

*Bernard Čupić, USCS d.o.o., Flaciusova 1, Pula*  
*Gordan Šikić, USCS d.o.o., Flaciusova 1, Pula*  
*Mate Grgić, Faculty of Mech. Eng. and Naval Architecture, I. Lučića 5, Zagreb*

## **INTEGRIRANI CAD-FEM SUSTAV ZA KONCEPTUALNO I PRELIMINARNO PROJEKTIRANJE BRODSKIH KONSTRUKCIJA**

### **Sažetak**

Rad opisuje kreiranje preliminarnog modela broda u TRIDENT CAD sustavu, obogaćivanje modela s podacima potrebnim za FEM analizu te kreiranjem datoteke pogodne za integraciju sa OCTOPUS/MAESTRO sustavom za FEM analizu/optimizaciju. Isto tako opisan je prihvatan na taj način kreirane datoteke i transformacija u format pogodan za učitavanje u MAESTRO FEM modeleru. U tu svrhu definirana je XML shema prema kojoj se kreira XML Mezzo datoteka koja sadrži sve podatke potrebne za potpunu integraciju ovih alata.

*Ključne riječi: integrirani CAD-FEM sustav, XML shema, generator mreže makroelemenata*

## **INTEGRATED CAD-FEM SYSTEM FOR THE CONCEPTUAL AND PRELIMINARY DESIGN OF SHIP STRUCTURES**

### **Summary**

The work describes creation of the preliminary ship model using TRIDENT CAD system, creation of the additional data necessary for the FEM analysis and the creation of the output file suitable for the integration with the OCTOPUS/MAESTRO software for the FEM analysis/optimization. Beside that, the parsing of this file and the data transformation in the format suitable for the direct load inside MAESTRO FEM modelling software is described. For that purpose the XML schema is created that describes the XML MEZZO file format that contains all the necessary data needed for the integration of these tools.

*Key words: Integrated CAD-FEM System, XML Schema, Macroelement Mesh Generator*

## 1. Uvod

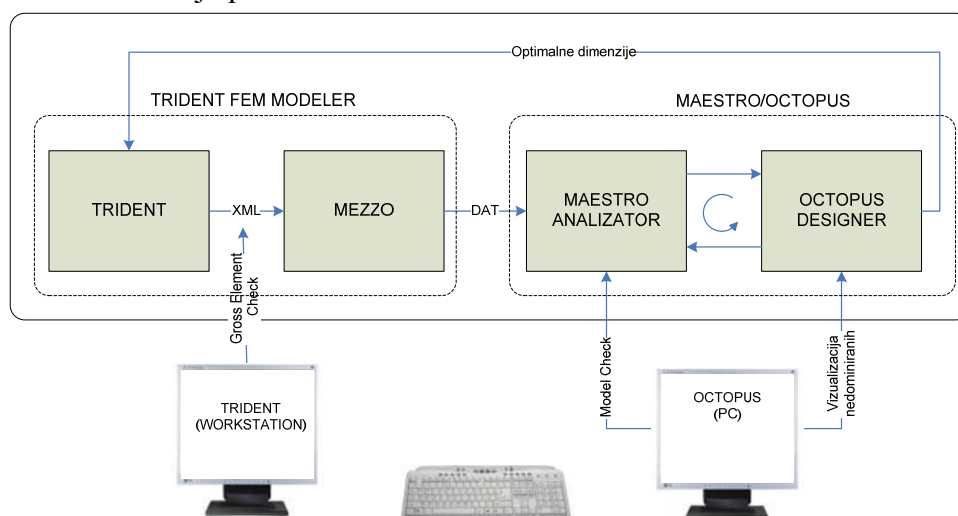
Cilj članka je prezentirati rješenje razvijeno u svrhu što efikasnijeg povezivanja CAD modela brodske strukture napravljenim u **TRIDENT** sustavu [1] s **MAESTRO-m** [2], alatom za FEM analizu i optimizaciju. Dosadašnji način rada uključivao je kreiranje nacрта iz modela te ručno modeliranje mreže konačnih elemenata.

Pri tome treba uzeti u obzir da CAD model sadrži mnoštvo podataka koji su nužni u opisu strukture, dok za FEM model dio tih podataka je suvišan i zanemaruje se tijekom modeliranja. Također, model konačnih elemenata uključuje mnoga pojednostavljena u usporedbi s originalnom strukturom. Primjerice, otvori u strukturi, za neku kvalitetu mreže, manji od određene veličine konačnog elementa se zanemaruju, zatim koljena koja vrlo malo utječu na krutost također se zanemaruju, promjena debljine opločenja modelira se tako da se čvor prebaci u najbližu ukrepu, itd.

Opisani postupak nazivamo ekvivalentno modeliranje te koliko je vremenski zahtjevno toliko je i podložno greškama. Izrada sustava TRIDENT FEM Modelera (TFM), čiji je razvoj započeo u sklopu tehnologijskog STIRP projekta [3], motivirana je nedostacima ekvivalentnog modeliranja koje se nastojalo pojednostavniti i dobrim dijelom automatizirati.

## 2. Arhitektura sustava

TFM je organiziran kao skup modula razvijenih kako bi omogućio automatski prijenos podataka iz CAD modela brodske strukture u MAESTRO model transformirajući ga istovremeno kako bi se ekvivalentno remodelirao poštujući određeni skup zakonitosti te postao pogodan za FEM analizu [4]. Veza između TRIDENT CAD modela i MAESTRO FEM modela shematski je prikazana na slici 1.



