskalice. Efikasnost bljeskalice slabi s većom udaljenosti snimanja, što može rezultirati tamnijim fotografijama slabijeg kontrasta i kvalitete.

Slobodan prostor oko mjernog objekta nužan je za nesmetani obilazak objekta tokom snimanja. Posebno je važan slobodan prostor oko mjernog objekta u slučaju snimanja objekata većih dimenzija, kakvi se nalaze u fazama predmontaže i montaže sekcija. Često je visina sekcije i do 5 m, a kako je potrebno snimiti s različitih visina radi točnosti rezultata mjerenja, kod snimanja će se koristiti pomoćne naprave, pomične skele ili dizalice. Prostor oko sekcije mora biti slobodan za postavljanje i prolaz ovih pomagala.

Što se tiče atmosferskih prilika, kod mjerenja s fotogrametrijskim sustavom koja se obavljaju na otvorenom prostoru, zahtjeva se suho vrijeme. Nije nužno da je prilikom snimanja mjernog objekta sunčano. Kod oblačnog vremena osvjetljenje mjernog objekta na otvorenom je dovoljno za kvalitetnu fotografiju i postizanje zahtjevanog kontrasta mjerne točke i okoline. Važno je da oprema fotogrametrijskog sustava, digitalni fotoaparat i prijenosno računalo nisu direktno izloženi padavinama.

6.3.2. Mjeriteljski tim

Druga važna karika u kontroli dimenzija i oblika fotogrametrijskim sustavom je mjeriteljski tim koji mora dobro isplanirati i provesti mjerenje. To se u prvom redu odnosi na postavljanje mjernih točaka i snimanje mjernog objekta, što direktno utječe na brzinu obrade fotografija i proračun rezultata mjerenja u programskom paketu.

Mjerenja fotogrametrijskim sustavom u brodogradilištu izvedena su s timovima od 2 i 3 člana. Temeljem provedenih mjerenja može se preporučiti tim od dva člana, koji prema predviđenom planu mjerenja postavljaju mjerne točke, snimaju mjerni objekt te provode obradu fotografija i proračun rezultata mjerenja u programskom paketu. Veći broj članova tima ne donosi prednost i bitno ne utječe na brzinu ili kvalitetu mjerenja, jer se u postupku mjerenja više vremena provede na snimanje objekta nego na postavljanje mjernih točaka. Dok mjerne točke može postavljati više ljudi, snimanje mjernog objekta obavlja jedan član mjeriteljskog tima.

Nužna znanja koja moraju imati članovi mjeriteljskog tima:

- poznavanje brodske konstrukcije,
- poznavanje zadatka mjerenja službe dimenzijske kontrole,
- osnovne zahtjeve rada s fotogrametrijskom metodom,
- rukovanje opremom fotogrametrijskog sustava i
- rad u programskom paketu.

Prve dvije stavke važne su za planiranje i provođenje mjerenja. Mjeritelj mora poznavati strukturu brodskog trupa te se mora snalaziti u radioničkom nacrtu sekcije da bi, prema zadatku mjerenja, planirao i postavio mjerne točke na strukturu.

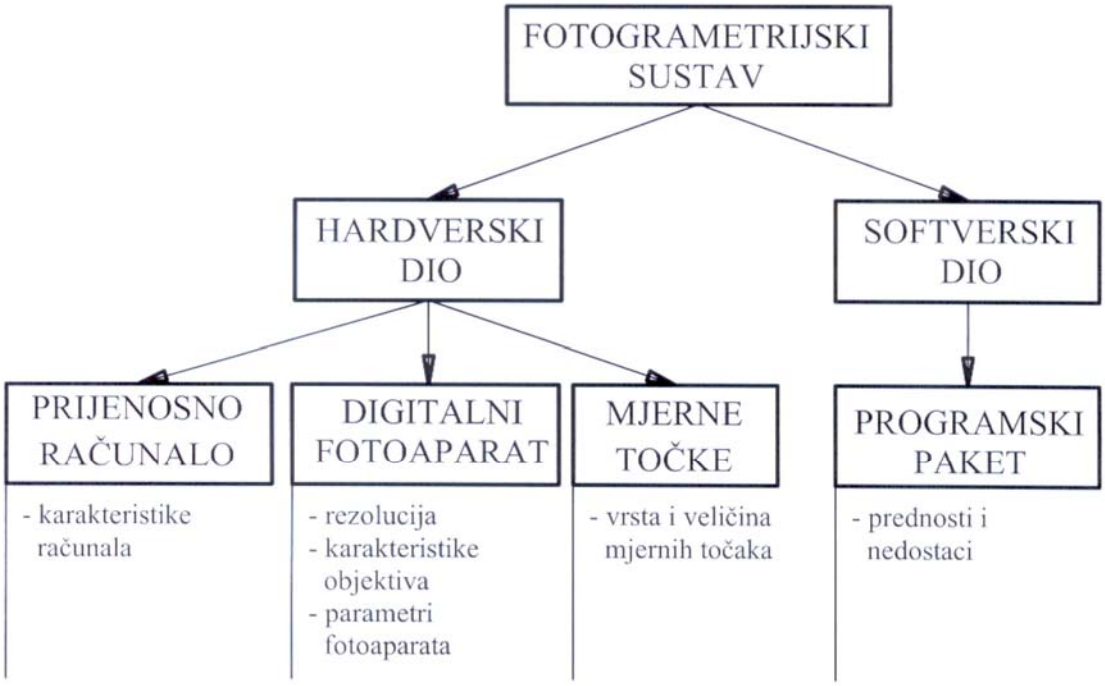
Prema dimenzijama mjernog objekta i slobodnom prostoru oko njega odredit će se veličina mjerne točke te udaljenost snimanja tako da se ispune osnovni zahtjevi rada s fotogrametrijskim sustavom, što je postojanje minimalno 5 kodiranih mjernih točaka na svakoj fotografiji te veličina mjerne točke na fotografiji koja mora biti veća od 10 pixela.

