# تحليل رفتار ديناميكي كشتي صدمه ديده در موج

حميد زراعتگر[i]؛ ريحانه مهري[ii] *؛ حميدرضا جعفريگانه[iii]

## چكيده

آسيب ديدگي كشتي ها ممكن است باعث آبگرفتگي بخش هايي از كشتي و يا حتي ازدست رفتن تعادل آن شود آسيب‌ديدگي كشتي‌ها اجتناب‌ناپذيراست. از زماني كه كشتي دچار صدمه مي‌شود تا هنگامي كه بخش‌هاي صدمه‌ديده به طور كامل از آب پر شوند، رفتار كشتي تغيير مي نمايد. از طرف ديگر به طور معمول در شرايط محيطي سخت (وجود امواج دريا) آسيب‌ديدگي رخ مي‌دهد، بنابراين لازم است تحليل رفتار شناور در وضعيت صدمه‌ديده در موج انجام شود. در اين تحقيق سعي شده است رفتار شناور صدمه‌ديده در موج با تاكيد بر سه حركت رول، پيچ و هيو تجزيه و تحليل شود. بدين منظور طرح رياضي براي سه حركت مزبور همراه با مقدار آبگرفتگي مخزن صدمه‌ديده نوشته شده است كه چهار معادله ديفرانسيلي وابسته، بطور همزمان در بازه زمان حل مي‌شود. براين اساس يک روش مناسب تهيه شده و كد رايانه اي آن نوشته شده است كد تهيه شده ابتدا معتبرسازي شده و سپس براي يک نمونه شناور فريگيت اجرا گرديده و نتايج آن مورد بررسي قرار گرفته است.

**كلمات كليدي :** آسيب ديدگي، كشتي، آبگرفتگي، رول، پيچ، هيو

# *Analysis of Damaged Ship Behavior in Sea Waves*

Hamid Zeraatgar, Reyhaneh Mehri and Hamidreza Jafaryeganeh

***ABSTRACT***

Damage of a ship may cause flooding of some compartment. In extreme case it may result in the total loss of the vessel. As far as the probability of damage of a ship in seaway is concerned, there is no confidence for not happening damage of a ship. In a case of damaged ship, motion in wave is coupled with mass of flooded water where the rate of flooding itself is also coupled with the damaged ship motions. Normally damage is happening in harsh sea conditions where sea waves are the main feature of such environment. On that basis, it is needed to analyze damaged ship motions in waves. In this article, an attempt has been made to analyze a damaged ship motions in sea wave focusing on three motions, heave, pitch and roll. A mathematical model is developed in which the equation of ship motions and mass of flooding are solved simultaneously in time domain. A computer code is developed and validated by comparing with some published results. A damaged naval ship behaviors in sea waves are calculated and results are discussed.

***KEYWORD :*** Damage, ship, flooding, roll, pitch and heave

---

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۹/۳/۱۵

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۳/۸

[i] استاديار، دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده مهندسي دريا و صنايع دريايي hamidz@aut.ac.ir

[ii] * نويسنده مسئول و كارشناس ارشد دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده مهندسي دريا و صنايع دريايي Reyhaneh.mehri@aut.ac.ir

[iii] كارشناس ارشد دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده مهندسي دريا و صنايع دريايي Hrjy2003 @yahoo.com

## ۱- مقدمه

همه کشتي‌ها در معرض خطر غرق‌شدگي در اثر از دست دادن اجزاي غير قابل نفوذ به آب، صدمه ديدن از راه عواملي مثل تصادف، به گل نشستن و يا انفجار هستند. چنانچه در عمل ديده مي‌شود، حوادث آنقدر متناوب اتفاق مي افتند که محافظت از شناور در مقابل چنين حوادثي (حتي در مرحله طراحي) يکي از موضوعات ضروري است.

تحليل رفتار ديناميکي کشتي صدمه ديده براي بررسي پايداري و امکان بقا کشتي اهميت زيادي دارد. براي افزايش قابليت نجات‌پذيري شناور، بايد فهم درستي از چگونگي رفتار شناور در حالت صدمه ديده داشته باشيم و با توجه به اينکه بندرت پديده صدمه‌ديدگي در آب راکد اتفاق مي‌افتد، محاسبه حرکات کشتي صدمه‌ديده در موج ضروري است.

پيرامون رفتار کشتي صدمه‌ديده و آبگرفتگي کشتي تاکنون مطالعاتي در دنيا انجام شده است که به تعدادي از آنها به طور مختصر اشاره مي‌شود.

مايکليس و ژورنيه در سال ۲۰۰۰ در مقاله اي با عنوان "شبيه‌سازي عددي و آزمايشگاهي رفتار اسلاشينگ در مخازن بار مايع و اثر آن در حرکات شناور" روش حل گذرا و دوبعدي محدود[۱] را براي پيش‌بيني حرکات سيال و فشارهاي القايي در مخازن نيمه پر شناور به کار بردند[۱]. ممان القا شده توسط سيال با معادله اي که حرکت رولينگ شناور را توضيح مي‌دهد کوپل شده و نيروي تحريک براي برنامه رايانه‌اي اسلاشينگ را ايجاد مي‌نمايد. علاوه بر آن آزمايش‌هايي روي مخازن طراحي شده انجام گرفته و فشارها و ممان هاي اندازه‌گيري شده با پيش‌بيني‌هاي عددي مقايسه شده‌اند. سپس آزمايش‌هايي روي طرح شناور که داراي مخازن نيمه پر بودند انجام شد و اطلاعات مورد نياز براي مقايسه با نتايج گرفته شده از برنامه رايانه‌اي مربوط به نيروهاي کوپل شده از حرکات شناور و اسلاشينگ به‌دست آمدند.

در سال ۱۹۹۱ ژورنيه و وردولت در مقاله اي با عنوان "حرکات رولينگ شناور به دليل نفوذ ناگهاني آب همراه با محاسبات و آزمايش‌ها" نشان دادند که حرکت ديناميکي شناور به دليل نفوذ ناگهاني آب قابل چشم پوشي نيست، از اين رو طرحي محاسباتي ايجاد نمودند که درستي آن توسط تست‌هاي نفوذ[۲] اثبات شد و در همين مقاله به چاپ رسيد [۴].

در سال ۱۹۹۴ ژورنيه و همکاران در مقاله اي با عنوان "مدل‌سازي رياضي حرکات شناورهاي رورو و پايداري آسيب ديده در زمان‌هاي مياني آب‌گرفتگي"، براي تحليل مسائل ايمني مربوط به شناورهاي رورو يک طرح رياضي ايجاد نمودند تا رفتار واقعي يک شناور و پايداري باقيمانده[۳] مربوط به آن را در بازه زمان پس از برخورد شرح دهد. اين ابزار پيش‌بيني تا حد مناسبي توسط آزمايش‌هاي مدل يک پانتون و نوعي شناور فري با اريفيس‌هاي مختلف آسيب‌ديدگي و در اشکال مختلف محفظه‌هاي کشتي معتبرسازي شد [۵].

