

**USE OF OPTICAL MEASURING METHODS FOR MEASUREMENT OF
DIMENSIONS IN REVITALISATION OF HYDROPOWER PLANTS**

**PRIMJENA OPTIČKIH METODA MJERENJA DIMENZIJA KOD
REVITALIZACIJI HIDROENERGETSKIH POSTROJENJA**

Dinko Tvrtković

IGH d.d. Janka Rakuše 1, Zagreb

Zdravko Baršić

Tomislav Hercigonja

Topomatika, Ilica 231, Zagreb

Key words: *Photogrammetry, co-ordinate measurement of large objects, revitalization and reconstruction of hydropower plants*

Abstract: *The Paper presents some practical problems regarding need for installation of new turbine elements into old turbine parts that will not be changed during reconstruction. One of the crucial task is how to accurately determine an existing situation (dimensions, shape, position in space etc.). Photogrammetric system TRITOP and 3-D scanner ATOS manufactured by GOM GmbH, Germany turned up to be extremely practical and accurate for such tasks. Some examples of that equipment use in reconstruction of hydropower plants in Croatia (namely HE Dubrava, HE Jaruga, HE Vinodol and others) are given further in the paper. At the end of the paper, shortly are quoted some practical examples of this method use and its possible expansion on the fields of model testing, prototype making and assembling accuracy checking.*

Ključne riječi: Fotogrametrija, 3-D mjerenje predmeta velikih dimenzija, revitalizacija i rekonstrukcija hidroenergetskih postrojenja

Sažetak: U članku se navode neki primjeri praktičnih problema prilikom potrebe ugradnje nove turbinske opreme u dijelove starih turbina koji se kod rekonstrukcije ne mijenjaju. Jedan je od osnovnih zadataka kako precizno utvrditi postojeće stanje (dimenzije, oblik, položaj u prostoru itd.). Optički mjerni sustav TRITOP i sustav za 3D-digitalizaciju ATOS firme GOM GmbH iz Braunschweig-a, Njemačka, pokazali su se kao vrhunski točni i praktični. U nastavku se navode neki primjeri prve primjene te metode i sustava u Hrvatskoj kod rekonstrukcije, odnosno revitalizacije, te se navode praktični primjeri primjene ove metode i moguće proširenje na područja modelskog ispitivanja, izrade prototipa i provjere točnosti montaže.

1. UVOD

Pod revitalizacijom turbinskih postrojenja, o kojoj se u članku govori, podrazumijeva se zamjena pojedinih dijelova turbine koji su ili istrošeni ili oštećeni, odnosno svojim oblikom zastarjeli. U pravilu su to dijelovi složenog oblika i većih ili velikih gabarita. Da bi se ti dijelovi mogli optimalno izraditi, te da bi kod ugradnje što bolje odgovarali dijelovima koji se pri rekonstrukciji nisu mijenjali, potrebno je utvrditi postojeće stanje. Pri tome se ne misli samo na dimenzije već i na oblik, odnosno odstupanje od idealnog oblika (npr. pravocrtnost, kružnost, cilindričnost i slično), te međusobni položaj svih karakteristika koje ostvaruju spoj dijelova (paralelnost, koncentričnost i slično).

Zbog vrlo uskih tolerancija dimenzija, oblika i položaja, mjerenja je nužno provesti precizno, a budući da se radi o prostornom (trodimenzijskom) problemu, potrebno je izvršiti tzv. trokoordinatna mjerenja.

2. TROKOORDINATNA MJERENJA

Trokoordinatnim mjernim uređajem (TMU) moguće je precizno provesti mjerenja dimenzija, oblika i položaja u ravnini ili u prostoru. Sastavni dio današnjih takvih uređaja je i računalo. Mjerni sustavi TMU omogućuju rezoluciju očitavanja od 0,1 μm i granične pogreške mjerenja u mikrometarskim razmjerima. Trokoordinatno mjerenje zasniva se na principu «uzimanja» točaka s površine mjerenog predmeta. Koordinate točaka tvore digitalnu sliku predmeta mjerenja u memoriji računala. Tražene mjerene veličine (dužine, promjeri, kutovi, odstupanje od oblika, odstupanje od položaja...) dobivaju se na temelju međusobnih udaljenosti i geometrijskih odnosa između dva ili više sastavnih elemenata (u ravnini ili prostoru).