Stavka rukovanja s opremom fotogrametrijskog sustava odnosi se u prvom redu na namještanje parametara fotoaparata kod snimanja mjernog objekta. Snimljene fotografije moraju biti oštre da bi se obrada u programskom paketu i proračun rezultata mjerenja obavila automatski.

Nadalje, zadnja stavka odnosi se na rad s prijenosnim računalom i programskim paketom. Potrebno je prebaciti fotografije iz fotoaparata u prijenosno računalo i napraviti obradu fotografija, proračun, analizu i prikaz rezultata mjerenja u programskom paketu.

6.3.3. Fotogrametrijski sustav

Zahtjevi prema fotogrametrijskom sustavu sastoje se od dviju osnovnih grupa, a to su hardverski dio ili oprema za mjerenje te softverski dio koji se odnosi na programski paket, kako je prikazano slikom 128. U hardverski dio spadaju prijenosno računalo, digitalni fotoaparat i mjerne točke, a za svaki dio definirane su stavke o kojima treba voditi računa za efikasno korištenje fotogrametrijskog sustava u kontroli dimenzija i oblika u brodogradnji.



Slika 128: Dijelovi fotogrametrijskog sustava

- **Prijenosno računalo**

Funkcije računala:

- prijenos fotografija iz digitalnog aparata,
- obrada fotografija u programskom paketu,
- proračun rezultata mjerenja,
- analiza i prikaz rezultata mjerenja.

Prema iskustvu s provedenih mjerenja fotogrametrijskim sustavom u brodogradnji najvažnija karakteristika prijenosnog računala je trajanje baterije za rad na prostorima koji nisu opremljeni električnom mrežom s 220V. U brodograđevnom procesu takvi prostori su međuskladište gotovih sekcija i dilj.

Karakteristika objekata u brodogradnji su velike dimenzije, te je za uspješno snimanje potrebno napraviti veći broj fotografija. Često kapacitet memorijske kartice fotoaparata neće biti dovoljan za kompletno snimanje objekta, pa će se raditi više setova fotografija koje se moraju prebaciti u računalo. Kada se jedan set fotografija prebaci na računalo, može početi obrada fotografija i proračun rezultata mjerenja. U tom slučaju se obavlja istovremeno snimanje objekta i obrada fotografija, što će znatno ubrzati proračun rezultata mjerenja i analizu rezultata. Isto tako će se izbjeći mogućnost da se pojedini dijelovi objekta snime s nedovoljnim brojem fotografija i tako utječe na rezultat mjerenja. Radi ovih razloga preporuča se korištenje prijenosnog računala tokom snimanja mjernih objekata.

Kod karakteristika prijenosnog računala kao što su veličina tvrdog diska, veličina RAM memorije ili brzina procesora preporučavaju se veće vrijednosti radi brže obrade fotografija i proračuna rezultata mjerenja.

- **Digitalni fotoaparat**

U fotogrametrijskoj metodi digitalni fotoaparat koristi se za snimanje mjernog objekta. Karakteristike digitalnog aparata utjecat će na obradu fotografija i proračun rezultata mjerenja, a tu spadaju:

- rezolucija fotoaparata,
- karakteristike objektiva,
- mehanička stabilnost kamere i objektiva,
- veličina memorijske kartice i
- unutrašnji parametri fotoaparata, otvor blende i brzina zatvarača.

Kod mjerenja u brodogradnji koristili su se digitalni fotoaparati Nikon i Fuji koji su svojim kvalitetama odgovorili svim zahtjevima uspješnog korištenja fotogrametrijske metode u kontroli dimenzija i oblika.

Rezolucija fotoaparata zadovoljila je uvjete efikasne obrade fotografija u programskom paketu.

Veličina memorijske kartice bila je dovoljna za set od 55 fotografija. U provedenim mjerenjima taj broj fotografija nije bio dovoljan za kompletno snimanje mjernog objekta, pa su se radili dodatni setovi. Nakon svakog snimljenog seta, fotografije se prebacuju u prijenosno računalo što usporava postupak snimanja. Preporuka za efikasnije snimanje je korištenje memorijskih kartica najvećih kapaciteta.

Za snimanje objekata koristio se širokokutni objektiv žarišne udaljenosti 24 mm koji omogućava veliku dubinsku oštrinu fotografije. Predmeti na fotografiji su oštri i kada se nalaze na većim udaljenostima od snimatelja, što je važno kod snimanja s većih udaljenosti kakav je slučaj u brodograđevnom procesu. Nužan uvjet za efikasnu obradu fotografija u programskom paketu je oštra fotografija.

Parametri fotoaparata, otvor blende i brzina zatvarača, izabiru se tako da se snimanjem dobije oštra fotografija. Bitno je izbjeći utjecaj pomicanja fotoaparata na oštrinu fotografije, pa se preporučuju veće vrijednosti otvora blende i brzine zatvarača. U pokusnim mjerenjima

napravljenim u brodogradilištu koristile su se vrijednosti otvora blende 11 i brzine zatvarača 250 koje su se pokazale kao dobar izbor.

- **Mjerne točke**

Kodirane i nekodirane mjerne točke postavljaju se na rubove i plohe sekcije brodskog trupa kojima se određuje položaj u prostoru.

Karakteristike mjerne točke za efikasnu primjenu fotogrametrijske metode su jednostavno postavljanje i skidanje, te postojanost za vrijeme snimanja. Pomicanje mjernih točaka za vrijeme snimanja mjernog objekta utjecat će na točnost rezultata mjerenja.

Kod mjerenjima u brodogradnji koristile su se samoljepljive kodirane i nekodirane mjerne točke koje su su se pripremale printanjem na samoljepljivom papiru. U primjeni su se pokazale dobre, jer su ispunile sve postavljene zahtjeve za uspješno provođenje mjerenja.

Nedostatak korištenja samoljepljivih mjernih točaka je u tome što se mogu koristiti samo jednokratno. Također, priprema velikog broja samoljepljivih mjernih točaka obuhvaća printanje i rezanje što zahtjeva dosta vremena.