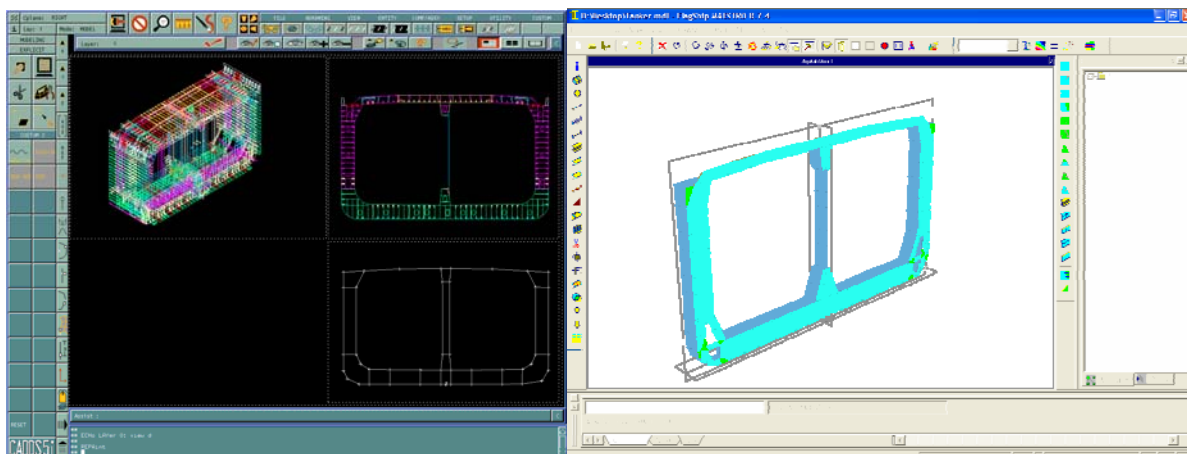
Slika 1 - Veza TRIDENT FEM Modelera i MAESTRO/OCTOPUS-a

Moduli TRIDENT FEM sustava su:

- TRIDENT filter
- MEZZO
- MAESDAP

Definirana je XML shema koja sadrži jezik za opis podataka koji kolaju između modula u cilju ostvarivanja dvosmjerne komunikacije među njima. Jedan dio sheme prikazan je na slici 3. Tim jezikom je definirana struktura podataka pohranjenih u MEZZO datoteci kojom je opisan ne samo FEM model nego i veze prema TRIDENT modelu omogućujući tako povrat

informacija u TRIDENT te eventualnu modifikaciju CAD modela nakon optimizacije (slika 1 i 2).

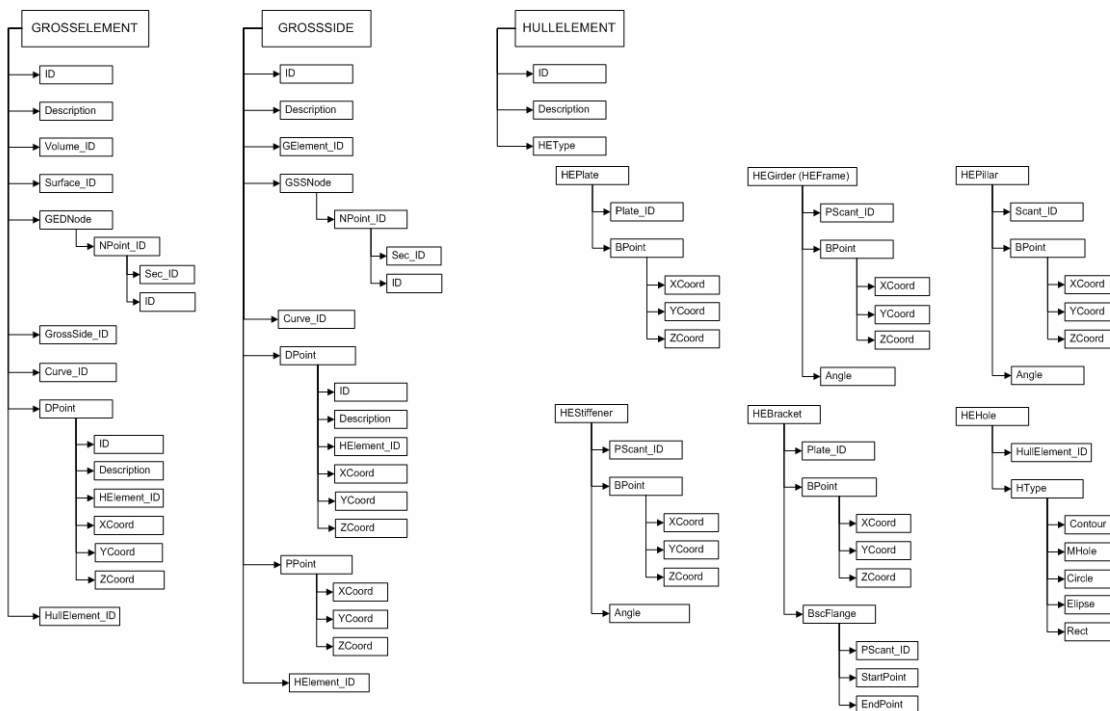


Slika 2 - Radna okolina s dva ekrana: TRIDENT (lijevo), MAESTRO (desno)