Odstupanje od oblika, na primjer cilindričnost, definirano je kao razmak između dva koncentrična cilindra unutar kojih su sadržane sve točke mjerenog cilindra. Površina cilindričnog elementa će pomoću TMU biti definirana na temelju mjernih točaka čiji će broj biti dovoljno velik da se matematički definira cilindar, ali niti približan svim točkama koje se spominju u definiciji cilindričnosti. Veliki broj mjernih točaka karakterističan je za sva odstupanja od oblika, pa i odstupanja od položaja.

Treba još napomenuti da su TMU uglavnom stacionarni mjerni uređaji, smješteni gotovo redovito u klimatiziranim mjernim laboratorijima ili sličnim prostorima. Kao primjer izvedbe TMU koja se može koristiti za mjerenje na licu mjesta navodimo tzv. trokoordinatnu mjernu ruku (TMR). Volumen mjernog prostora takvih uređaja nema široki raspon gabarita kao klasični TMU, a prema deklaraciji proizvođača granične pogreške ovisno o izvedbi, kreću se od 5 do 250 μm . Za mjerenje oblika predmeta velikih dimenzija u praksi se još koriste laserski interferometri i geodetske metode (teodolit).

Metoda mjerenja koja do sada nije bila spomenuta, a korištena je za mjerenja koja se navode u članku je optička, beskontaktna metoda. Metoda se sastoji od fotogrametrijskog snimanja i trodimenzionalnog skeniranja (3D-digitalizacija). U radu je korištena oprema njemačke tvrtke GOM GmbH iz Braunschweiga.

2.1. Fotogrametrija

Fotogrametrija je optička metoda koja služi za trodimenzionalno određivanje položaja mjernih oznaka u prostoru. Na temelju stereoskopskog efekta snimanjem mjernog objekta iz dva ili više položaja omogućuje se trodimenzionalno mjerenje po istom principu kao što

čovjek, gledajući s dva oka, dobiva prostornu predodžbu svoje okoline. Mjerni objekt s nalijepljenim kodiranim i nekodiranim točkama snima se iz različitih pozicija pomoću vrhunskog digitalnog fotoaparata visoke rezolucije (slika 1).



Slika 1. Oprema za fotogrametriju



Slika 2. Kodirana referentna točka

Da bi se postigla što veća mjerna točnost, za svaki od potrebnih položaja elemenata koji se snimaju potrebno je snimiti više snimaka. Ovako snimljene digitalne fotografije obrađuju se u fotogrametrijskom programu "TRITOP".

Ovaj računarski program najprije u digitalnim fotografijama s visokom točnošću automatski pronalazi sve mjerne točke, vidljive kao svijetli kružići na tamnoj podlozi. Kodirane referentne točke program prepoznaje na temelju njihovog barkoda (slika 2) i dodjeljuje im odgovarajuće redne brojeve.

Nakon što je svakoj od referentnih točaka ustanovio položaj u svim snimkama u kojima se ona pojavljuje, program provodi predkalibraciju na principu triangulacije. Time je određen približan položaj fotoaparata u trenutku snimanja svake pojedine snimke, što omogućuje prepoznavanje svih nekodiranih mjernih točaka i računanje prostornog položaja onih koje su vidljive u barem dvije ili tri snimke. Mjerilo snimanja određuje se na temelju referentnih motki. Dužine motki su baždarene na referentnoj temperaturi 20 °C s točnošću $\pm 0,01\text{mm}$, a korigiraju se u ovisnosti o temperaturi prostora u kojem se mjerenje provodi.