در سال ۱۹۹۷ ژورنيه در مقاله‌اي با عنوان "بار مايع و اثر آن بر حرکات شناور" از تئوري‌اي بر اساس ديناميک گازها و موج شوک[۴] در جريان گازها، براي تشريح حرکات سيال استفاده نمود. در اين روش در اعماق بيشتر که رفتار سيال درون مخزن خطي مي‌شود از تئوري پتانسيل استفاده مي‌شود، همانطور که در برنامه‌هاي رايانه‌اي حرکات شناور از تئوري نواري استفاده شده است تا حرکات سيال داخل مخزن را توضيح دهد. در اين مقاله در اعماق کم از نتايج آزمايشگاهي موجود در مورد رفتار سيال در سطح آزاد مخازن ضد رولينگ[۵] استفاده شد تا يافته هاي تئوري را براي اعماق کم آب اثبات کند. علاوه بر آن تست‌هاي رول اجباري براي يک طرح دوبعدي از مخزن بار يک شناور حمل گاز مايع شده در سطوح پرشدگي متفاوت انجام شد و از اين داده‌هاي آزمايشي براي اثبات نتايج تئوري تمام اعماق آب استفاده شد. نتايج اين مقاله که بر اساس تئوري هاي دهه ۶۰ هستند مي توانند براي دربرگرفتن اثرات حرکت بار مايع غيرويسکوز در محاسبات حرکات شناور نيز به کار روند [۶].

در سال ۱۹۹۷ ژورنيه و همکاران در مقاله اي با عنوان " آزمايش هاي طرح روي آب‌گرفتگي دو شناور رورو"، روي رفتار حرکتي شناور و خصوصيات پايداري مربوط به آن در مراحل مياني آب‌گرفتگي پس از صدمه‌ديدگي در آب آرام تمرکز نمودند [۷]. يک طرح رياضي که حرکات شناور را به دليل آب گرفتگي در بازه زماني شرح مي داد به وجود آمد. براي معتبرسازي آزمايش هايي روي طرح انجام شد. پس از معتبرسازي طرح، تست هاي روشمندتري انجام شد. براي دو شناور اثر ارتفاع متاسنتريک اوليه، سطح نفوذ آب، زاويه هيل اوليه، وجود بالکهدهاي طولي و کانال هاي عرضي و کاهش نفوذپذيري روي واژگوني مورد آزمايش قرارگرفت.

در سال ۲۰۰۰ ژورنيه در مقاله‌اي با عنوان "مخازن سيال و حرکات شناور "، حرکات سيال غيرلزج در مخازن شناور و اثر آن بر روي حرکات کشتي در امواج را مورد بررسي قرار داد [۸]. در اين مقاله يک مدل شناور با مخازن بار مايع در ميان امواج عرضي در وضعيت ساکن مورد آزمايش قرارگرفت. اطلاعات رولينگ اندازه گيري شده با نتايج تئوري نواري

محاسبه شده در بازه فرکانس مقايسه شدند. علاوه بر آن رفتار شناور و خصوصيات پايداري مربوط به آن در بازه زمان پس از صدمه‌ديدگي و در مراحل مياني آب‌گرفتگي مورد بررسي قرارگرفت. يک مدل رياضي نيز که حرکات شناور را در اثر آب گرفتگي در بازه زمان شرح مي‌داد ايجاد شد.

در سال ۲۰۰۰پالاتزي و دي‌کات در مقاله‌اي با عنوان " آزمايش‌هاي مدل و شبيه‌سازي يک شناور آسيب‌ديده با احتساب جريان هوا[6]، به مطالعه‌ي رفتار شناور فريگيت آسيب ديده پرداختند و آزمايش‌هايي در آب آرام و در امواج با ارتفاع و دوره‌هاي تناوب متفاوت انجام دادند [۹]. در اين مقاله مقايسه اي بين آزمايش‌ها و شبيه‌سازي‌ها در شرايطي که اثر جريان هوا را بيشتر مشخص مي نمايد انجام شد. هم چنين به آب گرفتگي گذرا و رولينگ گذرا[7] و اثرگذاري آرايش آب‌گرفتگي عرضي توجه خاصي شد. جريان هواي قابل توجهي در آزمايش‌ها ديده شد و در اين مقاله روي اهميت اين پديده در مدل‌سازي رفتار شناور تمرکز شده‌است.

سانتوس و گودس در سال ۲۰۰۱ در مقاله‌اي با عنوان "محاسبات پايداري در وضعيت آسيب‌ديده شناور رورو با استفاده از روش انتگرال فشار"، فرمول‌هايي را براي محاسبه تغيير با زمان پايداري آسيب‌ديده شناورها در آب آزاد معرفي نمودند [۱۰]. يک روش انتگرال‌گيري فشار که براي محاسبه خواص هيدرواستاتيکي سازه‌هاي دريايي مورد استفاده بوده است در اينجا براي محاسبه سرعت جريان از بازشوهاي آسيب ديده در زمان شبيه‌سازي آب‌گرفتگي به کار گرفته شد. پس از معتبرسازي اين روش، ثابت شد که مي توان از آن براي شبيه سازي آب‌گرفتگي شناور در بازه زمان و محاسبه خواص هيدرواستاتيکي در وضعيت آسيب‌ديده و نرخ جريان[8] از ميان بازشوهاي آسيب‌ديده روي بدنه شناور استفاده نمود.

در اين راستا در سال ۱۳۸۳ حاجي عرب [۲] حرکات رول کشتي صدمه ديده را براي يک بارج صدمه ديده با زاويه برخورد موج ۹۰ درجه تحليل نمود و به نتايج قابل‌قبولي دست يافت.

هدف از انجام اين پژوهش، محاسبه حرکات پيچ، هيو و رول در کشتي صدمه‌ديده در زواياي برخورد متفاوت موج است. طرحي از تئوري نواري که در بازه زمان حل مي شود براي تحليل حرکت شناور در موج ارائه خواهد شد. براي اين منظور، دبي آب ورودي به مخزن صدمه ديده، حجم آب محبوس در مخزن و نيروهاي وارده از طرف آن بر روي شناور و اثرات آن بر حرکات شناور علاوه بر نيروهاي وارده از طرف امواج دريا بررسي مي شود. مدل رياضي حاکم بر حرکات استخراج شده و برنامه رايانه اي تدوين شده است. اين برنامه براي يک نمونه شناور اجراء شده و نتايج آن معتبرسازي شده است.

## ۲- حرکات کشتي سالم در امواج منظم

### ۲-۱- موج منظم

به طور معمول امواج دريا نامنظم هستند و طبيعتي تصادفي دارند، بررسي و تحليل رفتار اين امواج با توجه به ماهيت پيچيده آنها امري بسيار دشوار است. بنابراين براي ساده سازي مسئله و عملي ساختن امكان بررسي، امواج را مجموعه اي از امواج منظم در نظر مي‌گيرند و بدين ترتيب مي توان با تحليل رفتار امواج منظم تشكيل دهنده يك موج نامنظم، به بررسي آن موج پرداخت.