## 2.1. Opis modela prijenosa podataka

Kako bi omogućili prijenos podataka i konzistenciju između stvarnih elemenata brodske strukture i ekvivalentnih FEM elemenata, uvedene su slijedeće definicije:

- **GrossElement (GE)** je logički definirani dio strukture broda koji nosi informaciju značajnu za buduće kreiranje makroelementa odnosno FEM mreže. Jednako tako pohranjuje vezu i prema **HullElementima (HE)** koji djelomično ili u potpunosti formiraju **GE** (slika 3).
- **GrossSide** opisuje stranicu **GE**. Također pohranjuju informaciju o vezama između 2 **GE** te **HE** koji se tu spajaju (slika 3). Mogu nositi informaciju o pojedinim tipovima **HE** kao što su sponje i ukrepe. U principu, GrossSide objekti imaju ključnu ulogu u opisu modela i najviše utječu na to kako će buduća FEM mreža izgledati.
- **HullElement (HE)** opisuju stvarni element brodske strukture (slika 3).



Slika 3 - Struktura zapisa XML datoteke za GrossElement, GrossSide i HullElement

### 3. Modul TRIDENT Filter

Izlučivanje pojednostavljene geometrije elemenata brodske strukture pogodno za numeričku analizu metodom konačnih elemenata, iako relativno složen problem, moguće je provesti ukoliko se uspiju prepoznati zakonitosti koje povezuju elemente 3D modela brodske strukture.

TRIDENT paket za modeliranje brodske strukture ne veže direktno elemente stvarnog 3D modela uz predefiniране topološke cjeline. Inicijalna zamisao je apstrahirati što više konstrukcijskih detalja prisutnih u stvarnoj brodskoj konstrukciji te omogućiti globalno sagledavanje modela i pronaći bitne, topološki dominantne elemente. Te elemente je potom potrebno proglasiti globalnim nositeljima informacija o modelu i uz njih vezati stvarne elemente strukture trupa broda.

Kao dominantni nositelj informacija odabrana je ploha na kojoj leže elementi jer se da jednostavno izračunati iz geometrijskih karakteristika elementa. Kako nisu svi elementi brodske strukture ravninski, potrebno je prikupiti i podatke o zakrivljenim elementima strukture te i njih povezati u logične cjeline. Zakrivljeni elementi strukture leže na plohamo koje je projektant izgadio koristeći također TRIDENT paket te je logično te plohe odabrati za ključne topološke elemente i stvarne elemente oplata povezati sa njima. Pošto se i plohe mogu parametarski prikazati kao ravnine u  $u-v$  koordinatnom prostoru, moguće je koristiti iste algoritme za analizu i kreiranje FEM mreže.

Za povezivanje stvarnih elemenata s ravninama odabrana je struktura “*rječnika*” u kojoj je **ključ** ravnina na koju se spajaju elementi, a **vrijednost** povezana s **ključem** je skup elemenata koji leže na toj ravnini. Ravnine su definirane točkom u prostoru (3 koordinate) i vektorom normale. Radi osiguranja jednoznačnosti ravnina bilo je potrebno dogovoriti konvenciju odabira smjera normale te je definirano da smjer normale uvijek gleda od ishodišta ukoliko točka ne leži u ishodištu, odnosno prema pozitivnim smjerovima koordinatnih osi ukoliko ravnina prolazi ishodištem. Ishodište broda nalazi se, po konvenciji TRIDENT modelera, na presjecištu ravnina glavnog rebra, uzdužne simetrale (CL) i dna broda.

Algoritam prikupljanja informacija iz 3D modela podijeljen je na 5 cjelina:

- (1) Prikupljanje podataka,
- (2) Filtriranje,
- (3) Analizu,
- (4) Sintezu
- (5) Kreiranje XML stabla

#### 3.1. Prikupljanje podataka

Prije prikupljanja podataka potrebno je odabrati dio strukture broda koji treba analizirati, kreirati sklop (eng. *assembly part*) u koji će biti uključeni svi 3D modeli koji opisuju taj dio strukture te postaviti vidljive samo zanimljive dijelove strukture za analizu. Algoritam prikupljanja podataka je slijedeći:

1. Odabrati sve elemente strukture iz kojih treba kreirati FEM model. Odabir se vrši grafičkom selekcijom pojedinačno ili grupno, odnosno najčešće se odabiru svi vidljivi elementi unutar pojedinog pogleda.
2. Za svaki odabrani element brodske strukture odrediti ravninu u 3D prostoru na kojem element leži.
3. Prema izračunatoj ravnini smjestiti element u određeni skup elemenata.
4. Iscrutati sve prikupljene elemente (pojednostavljene konture).

### 3.2. Filtriranje

Proces filtriranja treba iz prikupljenih informacija izbaciti sve nezanimljive dijelove strukture. Nezanimljivi su elementi koji imaju mali utjecaj na FEM analizu i najčešće ih je najlakše eliminirati koristeći kriterij minimalne površine.

1. Moguće je označiti elemente po kriteriju veličine ili pojedinačno. Označeni elementi vizualno se razlikuju od ostatka strukture.
2. Označene elemente odstraniti iz mape.