Veličina mjerne točke utjecat će na efikasnost automatske obrade fotografija u programskom paketu. Modul za obradu fotografija programskog paketa analizira svaku fotografiju, te na njima pronalazi mjerne točke. Kada je promjer mjerne točke na fotografiji nedovoljan za njeno automatsko pronalaženje, nužna je ručna intervencija, te se vrijeme obrade fotografija višestruko povećava. Mjerne točke većeg promjera lakše se prepozanju u programskom paketu, što je važno za brzu i efikasnu automatsku obradu fotografija.

Mjerenja u brodogradnji, prikazana u radu, izvedena su s mjernim točkama promjera 22 i 30mm.

Prednost korištenja mjernih točaka manjeg promjera je jednostavnija i lakša priprema, a nedostatak im je u tome što se kod obrade fotografija u programskom paketu zahtijeva dosta ručnih intervencija.

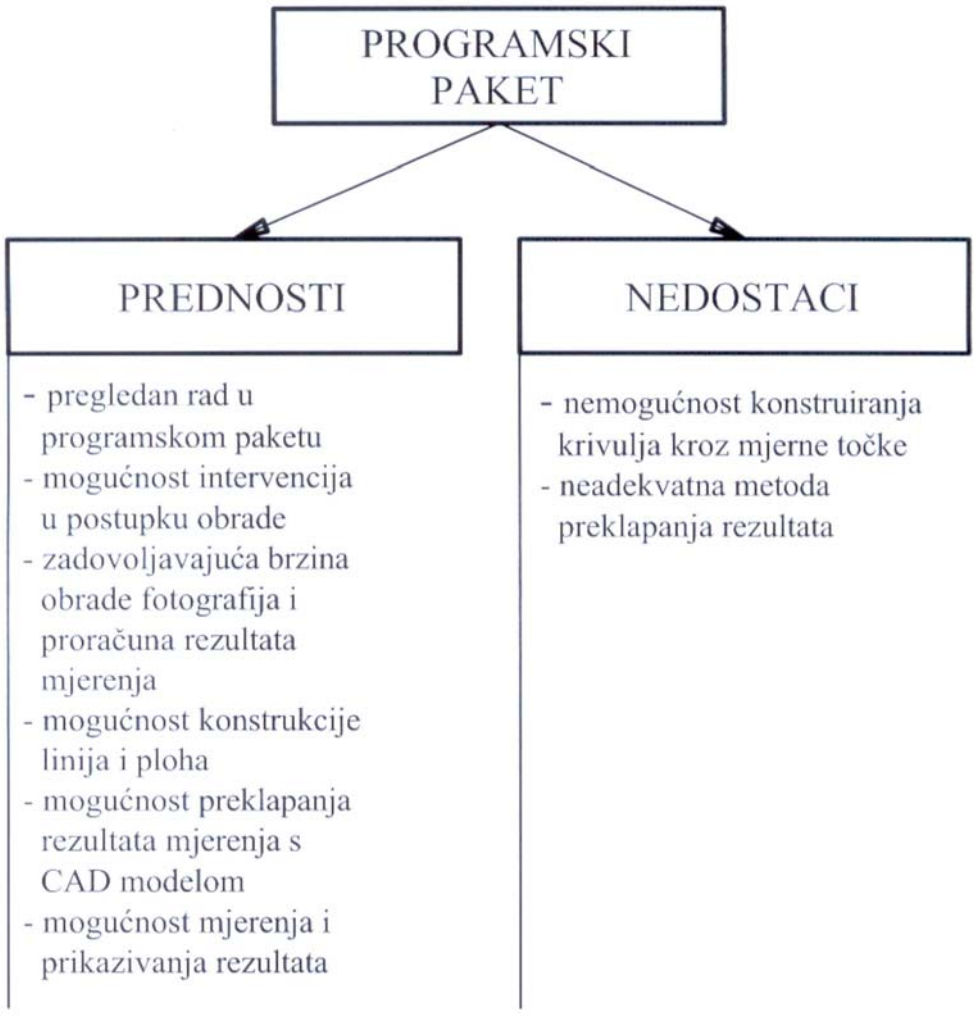
Efikasnija i brža obrada fotografija napravljena je s mjernim točkama promjera 30mm. Radi toga se za snimanje objekata velikih dimenzija, kakvi se nalaze u brodogradnji, preporučuje korištenje mjernih točaka većeg promjera.

Mjerenje fotogrametrijskom metodom u predmontaži sekcija moglo bi se ubrzati kada bi se mjerne točake postavljale na dijelove sekcije u fazi obrade elemenata označavanjem prema pripremljenoj šabloni. Tada bi se skratilo vrijeme pripreme sekcije za snimanje te bi se brže dobili rezultati mjerenja i upute za potrebne korekcije.

- **Programski paket**

Programski paket sastoji se od dva operativna modula u kojima se obrađuju fotografije proračunavaju, analiziraju i prikazuju rezultati mjerenja. Ako je mjerenje napravljeno u skladu sa zahtjevima primjene fotogrametrijske metode, obrada fotografija i proračun rezultata mjerenja obavlja se automatski. Brzina obrade fotografija i proračuna rezultata mjerenja ovisi o broju snimljenih fotografija, a broj fotografija ovisi o dimenzijama i složenosti strukture mjernog objekta te o zadatku mjerenja.

U provedenim mjerenjima u brodogradnji programski paket odgovorio je svim postavljenim zahtjevima i zadacima mjerenja. Na slici 129 istaknute su pozitivne karakteristike i nedostaci koje su uočene u radu s programskim paketom.



Slika 129: Karakteristike programskog paketa

Pozitivne karakteristike programskog paketa

U pozitivne karakteristike spada organizacija rada u programskom paketu koja omogućuje pregledan rad, kontrolu procesa obrade i vizualizaciju rezultata proračuna. Radni

prostor na ekranu podijeljen je na 5 prozora preko kojih se istovremeno prati proces obrade fotografija i proračun rezultata mjerenja.