Slijedi optimizacija rezultata «metodom izjednačenja zrakovnog snopa». Koordinate referentnih i mjernih točaka u prostoru (objektne koordinate), njihov položaj na svim snimkama (slikovne koordinate) te položaj i kut fotoaparata kod svakog snimanja (vanjski parametri orijentacije kamera) zajedno s karakteristikama objektiva i distorzije slike (unutrašnji parametri kamere) čine sustav jednadžbi s više tisuća nepoznanica. Ovaj sustav jednadžbi izrazito je predefiniран (više jednadžbi nego nepoznanica), a budući da su jednadžbe nelinearne, rješenje se dobiva iterativno, postupkom minimizacije pogrešaka. Konačan rezultat ove analize precizne su trodimenzionalne koordinate mjernih i referentnih točaka u zajedničkom koordinatnom sustavu i parametri svakog snimanja.

2.2. Trodimenzionalno skeniranje (3D-digitalizacija)

Fotogrametrijska analiza daje samo podatke o obliku i položaju mjernog objekta u onoliko točaka koliko je zalijepljeno na njegovu površinu. Detaljno određivanje oblika snimanog dijela između ovih fotogrametrijskih točaka provodi se sustavom za 3D-digitalizaciju "ATOS". Ovaj sustav čine mjerni senzor, mikroprocesorski upravljački uređaj i računalo s digitalizatorima slike. Mjerni senzor (slika 3.) sastoji se od specijalnog projektora

koji na površinu mjernog objekta projicira različite uzorke paralelnih linija (metoda kodiranog svjetla) i dvije CCD-kamere koje ove linije snimaju pod različitim kutom.

Položaj i kut kamera te parametre objektiva treba prije snimanja precizno odrediti, što se provodi kalibracijom pomoću referentnog križa (slika 4.), kako bi se izbjegle eventualne deformacije i netočnosti uslijed promjene temperature, vibracija prilikom transporta itd. Predmet mjerenja, ovisno o njegovoj veličini, skenira se segment po segment. Pri tome je kod svakog snimanja obuhvaćena površina jednaka veličini projicirane slike projektora na predmetu mjerenja. Projiciranje linija po metodi faznog pomaka omogućuje da svaki osnovni slikovni element kamera (piksel) postane mjerna točka, tako da kod svakog snimanja kompjuterski program na principu aktivne triangulacije automatski izračunava i preko milijun trodimenzionalnih mjernih točaka. Ovako velik broj točaka vrlo točno i detaljno opisuje oblik snimanog dijela mjernoga objekta. Pojedinačna snimanja automatski se poklapaju u jednu cjelinu (zajednički koordinatni sustav) pomoću prethodno određenih fotogrametrijskih točaka. Snimanje se ponavlja sve dok kompletna površina nije skenirana.



Slika 3. 3D-digitalizator "Atos" - mjerna glava



Slika 4. 3D-digitalizator "Atos" - kalibracija

3. MJERENJA NA HIDRO-ENERGETSKIM POSTROJENJIMA

Zavod za čelične konstrukcije Instituta građevinarstva Hrvatske d.d, Zagreb u suradnji s tvrtkom Topomatika d.o.o. iz Zagreba proveo je niz trodimenzionalnih snimanja turbinskih dijelova u svom laboratoriju i na hidroenergetskim postrojenjima uz pomoć mjernih sustava opisanih u prethodnoj točki i to kako slijedi:

- snimanje radnog kola agregata A1 na HE Dubrava,
- snimanje radnog kola agregata A2 na HE Dubrava,
- snimanje lopatice modela Kaplan turbine
- snimanje pribornice turbinskog vratila HE Dubrava A1 za izradu šablone za obradu spoja na novom generatorskom vratilu
- snimanje priključnih pribornica na kućištu turbina agregata A2 na HE Jaruga
- snimanje privodne lopatice turbine HE Rijeka
- snimanje rezervnog radnog kola HE Rijeka
- snimanje priključnih pribornica radnih kola agregata 2 na HE Vinodol
- snimanje položaja igala u odnosu na ravninu noževa šalice radnog kola Peltonove turbine na HE Vinodol.