### 3.3. Analiza

Analiza obuhvaća pronalaženje dominantnih čvorova na strukturi broda. Pri tom je potrebno, uvjetno rečeno, *zamutiti* sliku kako detalji ne bi previše iskakali i odvrćali pažnju te tako spriječili dobivanje globalne slike. Algoritam za analizu modela je:

1. Sortirati ravnine prema orijentaciji normale kako bi odredili elemente uzdužni poprečne čvrstoće.
2. Potražiti presječne pravce između ravnina koje se međusobno sijeku,
3. Za svaki presječni pravac pronaći bridove elemenata koji se naslanjaju na pravac te tragove tih bridova na elementima s kojima su spojeni. Te informacije povezati s presječnim pravcima.

Radi numeričkih nepreciznosti te konstrukcijskih detalja u izvedbi strukture, ovaj dio analize je i najosjetljiviji dio cijelog algoritma te je potrebno, iz relativno velikog skupa presječnih pravaca, pronaći one dominantne, tj. bitne za FEM analizu. Stoga je razvijen sustav ocjenjivanja ravnina koje sudjeluju u presjecima i ocijeniti presječne pravce shodno tome koje ravnine su sudjelovale u presjeku. Tako su ravnine paralelne s glavnim koordinatnim ravninama ocijenjene najviše, slijedeći nivo ocjena nosi površina elemenata koji se u kontinuitetu protežu po ravnini, a na kraju se nalaze ravnine na kojima se nalaze mali elementi i smještene su proizvoljno u prostoru. Pokazalo se da ovaj sustav ocjenjivanja daje izvrsne rezultate te proizvodi presjeke koji najmanje deformiraju matematički model i najbliže je rezultatima koje bi odabrala ljudska inteligencija.

### 3.4. Sinteza

Prije kreiranja XML modela, potrebno je stvoriti veze između elemenata određeni u analizi. Taj proces je interno nazvan premreženje (eng. *meshing*) jer stvara mrežu FEM makroelemenata iz niza dominantnih točaka određenih u procesu analize. Algoritam premreženja je:

1. za svaku ravninu u mapi prikupiti sve presječne pravce te naći njihove presječne točke
2. presječne točke projicirati u lokalni koordinatni sustav dotične ravnine i pronaći prvu rubnu točku.
3. krećući se po presječnim pravcima ići od točke do točke odabirući uvijek onu koja se nalazi najviše lijevo (njen pravac zatvara najveći kut sa prethodnim) od prethodnog pravca
4. moguće je kretati se samo ravno i lijevo te su, na taj način, eliminirani konkavni elementi
5. pri nailasku na *sljepu* točku (točka iz koje nije moguće ići nikamo) označiti ju i preskočiti
6. pri povratku u početnu točku, kreirati element i označiti stranice koje mu pripadaju
7. cijela domena je premrežena kada su sve stranice označene kao pripadne jednom ili dva elementa ili kao slobodne

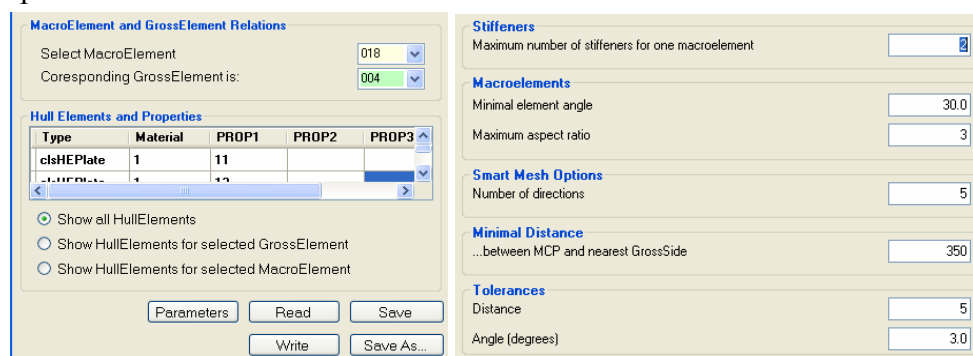
### 3.5. Kreiranje XML stabla

Prema opisu MEZZO datoteke, u kojem je definirana XML struktura datoteke, kreira se stablasta struktura i zapisuje u datoteku za prijenos podataka. Za kreiranje i provjeru XML zapisa koristi se javno dostupna biblioteka Xerces-c (<http://xml.apache.org/xerces-c/>). U samom procesu kreiranja datoteke vrši se enumeracija elemenata FEM modela.

## 4. Modul MEZZO

Generiranje općeg modela konačnih elemenata temelji se s na pripremljenom XML zapisu koji opisuje danu strukturu i na skupu pravila (tablica 1) koja nakon primijene na XML strukturu određenim redoslijedom rezultiraju formiranjem mreže makroelemenata.

Na slici 4 prikazano je razvijeno korisničko sučelje MEZZO modula. Lijevi prozor služi za provjeru učitanih GrossElementa i formiranih makroelemenata dok desni prozor prikazuje parametre buduće mreže.



Slika 4 – Korisničko sučelje modula MEZZO i pravila za generiranje makroelemenata

#### 4.1. Postojeći algoritam za generiranje mreže makroelemenata

Postupak generiranja MacroElementa se sastoji od četiri koraka:

1. definicija kontrolnih točaka (MCP) na GrossElementima
2. generiranje makroelemenata
3. odabir najbolje kombinacije makroelemenata na pojedinom GrossElementu
4. dodjeljivanje svojstava makroelementima (materijal, debljina, broj ukrepa, itd.)