Nakon završene obrade fotografija i proračuna rezultata, programski paket daje listu obrađenih i neobrađenih fotografija. Na obrađenim fotografijama pronađene su sve mjerne točke, te se takva fotografija koristi u proračunu rezultata mjerenja.

Kod neobrađenih fotografija neki od uvjeta primjene fotogrametrijske metode nisu ispunjeni, pa je potrebno intervenirati u procesu obrade. Nedostaci se ispravljaju ručno te se ponovo provodi obrada fotografije. Ako se nedostaci ne mogu ispraviti fotografija se izbacuje iz obrade da ne utjače na rezultat mjerenja. U takve primjere spadaju fotografije na kojima se ne nalazi dovoljan broj kodiranih mjernih točaka.

Najčešći nedostatak, koji se može ispraviti intervencijom u programskom paketu, je u tome da veličina projekcije mjerne točke na fotografiji nije dovoljna da je programski paket automatski prepozna. U tom slučaju položaj mjerne točke definira se ručno u programskom paketu. Ovakav način rada usporava postupak obrade fotografija i proračun rezultata mjerenja.

Za analizu rezultata mjerenja, te način njihovog prikazivanja značajne su mogućnosti programskog paketa kao što su konstruiranje linija i ploha kroz mjerne točke, preklapanje rezultata mjerenja s CAD modelom mjernog objekta te načini prikazivanja rezultata mjerenja.

Konstruirani elementi, kao što su linije i plohe kroz mjerne točke, služe za vizualiziranje rezultata mjerenja. Elementi mjerenja se koriste u kontroli dimenzija i oblika mjernog objekta, definiranim zadacima mjerenja.

Često je zadatak kontrole dimenzija i oblika usporedba izmjerenih vrijednosti s teorijskim vrijednostima. Jedan od načina je direktna usporedba rezultata mjerenja mjernog objekta sa njegovim teoretskim oblikom definiranim CAD modelom. Za ovakav tip usporedbe koristi se dio programskog paketa u kojem se rezultati mjerenja preklapaju s CAD modelom mjernog objekta u zajednički koordinatni sustav preko definiranih kriterija preklapanja. Nakon preklapanja mjere se odstupanja realnog objekta od zamišljenog.

Poseban dio programskog paketa omogućuje korisniku prikazivanje rezultata mjerenja prema njegovim željama, bilo da se radi o grafičkom ili tabličnom načinu prikaza. Grafički način omogućuje 3D prikaz mjernog objekta koji se može postaviti u najpovoljniji položaj, tako da se rezultati mjerenja najbolje istaknu. Rezultati se na prikazu mogu posebno izdvojiti natpisom i vrijednošću mjerenja.

Nedostaci programskog paketa

U nedostatke programskog paketa koji su uočeni u radu na mjerenjima u brodogradnji izdvaja se nemogućnost konstruiranja krivulje kroz mjerne točke. Struktura brodskog trupa na vanjskoj oplati je zakrivljena, te postoji potreba za konstruiranjem krivulje da bi se mogla izmjeriti odstupanja na tom dijelu strukture.

Kod blago zakrivljenih elemenata može se kroz mjerne točke aproksimirati linija. Vrijednosti odstupanja mjernih točaka od tako konstruiranog ruba mogu u nekom od tri koordinatna smjera biti prilično različite, što će dovesti do pogrešnih zaključaka. Točnost rezultata u ovom slučaju je upitna, jer će se sigurno pojaviti pogreška aproksimacije.

Kada su rubovi jako zakrivljeni, kao na vanjskoj oplati sekcija u području pikova, aproksimacija linijom kroz mjerne točke nije kvalitetno i dobro riješenje. U ovom slučaju, da bi se došlo do vrijednosti odstupanja, kroz mjerne točke postavlja se kontrolna ravnina te se mjere odstupanja točaka od ravnine. Tada je vrijednost odstupanja izmjerena samo u jednom smjeru koordinatne osi, dok se odstupanja u drugim smjerovima ne mogu točno izmjeriti.

Drugi uočeni nedostatak odnosi se na metodu s kojom se preklapaju rezultati mjerenja različitih mjernih objekata u zajednički koordinatni sustav. U brodogradnji je ovo karakteristično za mjerenje odstupanja sekcije od pozicije na brodu.

U programskom paketu koristi se metoda najmanjih kvadratnih odstupanja koja preklapanje provodi tako da kvadrat odstupanja svih mjernih točaka bude najmanji. Rezultati mjerenja postavljaju se u odnosu na referentnu poziciju na brodu u srednji položaj, kako je detaljnije opisano u poglavlju 4.4.1. i ilustrirano slikama 72 i 73. Rezultati mjerenja sekcije i svjetlog otvora su kruti, te se ne može predvidjeti kako će se realna sekcija ponašati i na kojim mjestima će se elastičnim deformacijom prilagoditi strukturi na brodu. Kod virtualnog preklapanja na računalu, kada se preklapaju linija ruba i ploha na koju se postavlja, postoji mogućnost negativnih odstupanja ruba od plohe, što se u stvarnoj montaži ne može dogoditi. Ako stvarno postoje odstupanja između ruba i plohe, biti će izražena samo u jednom smjeru, a ne u oba, kao što je moguće kod preklapanja na računalu.