3.1. Primjer1: Mjerenja radnog kola turbine

Od samog početka rada oba cijevna agregata hidroelektrane Dubrava, čiji je promjer radnog kola 5400 mm, uočen je nemiran rad u smislu cikličkog njihanja snage kod svakog okretaja. Na agregatu A1 ova je pojava intenzivnija nego na agregatu A2. Do sada je izvršeno više istraživanja i različitih zahvata kojima se željelo utvrditi uzrok i otkloniti postojeću pojavu. Kao jedan od mogućih uzroka nemirnog rada razmatrana je i mogućnost da turbinske lopatice nisu međusobno dovoljno geometrijski slične ili da nisu dovoljno točno postavljene na glavčinu rotora turbina. Istina je da su kod izrade turbinskih lopatica i njihove montaže provedene sve konvencionalne geometrijske i dimenzionalne kontrole i da se smatralo da su ostvarene tolerancije propisane relevantnim IEC standardima.

Tijekom osam dana rada, u turbinama agregata A1 i A2 provelo se kompletno fotogrametrijsko snimanje lopatica radnog kola s ciljem definiranja globalnog koordinatnog sustava, međusobnog poklapanja i usporedbe različitih položaja lopatica radnoga kola i stvaranja mreže referentnih točaka po površini lopatica koje su potrebne za trodimenzionalnu digitalizaciju oblika lopatica čime se je željela potvrditi međusobna sličnost i točnost montaže turbinskih lopatica radnog kola .

3.1.1. Opis snimanja

Nakon pripreme, najprije je izvršeno snimanje digitalnim fotoaparatom lopatica radnog kola s nizvodne strane, u četiri osnovna položaja rotora (svaka lopatica je snimana u donjem položaju). Snimljene lopatice su zatim uklopljene u zajednički koordinatni sustav pomoću nepomičnih referentnih točaka nalijepljenih na oblozi protočnog trakta. Na temelju trodimenzionalnih koordinata iste točke u različitim položajima rotora odredila se os i ravnina rotacije i postavio se globalni koordinatni sustav u koji su transformirana sva pojedinačna snimanja. Na ovaj je način omogućena međusobna usporedba položaja i oblika lopatica, bez obzira na trenutni položaj kod same digitalizacije površine.

Kako bi se moglo pristupiti digitalizaciji lopatica, svaku od njih snimilo se sa svih strana u donjem položaju digitalnim fotoaparatom i programom TRITOP. Odredila se mreža referentnih točaka na uzvodnoj i nizvodnoj strani lopatice (oko 200 točaka po lopatici). Slijedila je digitalizacija kompletne površine lopatica pomoću uređaja ATOS, s time da se posebnu pažnja posvetila detaljnom utvrđivanju oblika ulaznog i izlaznog brida.

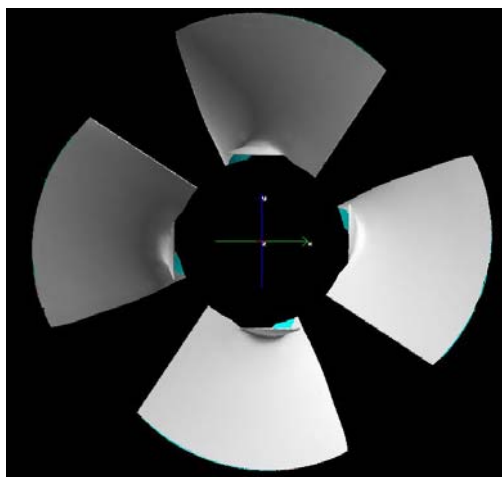
Nakon što je lopatica kompletno digitalizirana, bilo je moguće točno odrediti sve njezine dimenzije, npr. debljinu lopatice bilo na kojem mjestu, izgled hidrauličkog oblika bilo na kojem presjeku i sl. Odabirom odgovarajućih fotogrametrijskih referentnih točaka sve četiri lopatice mogle su se uklopiti u jednu cjelinu (slika 5.) ili međusobno preklopiti u isti položaj, što se kod analize koristilo za usporedbu lopatica.

Slijedilo je snimanje digitalnim fotoaparatom cijelog rotora kod različitih stupnjeva otvorenosti radnog kola, u svrhu usporedbe kutova zakreta svake lopatice oko svoje osi rotacije (otvaranje i zatvaranje lopatica radnog kola). Snimljeni su položaji kod 0%, 40% i 100%-tne otvorenosti, te dva puta kod 83%, jednom kod smanjivanja i jednom kod povećavanja otvorenosti.