اگر موج در راستاي مثبت x حرکت نمايد، شکل موج (شکل سطح آب) را مي‌توان بر حسب تابعي از دو متغير x و t بيان نمود:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega_e t) \tag{۱}$$

$$\omega_e = \omega - kV\cos\mu \tag{۲}$$

که:

$\omega$ : فرکانس موج

$\omega_e$ : فرکانس برخورد

K: عدد موج

V: سرعت کشتي

$\mu$ : زاويه برخورد موج به کشتي

### ۲-۲- معادلات حرکت شناور سالم

با توجه به قانون دوم نيوتن، معادله حرکت کشتي در دريا را مي‌توان بصورت زير نوشت :

$$\sum_{k=1}^{6} \Delta_{jk}\, \ddot{\eta}_k(t) = F_j(t) \tag{۳}$$

که در آن ۶و...و۲و۱= j است.

(۳) يك دستگاه معادله ديفرانسيل خطي وابسته با شش معادله ديفرانسيل است که در آن:

j,k : حالت حرکتي کشتي

$\Delta_{jk}$ : ماتريس جرمي کشتي که شامل ممان‌هاي اينرسي و عامل جرم کشتي است.

$\ddot{\eta}_k(t)$ : شتاب کشتي در حالت حرکتي k ام

$F_j(t)$ : نيروي وارد به کشتي در حالت حرکتي j ام.

با توجه به مسئله تعادل پس از صدمه ديدگي، در اين تحقيق

به سه حركت هيو و پيچ و رول مي‌پردازيم درحاليكه هيو و پيچ بهم وابسته‌اند.

### ۲-۲-۱- معادله حركت رول شناور سالم

معادله حركت رول كشتي صدمه‌ديده با در نظر گرفتن ممان اعمال شده در حالت صدمه‌ديدگي عبارت است از:

$$(I_{44}+A_{44})\ddot{\eta}_4+B_{44}\dot{\eta}_4+C_{44}\eta_4=F_{EX\,4} \tag{۴}$$

كه:

$A_{44}$: ممان جرمي افزوده در حركت رول

$I_{44}$: ممان اينرسي جرمي در حركت رول

$B_{44}$ : ضريب ميرايي حركت رول

$C_{44}$: ضريب ممان برگرداننده حركت رول

$F_{EX\,4}$: نيروي تحريك ناشي از موج برخوردي به شناور (فرود-كريلوف و پراكندگي)

### ۲-۲-۲- معادله حركت هيو و پيچ شناور سالم

با فرض اينكه موج به صورت موج ساده سينوسي باشد و از اثرات ساير حركات كشتي روي كوپل هيو و پيچ صرف نظر كنيم، دستگاه معادلات حركات هيو و پيچ را ميتوان بصورت رابطه (۵) نوشت [۱]:

(۵)

$$(M+A_{33})\ddot{\eta}_3+B_{33}\dot{\eta}_3+C_{33}\eta_3+A_{35}\ddot{\eta}_5+B_{35}\dot{\eta}_5+C_{35}\eta_5=F_{Ex3}$$

$$(A_{55}+I)\ddot{\eta}_5+B_{55}\dot{\eta}_5+C_{55}\eta_5+A_{53}\ddot{\eta}_3+B_{53}\dot{\eta}_3+C_{53}\eta_3=F_{Ex5}$$

كه در آن

$M$ : ماتريس جرم و ممان كشتي

$A$: ماتريس ضرايب جرم افزوده

$B$: ماتريس ضرايب دمپينگ

$C$: ماتريس ضرايب فنريت

$F$: ماتريس مجموع نيروها و ممان‌هاي وارده ناشي از موج درحالت سالم هستند.

## ۳- مدل‌سازي حركات كشتي صدمه ديده

براي مدل سازي حركت كشتي صدمه ديده لازم است نيروهاي ناشي از آب وارده به مخزن صدمه‌ديده به معادلات حركت اضافه گردد. سپس معادلات حركت كشتي صدمه‌ديده استخراج و حل گردد. اصول و فرضيات اصلي بشرح زير مي‌باشد:

- شناور صدمه‌ديده، حركاتي مشابه شناور سالم دارد كه تابع همان اصول است.
- شناور بصورت متقارن دچار صدمه‌ديدگي مي‌شود.
- سيال بصورت ايده‌آل و غير چرخشي فرض مي‌شود.
- از تئوري نواري براي محاسبات نيروهاي وارده بر شناور صدمه‌ديده در موج استفاده مي‌شود.

نيروهاي وارده بر شناور صدمه‌ديده شامل نيروي فرود-كريلوف، نيروي تشعشعي و نيروي پراكندگي هستند كه علاوه بر آن نيروي ناشي از وزن سيال وارده به داخل شناور نيز اضافه مي‌شود.

### ۳-۱- معادلات حركات شناور صدمه‌ديده

مدل سازي حركت شناور صدمه‌ديده در موج، مانند مدل سازي حركت شناور سالم در موج است كه تنها تفاوت آن به آب‌گرفتگي مخزن صدمه‌ديده مرتبط است. آب‌گرفتگي مخزن صدمه‌ديده تابعي از سه حركت هيو، پيچ و رول است. در عين حال ميزان آب‌گرفتگي مخزن صدمه‌ديده بر حركات هيو، پيچ و رول تاثير مي‌گذارد. بنابراين وابستگي بين آنها وجود دارد. بطور كلي چهار معادله ديفرانسيلي وابسته و چهار مجهول وجود دارد كه مجهولات عبارتند از دامنه هيو، پيچ، رول و حجم آب‌گرفتگي مخزن صدمه‌ديده. اين چهار معادله ديفرانسيلي بشرح زير است:

$$(M+A_{33})\ddot{\eta}_3+B_{33}\dot{\eta}_3+C_{33}\eta_3+A_{35}\ddot{\eta}_5+B_{35}\dot{\eta}_5+C_{35}\eta_5=F_{EX\,3}+F_{Dam\,3}(t) \tag{۶}$$

$$(A_{55}+I)\ddot{\eta}_5+B_{55}\dot{\eta}_5+C_{55}\eta_5+A_{53}\ddot{\eta}_3+B_{53}\dot{\eta}_3+C_{53}\eta_3=F_{EX\,5}+F_{Damaged\,5}(t) \tag{۷}$$

$$(I_{44}+A_{44})\ddot{\eta}_4+B_{44}\dot{\eta}_4+C_{44}\eta_4=F_{Ex\,4}+F_{Dam\,4}(t) \tag{۸}$$

$$V(t)=\int_0^t Q(t)\,dt \tag{۹}$$

كه:

$F_{EX\,3}$: نيروي فرود-كريلوف و پراكندگي وارده بر شناور در جهت هيو ناشي از امواج دريا

$F_{EX\,4}$: نيروي فرود-كريلوف و پراكندگي وارده بر شناور در جهت رول ناشي از امواج دريا

$F_{EX\,5}$: نيروي فرود-كريلوف و پراكندگي وارده بر شناور در جهت پيچ ناشي از امواج دريا