U prvom koraku definiraju se kontrolne točke za generiranje mreže (MCP - Mesh Control Points) tj. točke koje su prethodnica buduće mreže. U njima su sažete informacije o svim karakteristikama strukture npr. početak odnosno završetak određene debljine lima, promjena razmaka između ukrepa, promjena tipa ukrepa i nosača i slično. Sustav prikuplja informacije analizirajući XML zapis na temelju pravila (vidi tablicu 1).

U drugom koraku, nakon što su kontrolne točke definirane, pristupa se generiranju mreže makroelemenata na pojedinom GrossElementu. Bit problema kreiranja mreže makroelemenata, u odnosu na klasične mreže je u unaprijed definiranim točkama na domeni koje se moraju uzeti u obzir prilikom generiranja makroelemenata.

Napravljeno je nekoliko algoritama za generiranje makroelemenata koje je osmislio mr.sc. Svemir Bralić, dipl.ing, suradnik na projektu. Jedan u nizu algoritama služi za preliminarno generiranje mreže makroelemenata i bazira se na postupku pobrojenja (enumeracije). Kratki opis načina rada algoritma dan je u nastavku.

Tablica 1 – Pravila za generiranje mreže makroelemenata

Ime pravila	Definicija pravila	Procedura prilikom primjene
OPĆA PRAVILA		
D-čvor (DNode)	D-čvor je definicijski čvor GrossSidea.	Svaki D-čvor se pretvara u MCP i to na način da <b>prvi</b> D-čvor postaje prvi MCP dok <b>drugi</b> D-čvor postaje zadnji MCP na GSu. MCP ima <b>nepromjenjen</b> status.
PRAVILA ZA UKREPE		
Različit tip ukrepe (Different Stiffener Type)	Različit tip ukrepe predstavlja poziciju prve ukrepe na GS koja ima različit tip od prethodne ukrepe u seriji.	Budući da jedan makroelement (ME) ne može sadržavati različite tipove ukrepa te pozicije automatski postaju MCP.
Jednolik razmak ukrepa (Uniform Stiffener Spacing)	Jednolik razmak ukrepa predstavlja poziciju zadnje ukrepe u seriji čija je udaljenost ista od prethodne ukrepe ili D-čvora.	Razmak ukrepa na pojedinom ME mora biti jednolik pa se na takvoj poziciji generira MCP.
Rubna ukrepa (Edge Stiffener)	Ukrepa koja leži na stranici ME naziva se rubna ukrepa.	Ako postoji ukrepa duž stranice ME, MCP se dodaje tako da ne utječe na pravilo Jednolik razmak ukrepa.
Maksimalni broj ukrepa (Maximum number of Stiffeners)	Ovisno o karakteristikama rješavača, maksimalni broj ukrepa na ME je propisan.	ME ne može sadržavati više od propisanog broja ukrepa. Nakon toga se dodaje MCP.
PRAVILA ZA OPLATU		
Različito opločenje (Different Plating)	Različito opločenje je slučaj kada na GS dolazi do promjene debljine lima.	Budući da ME ne može sadržavati različite debljine oplata MCP se generira na takvoj poziciji.
Najbliža ukrepa (Nearest Stiffener)	Predstavlja poziciju ukrepe na GS koja je geometrijski najbliže razmatranoj poziciji. (obično je riječ o različitoj debljini lima).	Promjena debljine se translira u geometrijski najbližu točku ukrepe ako to ne remeti pravilo Jednolik razmak ukrepa. U protivnom, MCP se postavlja u drugu najbližu ukrepu. Poseban slučaj se javlja kada je pozicija u neposrednoj blizini D-čvora. Tada se MCP prebacuje u D-čvor.
PRAVILA ZA MAKROELEMENTE		
Sigurnosno pravilo (Safety Rule)		Ukoliko postoje dvije ili više mogućnosti modeliranja jednog te istog problema uzima se ono koje će rezultirati većom sigurnosti konstrukcije.
Odnos stranica ME (ME Aspect Ratio)	Odnos stranica ME je omjer između maksimalne i minimalne dužine njegovih stranica.	Odnos stranica ME mora biti u granicama propisanim pravilima.
Minimalna dimenzija ME (ME Minimum Size)	Minimalna duljina stranice odgovara duljini najkraće stranice ME:	Duljina najkraće stranice ME mora biti veća ili jednaka minimalnoj propisanoj duljini stranice ME.
Uzdužna struktura (Primary Structure)	Uzdužna struktura je primarna.	Kada je nužno posegnuti za ekvivalentnim modeliranjem, ono se radi na sekundarnoj strukturi, tj. modificira se poprečna struktura.
Ekvivalentna debljina (Equivalent Thickness)	Promjena debljine ME.	Ukoliko otvor unutar ME nije moguće modelirati vrši se korekcija debljine lima.