Ukupno se snimilo 820 mjernih digitalnih fotografija, te se provelo 180 digitalizacija. Sve ove snimke zajedno (bez rezultata ispitivanja) činile su u računalu više od 12 GB podataka.

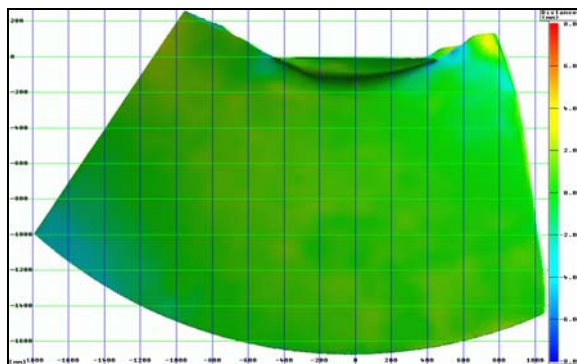
3.1.2. Usporedba oblika lopatica

3D-digitalizacijom pomoću sustava “ATOS” i poklapanjem pojedinačnih snimanja u zajednički koordinatni sustav pomoću fotogrametrijski izmjerenih referentnih točaka odredio se trodimenzionalan oblik svake od lopatica (slika 5.). Kako bi se usporedio oblik lopatica i odredila eventualna odstupanja provedo se međusobno poklapanje lopatica. Poklapanje je izvršeno iterativnim postupkom minimizacije kvadrata udaljenosti površine jedne lopaticice od druge u pravcu normale, pri čemu su lopaticice pomicanane i rotirane dok suma svih odstupanja nije postala minimalna.

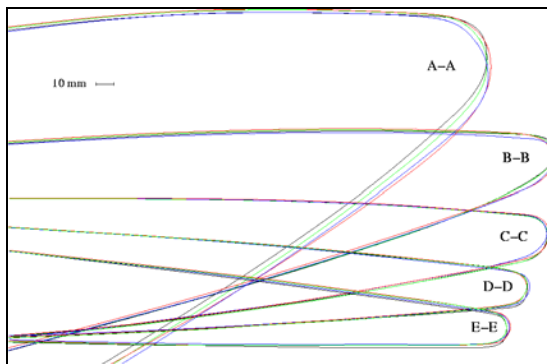


Slika 5. 3D-oblak točaka radnog kola (os Z u pravcu toka vode)

Na ovaj način iz rezultata je isključen utjecaj netočnosti položaja lopatica i dobivena su čista odstupanja njihovog oblika. Na slici 6. bojama je prikazana raspodjela ovih odstupanja s nizvodne strane lopaticice br. 1 i 2. Crvena boja predstavlja pozitivne vrijednosti odstupanja, odnosno da je površina uspoređivane lopaticice (npr. 2.) ispred tj. izvan površine referentne (npr. 1.) lopaticice. Plava boja predstavlja negativne vrijednosti, odnosno površinu uspoređivane lopaticice unutar referentne lopaticice.



Slika 6. Usporedba oblika 1. i 2. lopaticice – nizvodna strana



Slika 7. Oblik lopatica duž presjeka u okolini prednjeg, ulaznog brida. Lopatica 1 - plava boja, lopatica 2 - crvena boja, lopatica 3 - zelena boja, lopatica 4 - crna boja

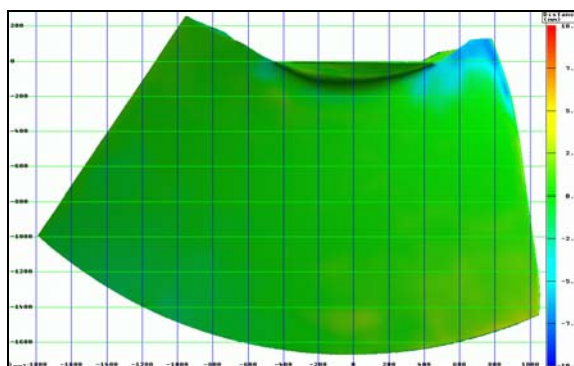
Na isti način provjeren je međusobno oblik svih lopatica.