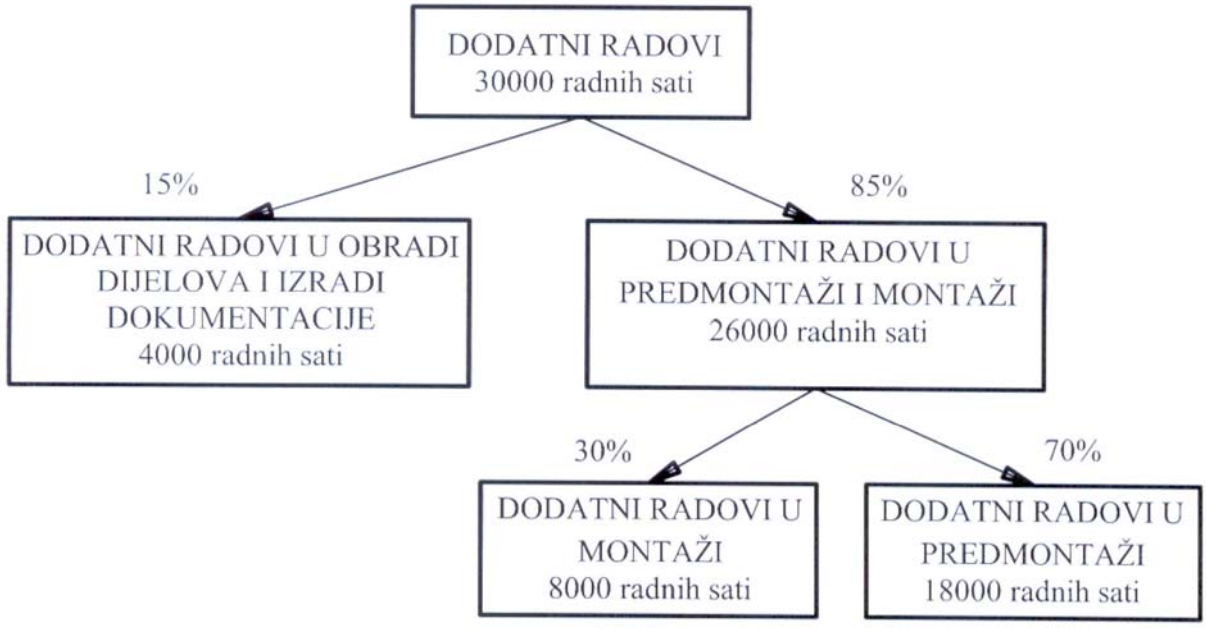
Uočeni nedostaci mogu utjecati na vrijednosti izmjerenih odstupanja i analizu rezultata mjerenja, a pogotovo mogu biti izraženi kod rješavanja problema netočnosti u fazi montaže sekcije u trup broda, kada se rezultati mjerenja sekcije i svjetlog otvora preklapaju, a temeljem mjerenja predlažu korekcije ruba sekcije.

Nedostaci se mogu ispraviti unutar programskog paketa, gdje je potrebno dodati mogućnosti konstrukcije krivulje kroz mjerne točke te korištenja dodatnih uvjeta preklapanja kako bi se mjerni rezultati sekcije i svjetlog otvora na brodu što točnije preklopili.

6.3.4. Organizacijsko-tehnološki uvjeti primjene

Efekti primjene fotogrametrijske metode u brodogradnji odnose se na smanjenje troškova dodatnih radova te na skraćenje trajanja predmontaže sekcija i montaže broda na dilju. Kvantifikacija ovih efekata počiva na analizi utroška radnih sati montaže brodogradilišta.

Prema dostupnim podacima iz brodogradilišta, za karakterističan brod iz proizvodnog programa utroši se oko 300000 radnih sati na poslovima montaže. Praćenjem utroška radnih sati došlo se do podatka da se 10% radnih sati ili 30000 utroši na dodatne radove tj. ispravljanje grešaka. Slikom 130 prikazana je razdioba utroška radnih sati dorade po odjelima brodogradilišta. Najveći dio dorade, čak 85% radnih sati, izazvanih dimenzijskim netočnostima je u predmontaži i montaži, dok 15% radnih sati dorade otpada na greške u obradi dijelova sekcije ili u izradi dokumentacije. Prema iskustvu ljudi u brodogradilištu, procijenjeno je da od ukupne količine radnih sati dorade u predmontaži i montaži karakterističnog broda, na predmontažu otpada 70% (18000 radnih sati), a na montažu 30% (8000 radnih sati).



Slika 130: Razdioba radnih sati dodatnih radova

Osim smanjenja količine radnih sati dorade, korištenjem fotogrametrije u montaži, otklonili bi se troškovi i vrijeme potrebno za korekciju rubova sekcije na dilju te bi se skratilo vrijeme montaže trupa broda.

Prema dostupnoj dokumentaciji brodogradilišta, karakteristični brod iz proizvodnog programa sastoji se od 250 sekcija od kojih 85% na sekcijskom spoju ima tehnološki dodatak od 30 mm kojeg treba odrezati prilikom montaže sekcije u trup broda. Montažni tehnološki dodatak nemaju sekcije dvodna u teretnom prostoru.

Aktivnosti u montaži sekcija su transport i postavljanje sekcija u trup broda, trasiranje i rezanje tehnoloških dodataka, pozicioniranje, priprema sekcijskog spoja, zavarivanje, brušenje zavara te kontrola i popravci. Montaža sekcija ovisi o kvaliteti brodomontera te o poziciji sekcija u trupu tj. o položaju sekcija u makroprostoru. Sekcije pikova i strojarnice posebno su zahtjevne za montažu radi složenosti strukture. To su zakrivljene sekcije, manjih dimenzija i masa, a ima ih veći broj što znači i veći broj sekcijskih spojeva koje treba pripremiti. Zakrivljenost strukture dodatno komplicira problem mjerenja i određivanja veličina korekcija nego što je to kod ravnih sekcija.

Analizom utroška radnih sati karakterističnog broda, izdvojeno je da se za aktivnosti rezanja tehnoloških dodataka utroši 4000 radnih sati.

Korištenjem fotogrametrijske metode u montaži moglo bi se utjecati na smanjenje dodatnih radova uzrokovanih dimenzijskim netočnostima te na prebacivanje aktivnosti rezanja tehnoloških dodataka u raniju fazu procesa. Ukupna procijenjena ušteda iznosi 12000 radnih sati po jednom brodu, a uključuje:

- smanjenje dodatnih radova uzrokovanih dimenzijskim netočnostima – 8000 radnih sati,
- rezanje tehnoloških dodataka – 4000 radnih sati.

Osim ovih direktno izračunatih ušteda radnih sati na montaži, postoje dodatni utjecaji na trajanje i troškove aktivnosti brodograđevnog procesa koji se ne mogu tako egzaktno izraziti.