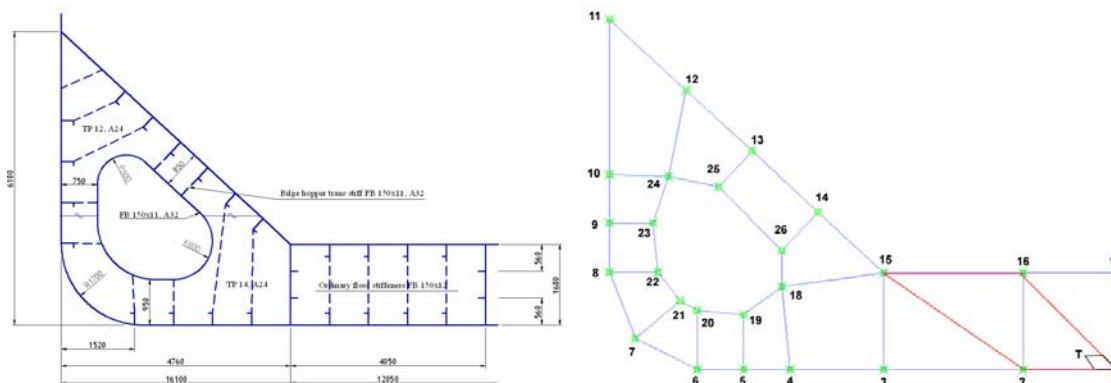
Na slici 5 prikazana je skica poprečne strukture donjeg krilnog tanka i dijela rebrenice broda za prijevoz rasutog tereta. Na slici su prikazane definirane kontrolne točke (MCP - označene su brojevima 1 do 26) i idealna mreža četverokutnih makroelemenata (ukupno 13) za postojeći raspored točaka. Ukupan broj četverokutnih makroelemenata koji se mogu generirati s obzirom na broj kontrolnih točaka iznosi 14950.

Generiranje svih 14950 elemenata i njihova analiza te odbacivanje nepotrebnih usprkos velikoj brzini današnjih računala nije prihvatljivo. Iz toga razloga postupak pobrojenja je modificiran tako da se broj generiranih elemenata znatno reducira.

Za sve MCP na danom GrossElementu formira se vektor koji ima sortirane sve MCP s obzirom na udaljenost od nje same. Tako npr. u slučaju točke 1 (vidi sliku 5) prvi dio vektora izgleda  $v_1^T = \{1 \ 2 \ 17 \ 16 \ 3 \ 15 \ \dots\}$ .

Nakon što su formirani vektori, pristupa se formiranju makroelemenata oko svake pojedine kontrolne točke. Prvi čvor budućeg elementa postaje trenutna kontrolna točka (točka 1). Za sljedeću točku se uzme njoj najbliža točka (točka 2). Treća i četvrta točka se odabiru tako da se uzimaju prethodnoj točki najbliže točke, na način da zbroj udaljenosti svih točaka elemenata od trenutne točke (točka 1) bude minimalan. Kontrolirajući broj točaka u koje se ide iz pojedine točke (broj smjerova – Number of directions) i kvalitetu nastalih elemenata

(preko minimalnog kuta između stranica elementa – Minimal element angle) znatno se smanjuje broj generiranih elemenata. U primjeru sa slike 5 uz osam zraka generira se 210 elemenata što je značajno smanjenje u odnosu na mogućih 14950 elemenata.



Slika 5 – Primjer dijela poprečne strukture broda za rasute terete te princip generiranja četverokutnih elemenata

Slijedeći korak u generiranju mreže je odabir najbolje kombinacije elemenata za dani GrossElement. Naime, među nastalim elementima postoji dio onih koji se međusobno preklapaju i potrebno je izbaciti lošije elemente. U tu svrhu napravljene su dvije skupine algoritama za "čišćenje". Prva skupina algoritama eliminira istovjetne elemente koji su nastali iz različitih početnih kontrolnih točaka, a zapravo sadrže iste čvorove. Ti algoritmi su procesorski vrlo jeftini i primjenjuju se prvi. Druga skupina algoritama je procesorski znatno skuplja jer provjerava da li se pojedini elementi preklapaju te eliminira lošiji element na temelju parametara kvalitete mreže (kutovi i odnos stranica elementa).

Jedan iz druge skupine je algoritam infinitezimalnog paralelograma. Algoritam polazi od pretpostavke da se dva elementa mogu preklapati ako imaju zajednički barem jedan čvor (slika 5). Oko zajedničkog čvora se formira infinitezimalno mali paralelogram u smjeru stranica jednog elementa. Test točka T se dobije kao zbroj dvaju vektora koji su formirali paralelogram. Dva se elementa preklapaju ako se testna točka nalazi unutar elementa čije se preklapanje provjerava. U primjeru sa slike točka T je nastala na elementu 1-2-15-16 i provjerava se da li se ona nalazi unutar elementa 1-2-16-17 te se eliminira prvi element jer ima lošije karakteristike. Nakon formiranja četverokutnih elemenata na dijelovima GrossElementa koji su ostali nepopunjeni generiraju se trokutasti elementi.

Posljednji korak u postupku generiranja mreže elemenata je dodjeljivanje svojstava debljine i broja ukrepa elementima. Debljina se dobiva provjerom kojem HullElementu tipa Plate element pripada. Ukoliko se ustanovi da određenom elementu ne pripada niti jedna debljina onda se taj element briše jer je riječ o elementu kojega je algoritam generirao na mjestu gdje postoji otvor.