نيروهاي گفته شده توسط روابط زير محاسبه مي‌شوند:

$$F_{EX\,3}=\overline{\zeta}\int_L\left\{e^{ikx}e^{-kT^*(x)}\left[c_{33}(x)-\omega_0\left[\omega_e a_{33}(x)-ib_{33}(x)\right]\right]\right\}dx \tag{۱۰}$$

$$F_{Ex\,4}=\zeta_a.\sin\mu\left[\left(\rho\nabla\overline{GM}-A_{42}\right)\omega^2\sin\omega t+\omega B_{42}\cos\omega t\right] \tag{۱۱}$$

$$F_{EX5} = -\bar{\zeta}\int \{e^{ikx}e^{-kT^*(x)}x\left[c_{33}(x) - \omega_0\left[\omega_e a_{33}(x) - ib_{33}(x)\right]\right]$$
$$-\frac{V}{i\omega_e}\omega_0\left[\omega_e a_{33}(x) - ib_{33}(x)\right]\}dx$$
(۱۲)

$F_{Dam3}(t)$: نيروي وارده از طرف مخزن آب گرفته در جهت هيو

$F_{Dam4}(t)$:نيروي وارده ازطرف مخزن آب‌گرفته درجهت رول

$F_{Dam5}(t)$: نيروي وارده از طرف مخزن آب گرفته در جهت پيچ که از روابط زير قابل محاسبه‌اند:

$$F_{Dam3}(t) = \rho.g.V(t) \quad (۱۳)$$

$$F_{Dam4}(t) = y_G.\rho.g.V(t).\cos\eta_5.\cos\eta_4 - z_G.\rho.g.V(t).\cos\eta_5.\sin\eta_4$$
(۱۴)

## ۴- مدلسازي دبي آب وارده به مخزن

با فرض سيال ايده‌آل، طرح در نظر گرفته شده براي ورود آب به داخل شناور بر اساس معادله برنولي است. به اين ترتيب با اين فرض که صدمه ايجاد شده به شکل يک سوراخ باشد با اعمال اين معادله در دو طرف سوراخ با توجه به شکل(۱) خواهيم داشت [۱۱]:

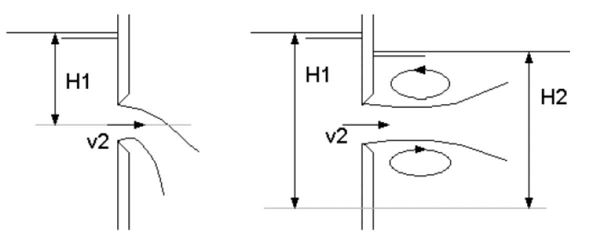
$$\frac{1}{2g}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho g} + H_1 = \frac{1}{2g}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho g} + H_2 \quad (۱۶)$$

طرف اول رابطه (۱۶) ارتفاع، فشار و سرعت براي نقطه ۱ و طرف دوم براي نقطه ۲ است که نقطه ۱ در سطح آب و نقطه ۲ در ارتفاع سوراخ در نظر گرفته مي‌شود (شکل ۱).

براي محاسبه سرعت جريان آب ورودي به مخزن با توجه به ارتفاع آب در دو طرف آن مي توان سرعت آب ورودي به مخزن را به صورت رابطه زير محاسبه نمود :

$$v_2 = \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad (۱۷)$$

همانطور که در شکل (۱) ديده مي شود نماي (الف) مربوط به يک سوراخ است که در آن آب به راحتي و بدون مقاومت از سمت داخل مخزن وارد آن مي شود و نماي (ب) مربوط به زماني است که سوراخ از هر دو طرف غرق مي‌شود.



(الف) (ب)

شکل (۱): تخمين سرعت آب وارده با اريفيس [۱۱]

بدين ترتيب براي دبي آب ورودي به مخزن با توجه به سرعت محاسبه شده براي آن خواهيم داشت:

$$Q = C_d v_2 A \quad (۱۸)$$

که

A: مساحت سوراخ

$C_d$: ضريب تخليه

ضريب تخليه، شامل اثرات مختلفي است که در جريان عبورسيال از سوراخ بوجود مي‌آيد وفاصله بصورت تجربي محاسبه مي شود و مقدار آن براي يک سوراخ دايره اي شکل و جريان يکنواخت گذرنده از آن حدود ۰/۶ تا ۰/۶۵ است [۱۱].

در پايان با محاسبه مقدار آب وارد شده و با توجه به مقدار حرکات قبلي شناور در مرحله بعدي مي‌توان جرم آب وارد شده، مرکز جرم آب وارد شده و در نتيجه ممان و نيروهاي ناشي از آن را محاسبه نمود. در ضمن مقدار آب بازگشتي از داخل مخزن به بيرون در اين مرحله نيز در نظر گرفته مي‌شود.

## ۵- مدلسازي نيروي وارده بر شناور از طرف آب وارده به مخزن

با محاسبه مقادير آب وارد شده و زاويه ايجاد شده در حرکات رول، پيچ و همچنين مقدار حرکتي که در هيو ايجاد مي شود در هر مرحله مي توان نيروي وارده از طرف سيال به شناور را محاسبه نمود.

در شکل هاي (۲) و (۳) دو نمونه از حالت هايي که ممکن است در مخازن آب گرفته ايجاد شود نمايش داده شده است. اين کار بر اساس تقسيم‌بندي حالت‌هاي مختلف در حرکات سه گانه مورد نظر بدست مي‌آيد. در اين شکل ها عامل هاي نشان داده شده داراي تعاريف زير هستند:

G: مرکزجرم کشتي

$G_w$: مرکزجرم آب وارد شده به کشتي

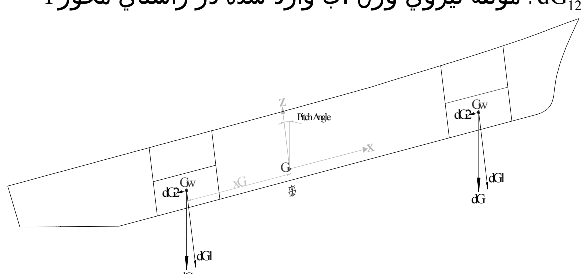
dG: نيروي وارده به کشتي ناشي از آب وارد شده به انبار کشتي

$dG_1$: مولفه نيروي وزن آب وارد شده در صفحه YZ

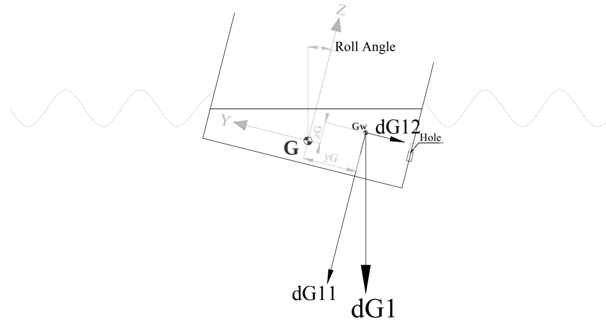
$dG_2$: مولفه نيروي وزن آب وارد شده در راستاي محور X

$dG_{11}$: مولفه نيروي وزن آب وارد شده در راستاي محور Z

$dG_{12}$: مولفه نيروي وزن آب وارد شده در راستاي محورY




شکل (۲): نيروهاي وارده از طرف آب در زاويه پيچ




شکل (۳): نيروهاي وارده از طرف آب در نماي عرضي

## ٦- حل معادلات کشتي صدمه ديده

معادلات حرکت شناور صدمه‌ديده، يک دستگاه معادلات چهار معادله، چهار مجهول مرتبه دو خطي است (معادلات ۶ تا ۹ ). معادلات اول، دوم و چهارم به هم وابسته‌اند. معادله سوم هم به معادله چهارم وابسته است. ضرايب پشت متغيرهاي ديفرانسيلي نيز ثابت هستند.