S obzirom na proizvodni program brodogradilišta koji je većim dijelom orjentiran na brodove za prijevoz nafte i naftnih prerađevina, važan dio procesa je antikorozivna zaštita sekcija i blokova. Zahtjevi za kvalitetnom pripremom površine dijelova sekcije znatno utječu na trajanje i troškove antikorozivne zaštite. Dodatnim radovima ispravljanja dimenzijskih netočnosti sekcija i blokova u predmontaži i montaži često se uništava antikorozivni premaz, pa ga je potrebno ponovo nanijeti, što znatno produljuje trajanje i povećava troškove montaže.

Značajka aktivnosti montaže sekcija u trup broda na dilju je korištenje dizalica čiji su kapaciteti vrlo opterećeni. Često prilikom montaže dizalica postavi sekciju na brod, a nakon reguliranja položaja sekcije odlazi na druge zadatke, dok se ne obavi rezanje tehnoloških dodataka sekcije, da bi se dizalica ponovo angažirala kada treba sekciju točno pozicionirati na teorijski položaj. To znači da je potrebno angažirati dizalicu dva puta za jednu aktivnost. Korištenjem fotogrametrije u montaži i prebacivanjem aktivnosti rezanja tehnoloških dodataka u raniju fazu procesa, moglo bi se smanjiti opterećenje dizalica i skratiti vrijeme montaže broda te povećati propusnu moć tog dijela procesa.

Korištenjem fotogrametrijske metode u brodogradnji promjenio bi se način definiranja tehnoloških dodataka sekcija i blokova u montaži, što bi uvjetovalo promjenu nacrta plana dodataka. Običaj je da se tehnološki dodatak definira dijelom na sekciji, a dijelom na svjetlom otvoru. Primjenom fotogrametrije sve korekcije bi se izvodile na sekciji, pa bi se u skladu s tim u dokumentaciji sav dodatak definirao za rubove sekcije.

7. Zaključak

U doktorskom radu potvrđena je postavljena hipoteza da je fotogrametrijska metoda pogodna za kontrolu dimenzija i oblika sekcija brodskog trupa. Mjerenjima je pokazano da se fotogrametrijskom metodom mogu obaviti postavljeni zadaci kontrole dimenzija i oblika u predmontaži i montaži, što je od posebne važnosti, jer je točnost izrade međuproizvoda ključ proizvodnosti brodograđevnog procesa.

Prikazana je provedba tipičnih zadataka kontrole dimenzija i oblika fotogrametrijskom metodom u brodogradnji i to mjerenjem na predmontiranoj sekciji brodskog trupa te mjerenjem i analizom odstupanja sekcijskog spoja u fazi montaže sekcije u trup broda.

Kod predmontirane sekcije kontrolirao se oblik njenih ravnih i zakrivljenih dijelova te udaljenosti i kutevi između dijelova strukture. Pokazano je da se metoda fotogrametrije može koristiti u kontroli mjera zadanih nacrtima kada se izmjerene vrijednosti uspoređuju s teorijskim. Prednost korištenja fotogrametrijske kontrole predmontirane sekcije očituje se i u mogućnostima virtualnog preklapanja rezultata mjerenja s CAD modelom sekcije. Rezultat analize preklapanja daje odstupanja rubova i ploha predmontirane sekcije od zamišljenog oblika, pa se eventualne korekcije mogu izvesti u ranijoj fazi gradnje broda kada je to brže i jednostavnije.

Fotogrametrijska kontrola u montaži sekcije u trup broda na dilju uključuje i mjerenja svjetlog otvora, odnosno pozicije sekcije na brodu. Rezultati svih ovih mjerenja preklapaju se u programskom paketu u zajedničkom koordinatnom sustavu te se dobivaju odstupanja rubova sekcije od sekcijskog spoja. Analiza rezultata ovih mjerenja može krenuti u dva smjera:

U prvom slučaju preklapaju se rezultati mjerenja sekcije i svjetlog otvora i određuju korekcije rubova sekcije koje će trebati izvesti prije montaže sekcije u trup broda, kako bi se izbjegli radovi na dilju.

U drugom slučaju preklapa se CAD model sekcije i svjetli otvor i definiraju netočnosti konture svjetlog otvora koje su nastale montažom prethodnih sekcija.

Pouzdanost metode mjerenja u kontroli dimenzija i oblika u brodogradnji potvrđena je usporedbom vrijednosti predloženih i izvedenih korekcija rubova sekcije po smjeru i iznosu.

Prednosti korištenja fotogrametrijske metode u odnosu na dosadašnje postupke kontrole dimenzija i oblika su višestruke.

Prije svega treba istaknuti mogućnost dobivanja velikog broja mjernih točaka pomoću kojih se analiza oblika i dimenzija proizvoda može napraviti bolje i kvalitetnije u odnosu na klasične optičke metode. Većim brojem mjernih točaka može se omogućiti i proširenje zadataka kontrole te definiranje dodatnih mjerenja ako i kada je potrebno.

U odnosu na optičke mjerne instrumente, metoda fotogrametrije je manje osjetljiva na okolne utjecaje, kao što su vibracije podloge na mjernom mjestu.

Vizualizacija rezultata mjerenja u programskom paketu omogućuje praćenje obrade fotografija i proračuna rezultata mjerenja te intervenciju u postupcima kada je potrebno. Snimljene fotografije olakšavaju snalaženje u rezultatima mjerenja, jer se u svakom trenutku pomoću fotografija može dobiti jasan uvid o kojem se dijelu strukture mjernog objekta radi. Fotografije ostaju kao dokumenti pomoću kojih se mogu i naknadno provjeravati neki od rezultata mjerenja.

Prednost fotogrametrijske metode u odnosu na postojeće postupke je i korištenje računala čiji je razvoj stalan. Uz računala, razvijaju se digitalni fotoaparati, programski paketi i mogućnosti obrade fotografija, proračuni, analize i prikazivanja rezultata mjerenja, čime će se još ubrzati i olakšati mjerenje.