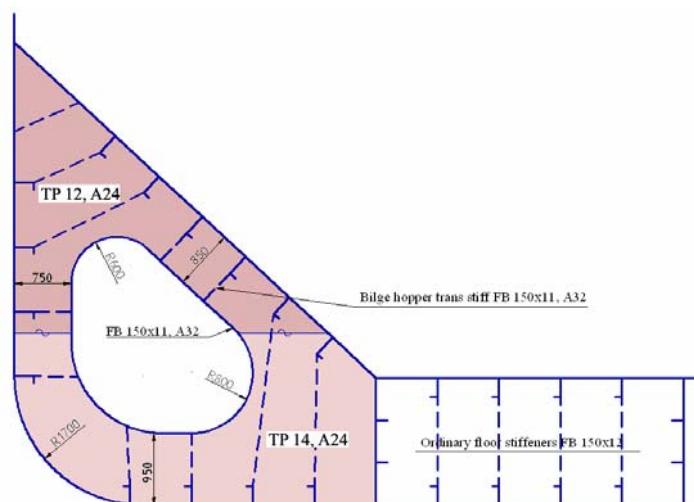
Ukrepe se dodjeljuju na način da se provjeri relativan položaj HullElementa tipa Stiffener prema čvorovima makroelementa. Rezultat provjere može biti da ukrepa djelomično, potpuno ili uopće ne prolazi preko ispitivanog makroelementa. Nakon provjere svih ukrepa koje se nalaze na GrossElementu dobije se ukupni broj ukrepa na ispitivanom makroelementu. One ukrepe koje se nalaze duž stranica makroelementa upisuju se kao rubne s informacijom od kojeg do kojeg čvora se protežu. Prilikom dodjeljivanja debljina i ukrepa makroelementima određuje se i njihov materijal na temelju materijala HullElementa iz kojeg su nastali.

Detaljan opis algoritma za generiranje mreže dan je u [5]. Algoritam nažalost nije uspio generirati mreže za zadane bazične test primjere (npr. za model sa slika 5 i 6).

#### 4.2. Novi algoritam za generiranje mreže makroelemenata

Prvi korak u stvaranju novog algoritma za generiranje mreže je analiza prethodnog algoritma, kako bi se uočili eventualni nedostaci te kako bi se identificirali dijelovi algoritma koji bi se mogli iskoristiti kao početna točka u razvoju novog.

Analizom prethodnog algoritma za generiranje mreže, uočeno je par sustavnih problema, koji su se u više različitih oblika stalno pojavljivali. Između ostalog, stalno se javljao problem vezan za identifikaciju otvora. Naime, kako se GrossElementi mogu sastojati od više spojenih HullElementa tipa Plate, moguća je situacija da se na dodiru takva dva HullElementa stvori prethodno nepostojeći otvor ili da se formira element na mjestu gdje bi trebao biti otvor (slika 6). Ova se situacija redovito javlja kada dio otvora pripada jednom HullElementu, a ostatak drugom. Tada niti jedan HullElement zasebno promatran ne sadrži otvor, dok je GrossElement sadrži.



**Slika 6** – Primjer sa slike 5 s označenim HullElementima tipa Plate za uzvojno koljeno krilnog tanka

Ovaj će se problem rješavati korištenjem pristupa “orijentiranih krivulja”. Svaka zatvorena krivulja, čija je površina pozitivna, opisana je nizom točaka orijentiranih u pozitivnom matematičkom smjeru. Vrijedi i obratno, niz točaka orijentiranih u negativnom matematičkom smjeru tvori površinu s negativnim predznakom, tj. otvor. Korištenjem ovakvog pristupa, pri spajanju više HullElementa u jedan GrossElement te nakon identificiranja i eliminiranja dvostrukih rubova, novostvoreni element će imati jednu pozitivno orijentiranu konturu te nula ili više negativno orijentiranih kontura. Pozitivno orijentirana kontura će biti kontura samog GrossElementa, a sve negativno orijentirane konture predstavljat će novostvoreni otvor.

Mreža koja će se generirati korištenjem pravila prikazanih u Tablici 1, koja su bila razvijena tijekom razrade prethodnog algoritma generiranja mreža. Ukoliko se pokaže potrebnim, ova će se pravila modificirati i dopunjavati. Nakon završetka prve faze, razmatra se mogućnost dodavanja korisnički definiranih pravila, kao proširenje prethodno definiranih pravila koja bi omogućila veću fleksibilnost u generiranju mreže makroelemenata. Generiranje mreže će se raditi metodom multikriterijskog odlučivanja, gdje će se korištenjem teorije grafova, tražiti suboptimum koji će zadovoljavati sve definirane zahtjeve.

Sam algoritam se razvija korištenjem MATLAB programskog paketa, a bit će realiziran korištenjem modernih tehnika programiranja. U svrhu povećanja brzine izvršavanja, koristiti će se skup biblioteka pisanih u C++ programskom jeziku s intenzivnim korištenjem metaprogramiranja s predlošcima.

Biblioteke će biti neovisne o operativnom sustavu, a ciljane platforme su Windows i razne inačice UNIX operativnog sustava.

## 5. Modul MAESDAP

Nakon definiranja opće mreže makroelemenata potrebno je takav zapis prilagoditi određenom alatu koji omogućava proračun konačnih elemenata (MAESTRO).