معادلات ديفرانسيل (۶)، (۷) و (۸) داراي يک بخش دوره‌اي هستند که روشي کلاسيک براي محاسبه آنها وجود دارد. براي جمله تابع زماني ناشي از آب گرفتگي، معادلات در لحظات کوچک، بعنوان جواب اختصاصي حل مي‌شوند.

براي محاسبه سه حرکت هيو، پيچ و رول و هم‌چنين مقدار آب ذخيره شده در مخازن، دستگاه معادلات چهار معادله، چهار مجهول بطور هم‌زمان حل مي‌شود. حل معادلات از نظر زماني تا جايي ادامه مي يابد که حرکات و آب وارده به داخل مخزن صدمه ديده شبه دوره اي شود و در يک دوره زماني تکرار شوند.

بر اساس مدل سازي بالا برنامه اي تهيه شده که امکان محاسبه را براي هر نوع شناوري فراهم مي‌سازد.

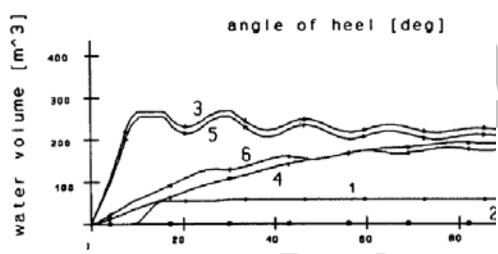
## ۷- معتبرسازي

در بررسي اعتبار يک روش محاسباتي با روش‌هاي ديگر، لازم است ابتدا شکل عمومي رفتارها يکسان باشد سپس بايد مقادير نيز اختلاف زيادي با يکديگر نداشته باشند. براي مقايسه دو روش محاسباتي لازم است ورودي يکساني را به برنامه داد. بدليل دسترسي نداشتن به اطلاعات ورودي ديگر محققين، شکل عمومي مقادير مورد محاسبه با آنها مقايسه شد و فقط براي يکي از روش هاي محاسباتي با مقادير نيز مقايسه شده است.

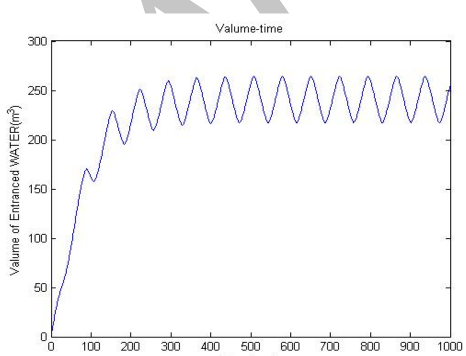
در اين راستا از کارهاي انجام شده توسط ژورنيه و همکاران [۵] و هم چنين جان دي کات و ليونل پالازي [۹] استفاده مي‌نماييم و در انتها نتايج را براي يک شناور مکعب مستطيل بدست مي‌آوريم و با کار انجام شده توسط حاجي عرب [۲] مقايسه خواهيم نمود.

### ۷-۱- مقايسه حجم آب وارد شده

ژورنيه و همکاران [۵] به بررسي اثر آب‌گرفتگي در لحظات مياني در واژگوني کشتي پرداخته و در مدل سازي آن از سوراخ شبيه سازي شده با اريفيس استفاده نموده و اثرات حرکت رول در آب آرام با تغيير ارتفاعات طبقاتي کشتي مورد بررسي قرار گرفته است. شکل (۴) حجم آب وارد شده به مخزن را نسبت به زمان نشان مي دهد. اين شکل نتيجه شبيه سازي انجام شده در مقاله مذکور براي يک کشتي رورو است. شکل (۵) نتيجه پر شدن يک مخزن را در کشتي فريگيت که توسط اين تحقيق محاسبه شده نشان مي دهد. همان‌طور که در شکل (۵) ديده مي شود روند پر شدن آب در مخزن به اين ترتيب است که در يک بازه زماني حجم آب وارد شده به مخزن زياد مي‌شود که اين امر با نوسان همراه است. اين بازه زماني همان محدوده گذرايي است که تا پر شدن کامل مخزن به طول مي انجامد و سپس در يک حجم مشخص که حجم انبار مورد بررسي است نوسان نموده و اين نوسانات رو به ميرايي مي‌رود.



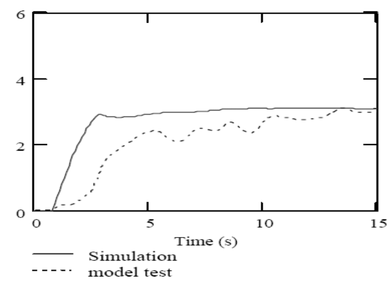

شکل (۴): رفتار کلي ورود آب به شناور صدمه‌ديده [۵]




شکل (۵): نتيجه شبيه‌سازي يک شناور فريگيت

چنانچه در شکل (۵) نيز ديده مي‌شود تا محدوده خاصي افزايش آب وارد شده به مخزن را خواهيم داشت و از آن به بعد در حجم معيني نوسان نموده که نشان‌دهنده اين است که آب بصورت مداوم به مخزن وارد شده و سپس از آن خارج مي‌شود.

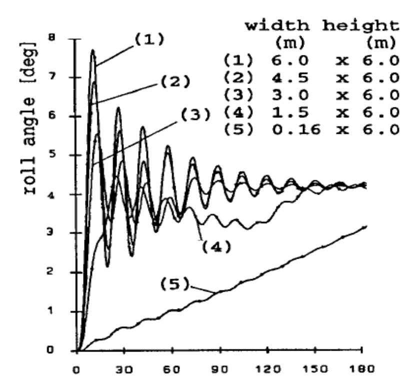
پالازي و ديکات ارتفاع آب وارد شده به مخزن را در لحظات زماني مختلف ارائه نموده‌اند که در شکل (۶) ديده مي‌شود [۹] . مقايسه شکل (۶) و (۵) نشان مي‌دهد که رفتار عمومي پر شدن مخازن دو روش شبيه يکديگر هستند.



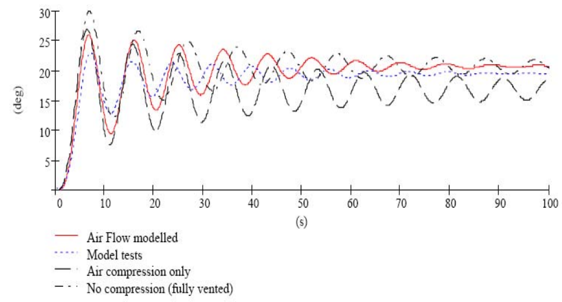

شکل (۶): رفتار کلي ورود آب به شناور صدمه‌ديده [۹]

## ۷-۲- مقايسه حرکت رول

ژورنيه و همکاران [۵] حرکت رول در آب آرام در اندازه‌هاي مختلف صدمه‌ديدگي را نيز براي يک شناور رورو محاسبه نموده‌اند که در شکل (۷) ديده مي‌شود. روند کلي به اين صورت است که در ابتدا با وارد شدن آب به مخزن، حرکت رول نيز افزايش مي‌يابد و پس از گذشتن از دوره گذرا و پر شدن مخزن، حرکت در يک زاويه هيل معين ميرا مي‌شود البته اينها در صورتي است که کشتي آسيب‌ديده واژگون نشود.