Disertacijom je razmatrana prihvatljivost fotogrametrije u brodogradnji. Definirane su potrebe i mogućnosti te uvjeti koje mora zadovoljiti mjerno mjesto, mjeriteljski tim te fotogrametrijski sustav da bi se metoda mogla uspješno koristiti u brodograđevnoj praksi.

Za potrebe brodograđevne prakse morat će se ispraviti uočene nedostatke programskog paketa koji su softverskog tipa.

Potrebno je dodati mogućnost konstruiranja krivulje iz oblaka mjernih točaka kako bi se onemogućile netočnosti mjernih rezultata koji nastaju uslijed aproksimacije krivulje ravnim linijama.

Potrebno je također dodati mogućnost finog pozicioniranja rezultata mjerenja kod virtualnog preklapanja u računalu. Kod analize odstupanja rubova sekcijskog spoja u fazi montaže ključno je što vjerodostojnije i točnije preklapanje rezultata mjerenja kako bi se izbjegao utjecaj metode preklapanja na mjerni rezultat. To bi se moglo ostvariti korištenjem dodatnih uvjeta pozicioniranja sekcije u trup broda u drugom krugu preklapanja rezultata mjerenja.

Fotogrametrijska metoda u brodogradnji važna je prvenstveno za kontrolu zakrivljenih sekcija pramčanog, krmenog dijela broda i strojarnice, a manje za ravne dijelove strukture kao što su sekcije dvodna, gdje se ne ostavljaju tehnološki dodaci. Kod ostalih sekcija, bilo da je riječ o bokovima, palubama, a pogotovo zakrivljenim sekcijama, ostavljaju se montažni tehnološki dodaci koji mogu iznositi 30 do 50 mm. Prema organizacijsko-tehnološkim uvjetima primjene, najveći efekt fotogrametrijske metode u brodogradnji, ostvario bi se u montaži trupa. Korekcije rubova sekcije određivale bi se i izvodile prije montaže čime bi se smanjio broj aktivnosti na montaži, što bi utjecalo na smanjenje troškova i na skraćenje trajanja gradnje broda. Dodatni efekti očekuju se u smanjenju dodatnih radova na ispravljanju dimenzijskih netočnosti, u boljoj iskoristivosti transportnih sredstava te povećanju propusne moći cjelovitog procesa gradnje broda.

Daljnji razvoj fotogrametrijskog sustava teži bržem i jednostavnijem mjerenju objekata velikih dimenzija korištenjem novih mogućnosti, kao što je primjerice bežični prijenos fotografija u prijenosno računalo. Kod obrade fotografija razvijaju se mogućnosti prepoznavanja proizvoljno nacrtanih linija na mjernom objektu i automatskog definiranja rubova na osnovu kontrasta linije i okoline. U analizi rezultata mjerenja bitna je brza i jednostavna konstrukcija elemenata iz oblaka mjernih točaka, što bi se moglo postići korištenjem posebno dizajniranih adaptera koji se automatski prepoznaju u programskom paketu.

LITERATURA

[1] Ž. Sladoljev: Tehnologija gradnje plovnih objekata – interno izdanje, FSB, Zagreb, 1987.

[2] Ž. Sladoljev: Organizacija i poslovanje brodogradilišta – interno izdanje, FSB, Zagreb, 1987.

[3] Ž. Sladoljev: Proizvodna strategija brodogradilišta – interno izdanje, FSB, Zagreb, 1995.

[4] Y. Okumoto: Dimensional Error of Assembled Blocks, Journal of Ship Production, Vol. 17, Number 1, Feb 2001, USA

[5] Y. Okumoto, S. Matsuzaki: Study of Accuracy Control of Hull Structure, Journal of Ship Production, Vol. 10, Number 1, Feb 1994, USA

[6] R. L. Storch, C. P. Hammon, H. M. Bunch, R. C. Moore: Ship Production – second edition, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey, USA 1995.

[7] S. Takechi, K. Aoyama, T. Nomoto: Virtual Manufacturing System based on Product Modeling- Developement of Computer- Aided Geometric Accuracy Management System for Steel Structures, Proceedings of The 12 International Offshore and Polar Engineering Conference, Kytakiushu, Japan, 2002.

[8] R. Hardison: Accuracy Control – The Keystone of Quality in Shipbuilding, Material Evaluation, January 1998, USA

[9] M. Nakatani, M. Oshawa: Development of the Welding Deformation Estimation Method for High Accuracy Production System in Shipbuilding, Proceedings of The 12 International Offshore and Polar Engineering Conference, Kytakiushu, Japan, 2002.

[10] R. L. Storch, S. Anutarasoti, S. Sukapanpotharam: Implementation of Variation Merging Equations for Production Data Collections in Accuracy Control: A Case Study, Journal of Ship Production, Vol. 15, No. 1, February 1999, USA

[11] D. Benčić: Geodetski instrumenti, Školska knjiga, Zagreb, 1990.

[12] D. Linić: Kontrola oblika i dimenzija u brodograđevnom proizvodnom procesu, FSB, Zagreb, 2004.

[13] F. Braum: Tehnička enciklopedija, poglavlje Fotogrametrija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1997., Zagreb

[14] M. Gomerčić: Doprinos automatskoj obradi optičkog efekta u eksperimentalnoj analizi naprezanja, Disertacija, Zagreb 1999.

[15] M. Gomerčić, S. Jecić: A New Self-Calibrating Optical Method For 3d-Shape Measurement, 17th Symposium ”Danubia-Adria” on Experimental Methods in Solid Mechanics, Prag, 2000.

[16] J. Kodvanj, A. Bakić, B. Ljubenkov, M. Gomerčić, N. Drvar: ‘Use of Photogrammetry in Shape and Dimensional Control in Shipbuilding’, Brodogradnja, god. 53, br.1, 2005.

[17] M. Gomerčić, J. Kodvanj, B. Ljubenkov, A. Bakić, A. Marinov, N. Drvar, T. Hercigonja: 'Kontrola dimenzija i oblika pomoću fotogrametrije', 16. Simpozij Teorija i praksa brodogradnje, Plitvička jezera, 21.-23.10.2004.