Oblik lopatica je zatim detaljnije uspoređen tako da su lopatice presječene u više poprečnih presjeka (presijeci A-E). Na slici 7. je prikazan oblik lopatica oko bridova, gdje su odstupanja oblika bila najveća.

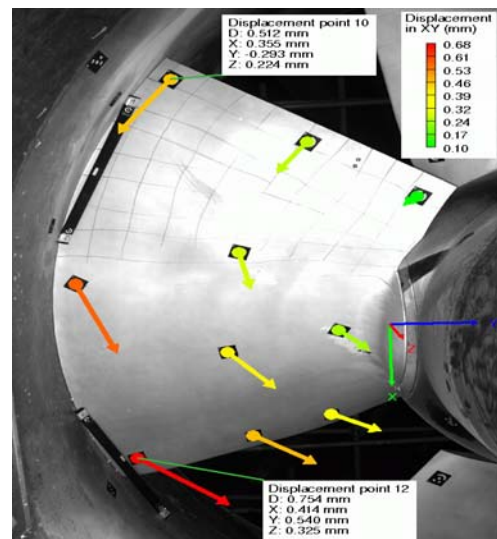
3.1.3 Usporedba položaja lopatica

Na temelju fotogrametrijski određenih trodimenzionalnih koordinata referentnih točaka s površine lopatica kod različitih položaja radnoga kola bilo je moguće prekontrolirati preciznost montaže lopatica. Lopatice su uspoređivane u svojem donjem položaju uzastopnim zakretanjem radnoga kola za približno 90° . Budući da radno kolo iz tehničkih razloga nije moguće zakrenuti za točno 90° , točan kut zakreta određen je fotogrametrijskom analizom, nakon čega je slijedila numerička korekcija kuta zakreta, odnosno snimljenog položaja lopatica.

Kombinirani postupak uzastopnog zakretanja radnoga kola, višestrukog snimanja i numeričke korekcije kuta zakreta radnoga kola odabran je u cilju postizanja veće točnosti analize. Na ovaj način sve lopatice snimljene su pod istim uvjetima. Naime, da je radno kolo snimljeno samo u jednom položaju, npr. s lopaticom broj 1 prema dolje, utjecaj sile teže bio bi različit na svaku lopaticu, pa bi njihova deformacija uzrokovala prividna odstupanja njihovog oblika i položaja u rezultatima analize. Osim toga numeričko dovođenje svake lopatice u njen donji položaj u svrhu međusobnog poklapanja bilo bi vrlo osjetljivo na netočnosti određivanja osi rotacije radnoga kola. Naime, prilikom velikih numeričkih rotacija (u ovom slučaju za 90° , 180° odnosno 270°) mala netočnost u određivanju položaja osi rotacije izazvala bi velike prividne razlike u položaju lopatica. Nakon numeričke korekcije kuta zakreta radnoga kola lopatice su poklopljene u svom donjem položaju, tako da bi u slučaju da su lopatice potpuno pravilno raspoređene po radnome kolu odstupanja između njihovih površina bila posljedica samo razlike u njihovu obliku. Slika 8. prikazuje zajednička odstupanja uslijed netočnosti položaja i oblika prema istom principu kao i kod usporedbe oblika.



Slika 8. Odstupanja površine 1. i 4. lopatice uslijed netočnosti njihovog položaja i oblika – nizvodna strana



Slika 9. Pomaci točaka lopatice uslijed djelovanja sile teže

3.1.4. Deformacije lopatica radnog kola i analiza mjerne točnosti

Prilikom obrade rezultata trodimenzionalnih snimanja polazilo se od pretpostavke da je radno kolo kruto tijelo koje se ne deformira uslijed djelovanja sile teže, a da je os rotacije bila nepomična kod svih snimljenih položaja radnoga kola. Niti jedna od ovih dviju pretpostavki nije u potpunosti zadovoljena, no mišljenja smo da to nije smanjilo pouzdanost provedene analize.