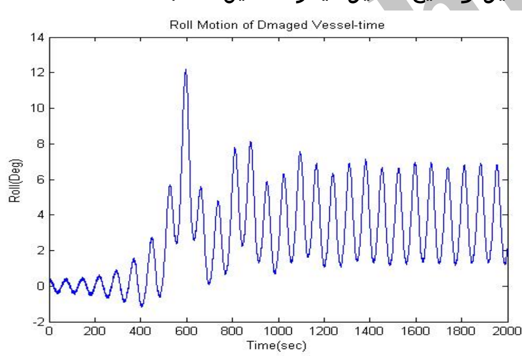

شکل (۷): رفتار کلي زاويه رول براي شناور رورو در ابعاد متفاوت سوراخ [۵]




شکل (۸): رفتار کلي زاويه رول براي شناور فريگيت [۹]

در کار انجام شده به وسيله پالازي و ديکات [۹] نيز حرکت رول يک شناور فريگيت بررسي شده است که در شکل (۸) نمونه نتيجه آن را مي‌توان ديد. همان‌طور که در شکل نيزديده مي‌شود؛ در اينجا نيز با يک روند افزايشي ناگهاني در حرکت رول روبرو هستيم و سپس ميرايي آن را در آب آرام شاهد خواهيم بود. صرف نظر از اندازه هر يک از حالت‌هايي که در شکل نشان داده شده و مربوط به جواب‌هاي مختلف آن برنامه است، درپايان همگي روال مشخص گفته شده را طي مي‌نمايند.

شکل (۹) نتيجه اجراي برنامه براي فريگيت در حرکت رول در فرکانس پايين است. در شکل (۹) در يک محدوده زماني، با افزايش زاويه رول روبرو هستيم و پس از آن نوسانات اطراف زاويه‌اي ديگر رخ مي‌دهند. از مقايسه شکل (۹) با شکل‌هاي (۷) و (۸) مي‌توان گفت که شکل عمومي حرکت رول به دست آمده از اين تحقيق و نتايج تحقيق ديگر محققين مشابه است.



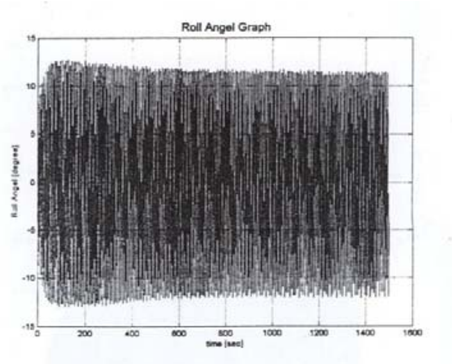

شکل (۹): رفتار کلي زاويه رول براي شناور فريگيت در فرکانس پايين

## ۷-۳- مقايسه نتايج براى يک شناور بارج

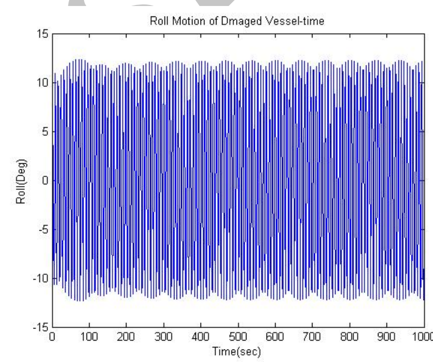
حاجي عرب [۲] حرکت رول يک شناور بارج شکل را محاسبه نمود. براي بارج گفته شده محاسبات به‌وسيله نرم‌افزار تکرار شده تا نتايج مقايسه شوند. مشخصات بارج عبارت است از:

| | |
|---|---|
| طول | ۵۴/۸ متر |
| عرض | ۱۵/۰۰ متر |
| ارتفاع | ۵/۰۰ متر |
| آبخور | ۳/۰۰ متر |

نتايج اين دو براي شناوري يکسان در اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.




شکل (۱۰): حرکت رول بارج در حالت صدمه‌ديده [۲]




شکل (۱۱): حرکت رول براي بارج محاسبه شده در اين تحقيق

چنانچه ديده مي شود نتايج بدست آمده در شکل (۱۱) با شکل (۱۰) هم از نظر مقدار و هم از نظر روند کلي حرکت، هم خواني خوبي دارند. در ابتدا، حرکت رول بصورت تدريجي افزايش مي يابد و پس از آن با يک حرکت نوساني در دامنه مشخص ادامه مي‌يابد.

بر اساس معتبرسازي انجام شده، مي توان به نتايج محاسبات روش مورد استفاده در اين تحقيق اعتماد نمود.

## ۸- نمونه نتايج برنامه

### ۸-۱- نمونه محاسبات با جزئيات در زاويه برخورد ۴۵ درجه

براي شناور نظامي فريگيت با مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، که صدمه ديدگي بشرح جدول (۲) و در شرايط محيطي بشرح جدول (۱) است، نرم‌افزار مجموعه اي از رفتار شناور صدمه‌ديده بر حسب زمان بشرح شکل‌هاي (۱۲) تا (۱۹) محاسبه نموده است.

شکل (۱۲) رول شناور را نشان مي دهد. بر حسب انتظار از مقدار حداقلي شروع شده و به يک مقدار زياد و گذرا مي رسد. سپس بصورت نوساني به يک مقدار تکرارشونده با دامنه ۳/۸ درجه مي‌رسد.

شکل (۱۳) حرکت هيو را نشان مي دهد. افزايش آبخور شناور به مقدار تقريبي ۵ سانتي‌متر به وضوح قابل ديدن است که هيو اطراف آن با دامنه تقريبي ۱۰ سانتي متري نوسان مي نمايد.

شکل (۱۴) پيچ شناور را نشان مي دهد. بدليل آب گرفتگي تريم ديناميکي در حدود ۱/۲ درجه بوجود آمده و شناور اطراف آن با دامنه‌اي حدود ۰/۶ درجه نوسان مي‌نمايد.

شکل هاي (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) نيروهاي وارده بر شناور در راستاي صدمه‌ديدگي بترتيب در جهت رول، هيو و پيچ را نشان مي دهد. شکل عمومي نيروهاي وارده، با طبيعت حرکات شناور هم‌خواني دارد.

شکل (۱۸) آب ذخيره شده در مخزن را نشان مي‌دهد. همان طور که انتظار مي رود، آب ابتدا با نرخ زيادي بصورت شبه نوساني وارد شده و سپس نرخ آب ورودي کاهش مي يابد. در پايان بصورت دوره اي آب وارده و خارج شده از مخزن به حالت پايا مي‌رسد. اين موضوع بصورت نرخ آب وارده و خارج شده از مخزن در شکل (۱۹) ديده مي‌شود.