[18] J. C. Mugnier: Low Cost Digital Image Photogrammetry, Journal of Ship Production, Vol. 14, Number 3, August 1998, USA

[19] M. D. Holmes: 3-D Computerized Measuring Systems for Increased Accuracy and Productivity in Shipbuilding and Repair, Journal of Ship Production, Vol. 12, Number 1, Feb 1996, USA

[20] G. W. Johnson, H. F. Walker: Automated Measurement Techniques in Robotics and Quality Control with Digital-Close Range Photogrammetry, Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Conference, July 1-3, 1998, Portland, USA

[21] R. Thiyagarajan: Use of 3D Laser Scanning and Close Range Photogrammetry for Shipbuilding, 2003 Ship Production Track of the World Maritime Conference, October 17-20, 2003, San Francisco, USA

[22] G. W. Johnson, H. A. Beyer: Digital Photogrammetry in the Shipbuilding Industry – a Case Study, International Symposium on Real Time Imaging and Dynamic Analysis, June 2-5, 1998, Hakodate, Japan

[23] M. Goldan, R.J.G.A. Kroon: As-Built Product Modelling and Reverse Engineering in Shipbuilding Through Combined Digital Photogrammetry and CAD/CAM Technology, Journal of Ship Production, Vol. 19, Number 2, May 2003, USA

[24] T. P. Kersten, H. G. Maas: Digital High Resolution Still Video Camera versus Film-based Camera in Photogrammetric Industrial Metrology, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part I

[25] G. W. Johnson, S. E. Laskey, S. Robson, M. R. Shortis: Dimensional and Accuracy Control Automation in Shipbuilding Fabrication: An Integration of Advanced Image Interepretation, Analysis and Visualization Techniques, XX Congress ISPRS, Istanbul, Turkey, 2004

[26] M. Yuzaki, Y. Okomoto: An Approach to a New Ship Production System Based on Advanced Accuracy Control, Journal of Ship Production, Vol. 9, Number 2, May 1993, SAD

[27] H. Shimizu: Evaluation of Three Dimensional Coordinate Measuring Methods for Production of Ship Hull Blocks, Proceedings of The 12 International Offshore and Polar Engineering Conference, Kytakiushu, Japan, 2002.

[28] T. Zaplatić, J. Kodvanj, B. Ljubenkov: Photogrammetry in the Shipbuilding Production Process, The Eleventh Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, Lisabon, Portugal, 26-30 September 2005.

[29] Instrukcijske knjige programskog paketa TRITOP-V5.3, GOM mbH, Braunschweig, Germany, 2004.

[30] Normativ rada radionice montaže trupa, Brodogradilište Split, 2005.

[31] Tehnička i tehnološka dokumentacija broda za prijevoz naftnih prerađevina i kemikalija, Brodogradilište Split, 2005.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Boris Ljubenkov, dipl. ing. brodogradnje, rođen je u Splitu 24.09.1972. godine. Osnovnu i srednju školu (MIOC) završio je u Splitu. Nakon mature 1990. godine upisao je studij brodogradnje Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, gdje je završio prve dvije godine studija. Treću godinu studija upisao je 1992. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje je diplomirao 1996. godine kod mentora prof. dr. sc. Želimira Sladoljeva s radom "Rezanje limova u brodograđevnom procesu".

Krajem 1996. godine zapošljava se na Katedri za gradnju plovnih objekata Fakulteta strojarstva i brodogradnje kao znanstveni novak na znanstvenom projektu broj 120022 Ministarstva znanosti i tehnologije "Plovni pritegnuti mostovi" voditelja prof. dr. sc. Želimira Sladoljeva. Istovremeno pohađa poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje – smjer "Gradnja plovnih objekata".

Aktivno sudjeluje u radu na znanstvenim i razvojnim projektima. Koautor je stručnih i znanstvenih članaka u području brodograđevne tehnologije i sudionik međunarodnih i domaćih znanstvenih i stručnih simpozija. Radio je i na projektima za gospodarstvo. U sklopu nastavnih obaveza na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu izvodi vježbe iz predmeta Tehnologija brodogradnje I i II, te Organizacija i poslovanje brodogradilišta. Organizira i vodi Industrijsku praksu, te stručne ekskurzije studenata brodogradnje.

U lipnju 2002. godine obranio je magistarski rad pod naslovom "Simulacija upravljanja procesom gradnje samopodizne platforme".

Danas radi na znanstvenom projektu broj 0120041 Ministarstva znanosti i tehnologije "Automatizacija brodograđevnog procesa" voditelja prof. dr. sc. Tomislava Zaplatića.

Govori engleski jezik.

SHORT BIOGRAPHY

Boris Ljubenkov was born in Split on September 24th, 1972. He finished elementary and secondary education in Split. In 1990 he enrolled in the study of naval architecture at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split where he completed the first two years of the study. In the autumn of 1992 he enrolled in the third year of the study at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb where he graduated in 1996 with the graduation theses entitled "Plates cutting in the shipbuilding process". His mentor was Prof. Želimir Sladoljev, PhD.

He has been employed at the Department of Marine Structures Design at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture since the end of 1996 as a young assistant on the scientific project number 120022 "Tension-leg Bridges", which is managed by Prof. Želimir Sladoljev, PhD. He has attended the postgraduate studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture – the course Marine Structure Design.

He has collaborated on some scientific and development projects. He has also contributed as a co-author in professional and scientific papers in the field of shipbuilding technology. In the group of teaching activities in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, he takes out exercises for courses Shipbuilding Technology I and II and Shipyard Organization and Management. He organises and manages Industrial practices and professional excursions for students.

In July 2002 he defended Master thesis entitled 'Simulation in management of the jack-up drilling rig building process'.

At present, he is working on the scientific project number 0120041 "Automatization of the Shipbuilding Process", which is managed by Prof. Tomislav Zaplatić, PhD.