MAESDAP (kratica od MAestro DATA Preparation) je dio aplikacije pomoću kojeg se kreiranjem podatkovne datoteke dobiva MAESTRO model konačnih elemenata. MAESTRO učitavanjem podatkovne datoteke dobiva sve nužne podatke o modelu.

Osnovni problemi koji se tu javljaju proizlaze iz činjenice da je MAESTRO napravljen tako da omogući brzo ručno modeliranje. Stoga je nužno reducirati postojeći MEZZO model kako bi ga se prilagodilo MAESTRO zapisu.

MAESTRO model cijelog broda se sastoji od niza podstrukture (substructures) koje sačinjavaju moduli (modules). Modul je osnovni dio svakog MAESTRO modela i predstavlja jednu logičku cjelinu u sklopu strukture broda. Uzdužno u smjeru x osi moduli se sastoje od više dijelova (sections) tj. makroelemenata koji obično predstavljaju razmak okvirnih rebara. Moduli su definirani preko rubnih točaka (endpoints) kojima se definiraju koordinate samo početnog i krajnjeg presjeka dok se sve točke između interpoliraju.

U općem slučaju datoteka se sastoji od deset logički odvojenih dijelova:

1. opći podaci o modelu (jedinice, karakteristike materijala, kriteriji, itd.)
2. definicija modula (geometrija, pozicija i dimenzije strukturnih elemenata, itd.).
3. povezivanje modula u podstrukture i povezivanje podstrukture u cjelovitu strukturu
4. definicija masa: "volumeni" (tankovi, skladišta, odijeljenja, itd.), skalirana masa strukture, grupe čvornih masa i velike mase s višestrukim osloncima
5. rubni uvjeti
6. definicija slučajeva opterećenja
7. definicija opterećenja posebnih tipova brodova
8. podaci koji se odnose na granične slučajeve, načine sloma i podobnost strukture
9. podaci za optimizaciju
10. podaci potrebni za analizu prirodnih frekvencija

MAESDAP-om se generiraju prva tri dijela podatkovne datoteke. Ti dijelovi uključuju dovoljan broj podataka za pretvorbu iz opće mreže elemenata iz XML datoteke u MAESTRO mrežu konačnih elemenata. Ostali dijelovi modela generiraju se ili preko MAESTRO modelera (dijelovi 4, 5 i 6) ili direktno u podatkovnoj datoteci (dijelovi od 7 do 10).

## 6. Zaključak

U cilju efikasnijeg povezivanja CAD strukture u TRIDENT-u s MAESTRO-m, alatom za FEM analizu, razvijen je sustav TRIDENT FEM Modeler. Sustav je podijeljen u tri osnovna modula: TRIDENT Filter koji iz CAD modela izlučuje pojednostavljenu geometriju strukturnih elemenata pogodnu za numeričku obradu, MEZZO kojim se generira mreža makroelemenata i MAESDAP kojim se opća mreža makroelemenata prilagođava MAESTRO modelu konačnih elemenata.

Osnovni princip generiranja mreže makroelemenata na logičkoj strukturi neke tankostijene konstrukcije (npr. broda, zrakoplova) može se sažeto opisati kao rastav strukture na više logički sličnih dijelova (GrossElementi) koji se onda zasebno premrežuju poštivajući uvjet konzistentnosti na linijama spoja (GrossSide) pojedinih dijelova (GrossElementa).

U postojećoj verziji sustava uspješno je implementiran opis strukture XML shemom (TRIDENT Filter) u kojoj su sadržani svi relevantni podaci za generiranje FEM mreže i prilagodba opće mreže makroelemenata MAESTRO modelu (MEASDAP modul).

U MEZZO modulu uočene su greške prilikom generiranja mreže oko otvora (primjer sa slika 5 i 6) i problemi konzistentnosti mreže (djelomično nepoklapanje točaka i elemenata) na spoju poprečnih i uzdužnih dijelova strukture. Uočeni problemi u postojećem algoritmu pokušati će se ukloniti razvojem novog algoritma koji će generirati mrežu pomoću metode multikriterijskog odlučivanja.

Prilagodba opće mreže makroelemenata MAESTRO modelu (MEASDAP modul) u trenutnoj verziji omogućava generiranje samo jednog modula unutar jedne podstrukture. U daljnjem razvoju omogućit će se generiranje niza modula unutar više podstrukture.

### *Zahvala*

Autori se zahvaljuju Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta i USCS-u za sufinanciranje projekta „Integrirani programski sustav za brodske konstrukcije“ u sklopu kojeg je razvijan sustav TRIDENT FEM Modeler, zatim voditelju projekta prof.dr.sc.Vedranu Žaniću na osnovnim postavkama CAD FEM generatora te mr.sc. Svemiru Braliću za uloženi trud na razvoju osnovne verzije MEZZO modula.

## **LITERATURA**

- [1] TRIDENT Sustav, korisnička dokumentacija, USCS, Pula, 2005.
- [2] MAESTRO Program Version 8, User Manual, Proteus Engineering, USA, 2005.
- [3] „Integrirani programski sustav za brodske konstrukcije“, STIRP Projekt TP-03/0120-23, završno izvješće, Zagreb, 2006.
- [4] Structure of MEZZO file, V. Žanić, S. Bralić, ver. 1.6, Zagreb, 2005.
- [5] TRIDENT FEM Modeler, teoretski priručnik, S. Bralić, ver. 1.0, Zagreb, 2006.