جدول (۱): مشخصات موج

| | |
|---|---|
| *طول موج* | *m۵۰* |
| ارتفاع موج | m۱ |
| زاويه برخورد موج به کشتي | deg۴۵ |
| سرعت کشتي | m/s۵ |
| فرکانس موج | rad/s ۱/۱۱ |
| فرکانس برخورد موج | rad/s ۰/۶۶ |

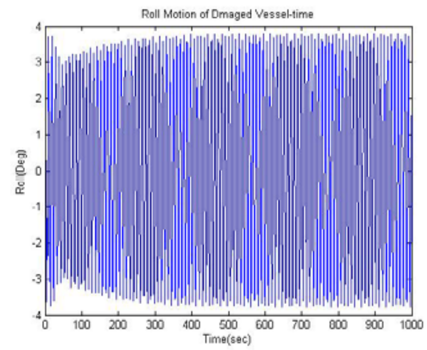
جدول (۲): مشخصات مخزن صدمه ديده

| | |
|---|---|
| عرض انباره صدمه‌ديده | *m ۷/۵* |
| ارتفاع انباره صدمه‌ديده | m ۵ |
| موقعيت طولي انباره صدمه‌ديده نسبت به مرکز ثقل کشتي | m -۲۳ |
| موقعيت طولي سوراخ ايجاد شده در انباره صدمه‌ديده نسبت به مرکز ثقل کشتي | m -۲۳ |
| موقعيت عرضي سوراخ ايجاد شده در انباره صدمه‌ديده نسبت به مرکز ثقل کشتي | m -۳/۸ |
| موقعيت ارتفاعي سوراخ ايجاد شده در انباره صدمه‌ديده نسبت به کف آن | m ۱ |

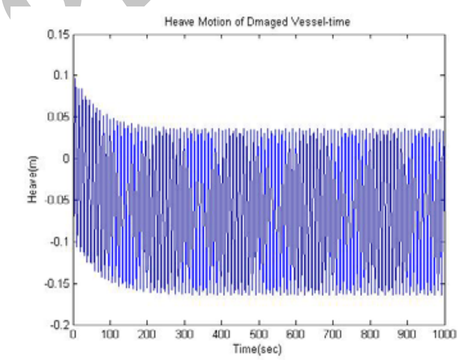
| | |
|---|---|
| m ۱۰ | طول انباره |
| m ۰/۵ | ارتفاع مرکز ثقل نسبت به کف انباره |
| m۱ | قطر سوراخ |

جدول (۳): مشخصات اصلي فريگيت

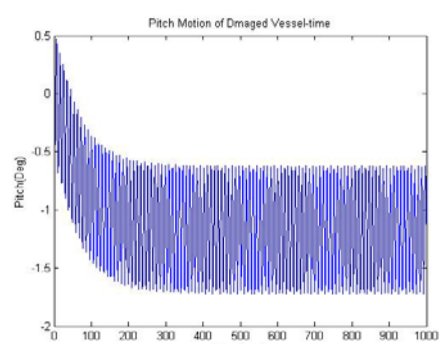
| | |
|---|---|
| طول کل | ۹۴/۴۹ متر |
| طول بين دو عمود | ۸۸/۳۹ متر |
| عرض ماکزيمم | ۱۱/۱۰متر |
| ارتفاع | ۷/۶۲ متر |
| وزن جابجايي | ۱۵۵۰ تن |
| آبخور | ۳/۵ متر |



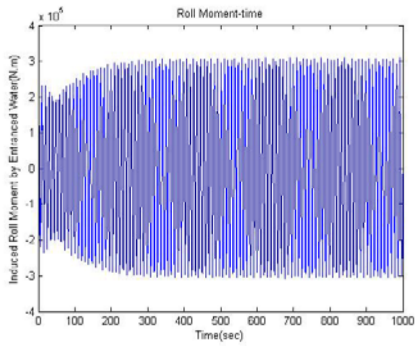

شکل (۱۲): حرکت رول شناور در حالت صدمه‌دیده



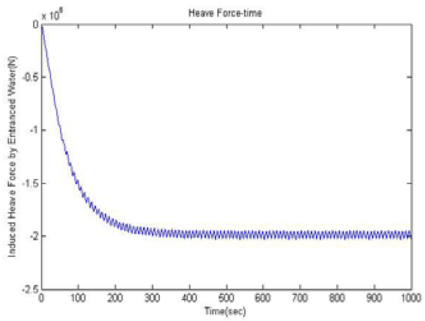

شکل (۱۳) : حرکت هيو شناور در حالت صدمه‌ديده در شرايط مذکور



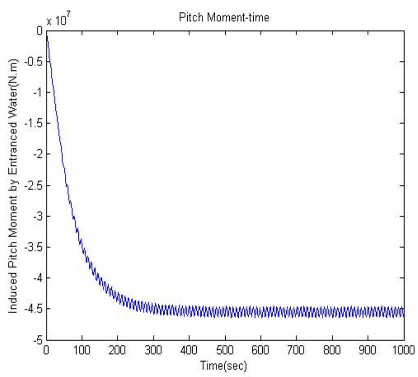

شکل (۱۴) : حرکت پيچ شناور در حالت صدمه‌ديده



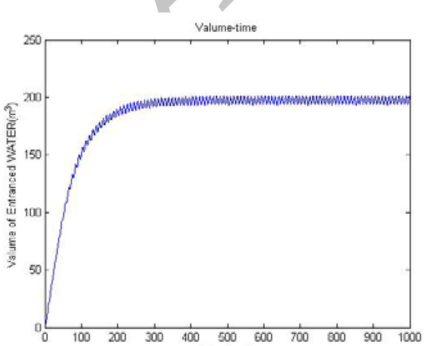

شکل (۱۵) : ممان رول وارد شده بر شناور در اثر صدمه‌ديدگي



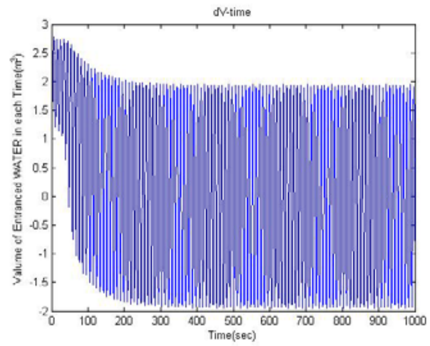

شکل (۱۶) : نيروي وارد شده درجهت هيو شناور در اثر صدمه ديدگي




شکل (۱۷) : ممان پيچ وارد شده بر شناور در اثر صدمه‌ديدگي




شکل (۱۸) : حجم آب داخل انبار




شکل (۱۹) : دبي آب وارد يا خارج شده به انباره

## ۸-۲- نتايج کلي محاسبات در زواياي برخورد مختلف

جدول (۴) نتايج محاسبات را با حفظ درنظر گرفتن شرايط بخش ۸-۱ و تغيير زواياي برخورد نشان مي دهد. زاويه برخورد صفر درجه موج از پاشنه، زاويه برخورد ۱۸۰ درجه موج از سينه و زاويه برخورد ۹۰ درجه موج از کنار شناور است. همان طور که انتظار مي رفت رفتارهاي کلي شناور، تغييرات زيادي در زواياي برخورد مختلف ندارند فقط دامنه حرکت رول شناور در زاويه برخورد ۹۰ درجه به شدت افزايش مي‌يابد. اين مسئله اثر کمي بر رفتارهاي ديگر دارد.