Na slici 9. prikazane su deformacije lopatice, uzrokovane silom težom. Iz vektora pomaka točaka vidi se da se lopatica savija do nekih 0.7 mm. Ovo ispitivanje provedeno je za potpuno zatvoreno radno kolo. Treba očekivati da su kod 100% otvorenosti radnoga kola deformacije lopatica primjetno veće, budući da sila teža tada djeluje okomitije na površinu lopatica. Radijalni ležaj radnoga kola ima određenu zračnost zbog koje rotor turbine nakon ukopčavanja inicijalnih pumpi, vrtnje i iskopčavanja pumpi ne liježe u potpuno isti položaj. Posljedica toga je odstupanje numerički određene osi rotacije kod različitih položaja radnoga kola za nekoliko desetinki milimetra. Tijekom analize oblika i položaja lopatica provedeno je niz testova točnosti i pouzdanosti rezultata snimanja.

Položaj mjernih točaka u globalnom koordinatnom sustavu određivan je s točnošću 0,1 do 0,2 mm. To je potvrđeno pomoću više različitih kriterija, npr.: položaj nepomičnih točaka zalijepljenih na oblogu radnoga trakta poklapao se kod različitih nezavisnih snimanja u 0,1 do 0,2 mm, a udaljenost istih točaka zalijepljenih na lopatice kod različitih se položaja radnoga kola razlikovala za 0,2 do 0,3 mm.

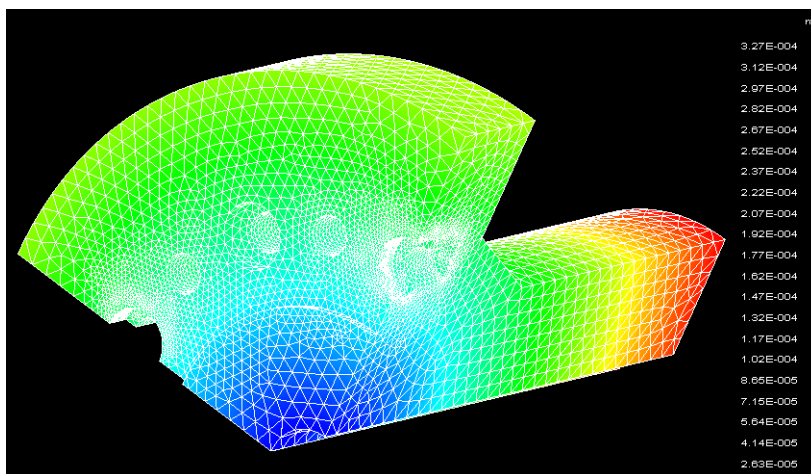
Globalni koordinatni sustav, odnosno transformacije pojedinih fotogrametrijskih snimanja prosječno su odstupali od 0,1 do 0,15 mm. Os rotacije radnoga kola kontrolirana je preko više točaka na lopaticama i numerička odstupanja uvijek su bila manja od 0.1 mm. Kutovi zakreta rotora turbine i lopatica (otvorenost radnoga kola) višestruko su određivani i odstupanja su bila manja ili oko 0,01°.

3.2 Primjer 2: Mjerenja dimenzija prirubnice turbinskog vratila

Zbog potrebe spajanja s novim generatorskim vratilom izvršeno je mjerenje dimenzija prirubnice postojećeg turbinskog vratila u HE Dubrava. Na novom generatorskom vratilu bilo je potrebno točno izraditi provrte za vijke i smične čahure. Zbog toga je trebalo snimanjem prirubnice turbinskog vratila, koje ovom prilikom nije bilo demontirano, izmjeriti stvarne promjere i položaj u odnosu na os vratila osam smičnih čahura nazivnog promjera $\varnothing 175$ H7 mm i položaje središta osam navojnih provrta M110x4 mm u odnosu na os vratila. Diobeni promjer provrta smičnih čahura i navojnih provrta iznosio je 1250 mm.

Ranije je kod izrade provrta na prirubnicama turbinskog i generatorskog vratila korištena šablona. Korištenje stare šablone za izradu provrta na novom generatorskom vratilu zahtijevalo bi dodatno razvrtavanje što se u ovom slučaju željelo izbjeći. Zato je nova šablona morala vrlo točno «preslikati» dimenzije i položaj provrta na postojećem turbinskom vratilu.

Mjerenje prirubnice turbinskog vratila izvršeno je u protočnom traktu na temperaturi koja je iznosila +2 °C. Iz tog razloga bilo je potrebno izvršiti temperaturnu korekciju rezultata mjerenja i svesti ih na dimenzije standardne radne temperature od 20 °C. Izvršenom analizom utvrđeno je da se može pretpostaviti jednoliko prostorno širenje - dilatacija. U analizi toplinskog širenja korišten je programski paket I-DEAS za numeričko modeliranje i simulaciju upotrebom metode konačnih elemenata (slika 10.). Analiza je napravljena na Zavodu za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska.



Slika 10. Konture temperaturnih dilatacija prirubnice turbinskog vratila

5. ZAKLJUČAK

Opisanim mjerenjima omogućena je

- usporedba oblika lopatica radnih kola agregata A1 i A2 na HE Dubrava, te je utvrđeno da su njihova međusobna odstupanja unutar propisanih tolerancija IEC standarda, uz interesantan podatak da je točnost postavljanja lopatica na glavčinu radnog kola veća kod agregata koji je u pogonu mirnije radio.
- snimanjem prirubnice turbinskog vratila agregata A1 na HE Dubrava dobiveni su svi potrebni podaci za izradu šablone preko koje se obradila prirubnica novog generatorskog vratila. Postignuta je tolika točnost da prilikom montaže nije bilo potrebe za dodatnim razvrtavanjem rupa za prilagodne vijke. Ističemo da je snimanje izvršeno sa skele u protočnom traktu, kod temperature od oko +2 °C i 100%-tne vlažnosti zraka.

Ujedno je potvrđena svestrana primjenjivost opisanih mjernih sustava uz slijedeće praktične pogodnosti:

- mogućnost postizanja relativno vrlo visoke točnosti mjerenja dimenzija, oblika i položaja, što ovaj sustav svrstava u pouzdani i vrlo praktični koordinatni mjerni sustav (postiže točnost od 10^{-4} do 2×10^{-5} veličine mjerenog volumena)
- mogućnost primjene na licu mjesta; mjerni sustav je relativno malih dimenzija te ga je moguće unijeti i smjestiti i u dosta skučenom prostoru
- mogućnost primjene sustava u ekstremnim uvjetima gradilišta
- mogućnost mjerenja predmeta vrlo velikih dimenzija i složenog oblika
- mogućnost detaljne analize i zorni prikaz dobivenih rezultata
- mogućnost usporedbe izmjerenog predmeta s teoretski projektiranim oblikom ukoliko je predmet konstruiran u nekom od 3D CAD programa
- digitaliziranu snimku objekta moguće je jednostavno obraditi ili direktno prebaciti u upravljački program za CNC alatni stroj itd.

Posebno vrijednu primjenu ovog mjernog sustava vidimo kod kontrole hidrauličkih oblika modela za modelska ispitivanja turbina i naknadno kod kontrole izrađenog turbinskog rotora prototipa. Ovo posljednje postaje sve interesantnije iz razloga što sve češće naručitelji rekonstrukcije turbina zahtijevaju ostvarenje tolerancije izrade radnih kola sa upola manjim tolerancijama nego što ih dozvoljava relevantni međunarodni standard (IEC 60193).

6. LITERATURA

- (1) M. Gomercic, S. Jecic, A New Self-Calibrating Optical Method For 3d-Shape Measurement, 17th Symposium "Danubia-Adria" on Experimental Methods in Solid Mechanics, Prag, 2000, 113-116.
- (2) T. J., B. D., G. K., W. D., Qualitätssicherung und 3D-Digitalisierung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion, GMA-Bericht 70, 63-71.
- (3) IEC 60193-1999. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests
- (4) D. Tvrtković, Z. Baršić, N. Abramović, M. Gomerčić: Primjena stereofotogrametrijskog snimanja kod revitalizacije hidroenergetskih objekata, HEPP 2003, Šibenik