## ۹- نتيجه گيري

در اين تحقيق روشي براي محاسبه حرکات مهم کشتي صدمه‌ديده در امواج ارائه شده‌است که اثرات آب ذخيره‌شده در مخزن صدمه ديده کشتي را نيز در نظر مي‌گيرد. بر اين اساس طرحي رياضي ارائه گرديد و بر اساس آن برنامه رايانه اي تدوين گرديد. نتايج بدست آمده از نمونه محاسباتي بصورت کيفي و کمي با کارهاي ديگر محققين مقايسه شد و اعتبار برنامه نوشته شده مورد تائيد قرار گرفت. برنامه نوشته شده براي يک فريگيت، مورد استفاده قرار گرفت و نتايج آن ارائه شد. نتايج عبارتند از:

- طرح تهيه شده براي صدمه ديدگي شناور عليرغم ساده سازي هاي انجام شده در مورد حرکات کشتي، رفتار مناسبي را نشان مي‌دهد.
- با توجه به محاسبات انجام شده در حالت هاي مختلف، نرم‌افزار توان ارائه پاسخ‌هاي منطقي را دارد.
- با يک بررسي کلي مي توان به اين نتيجه رسيد که پايداري کشتي صدمه‌ديده داراي دو قسمت است:
  - محدوده زماني گذرايي، که بسته به شرايط شناور و موج مي‌تواند متفاوت باشد.
  - محدوده پايدار که اگر شناور پس از آب گرفتگي و عبور از مرحله گذرا دچار واژگوني نشود داراي حرکاتي شبه دائم خواهد شد.
- بيش‌ترين ممان‌هاي اعمال شده از طرف آب وارده به کشتي در محدوده گذرا اتفاق مي‌افتد.
- براي شناور فريگيت محاسبه شده، دامنه حرکت رول به ۱۰ درجه در حالت موج از کنار[۹] مي‌رسد. درحاليکه در حالت موج از سينه[۱۰] و يا پاشنه مقدار زاويه رول ناچيز است. بنابراين حفظ سيستم رانش و سيستم کنترلي شناور پس از صدمه ديدگي و هدايت زاويه برخورد موج مي تواند نقشي اساسي در قابليت بقاي شناور صدمه‌ديده ايفاء نمايد.
- هيو، پيچ و هم چنين شتاب هاي ناشي از آنها معيارهاي کليدي در درياماني شناور سالم هستند، ولي اين تحقيق نشان داده است که براي شناور صدمه‌ديده مقدار رول شناور کليدي‌ترين معيار براي حفظ بقاء شناور است.

جدول (۴): رفتار شناور صدمه‌ديده در کليه زواياي برخورد

| عناوين | $\mu=0$ | $\mu=45$ | $\mu=90$ | $\mu=135$ | $\mu=180$ |
|---|---|---|---|---|---|
| فرکانس موج(Rad/s) | ۰/۶۴۰ | /۶۴۰ | ۰/۶۴ | /۶۴۰ | ۰/۶۴ |
| فرکانس برخورد (Rad/s) | ۰/۵۵۷ | ۰/۵۸۲ | ۰/۶۴ | ۰/۷۰۰ | ۰/۷۲۵ |
| زمان لازم براي پايداري حرکت (S) | ۲۲۰ | ۲۵۰ | ۲۱۰ | ۱۸۰ | ۱۵۰ |
| حجم متوسط آبي که در مخزن مي ماند ($m^3$) | ۱۹۳/۴ | ۱۹۱/۸ | ۱۸۹/۸ | ۱۸۸/۹ | ۱۸۸/۸ |
| دامنه تغييرات حجم ($m^3$) | ۷/۹۷۴ | ۶/۴۸۲ | ۷/۱۹۸ | ۴/۶۷۵ | ۱/۰۹۵ |
| مقدار زاويه هيل (درجه) | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۱۷ | -۰/۰۱۱ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۰۰ |
| دامنه نوسانات رول پس از پايداري(درجه) | ۰/۱۲۶ | ۶/۰۳۶ | ۱۰/۰۸ | ۶/۰۹۳ | ۰/۱۲۷ |
| افزايش آبخور شناور (متر) | ۰/۱۲۱ | ۰/۱۶۸ | ۰/۲۱۹ | ۰/۲۵۷ | ۰/۲۶۷ |
| دامنه نوسانات هيو پس از پايداري (متر) | ۰/۴۲۳ | ۰/۴۹۲ | ۰/۵۸۴ | ۰/۶۰۲ | ۰/۶۰۰ |
| دامنه نوسانات پيچ پس از پايداري (درجه) | ۱/۲۳۰ | ۱/۲۷۲ | ۱/۲۴۰ | ۱/۲۱۶ | ۱/۲۱۷ |

## ۸- مراجع


[۱] سیف، محمد سعید؛ دینامیک کشتي، انتشارات دانشگاه هرمزگان، مهر ۱۳۷٦.

[۲] حاجي عرب، محمد؛ عملکرد و نجات پذيري شناور در موج، پایان نامه کارشناسي ارشد، دانشکده کشتي سازي و صنایع دریایي، دانشگاه صنعتي امیر کبیر، ۱۳۸۳ .

[۳] N.E., Mikelis; J.M.J., Journée; Experimental & Numerical Simulations of Sloshing Behaviour in Liquid Cargo Tanks & its Effect on Ship Motion, National Conference on Numerical Methods for Transient and Coupled Problems, 9-13 July 1984, Venice, Italy.

[۴] A.W., Vredeveldt; J.M.J., Journee; Roll Motions of Ships due to Sudden Water Ingress, Calculations and Experiments,RINA',International Conference on Ro-Ro Safety and Vulnerability the Way Ahead, April 1991, Vol. I

[۵] J.M.J. Journee; A.W. Vredeveldt; H. Vermeer; Mathematical Modeling of Motions and Damaged Stability of Ro-Ro Ships in the Intermediate Stages of Flooding, STAB'94, Fifth International Conference on Stability of Ships and Ocean Structures,1994.

[۶] J.M.J. Journée "Liquid Cargo and Its Effect on Ship Motions" Delft University of Technology STAB'97, Six International Conference on Stability of Ships and Ocean Structures, Pages 137-150, Varna, Bulgaria, September 22-27, 1997.

[۷] J.M.J. Journée (DUT); H. Vermeer (DGSM); A.W. Vredeveldt (TNO); Systematic Model Experiments on Flooding of Two Ro-Ro Vessels, STAB'97, Six Int. Conf.on Stability of Ships and Ocean Structures, Pages 81-98,Varna, Bulgaria, September 22-27, 1997.

[۸] J.M.J. Journée; Fluid Tanks and Ship Motions, Lecture, held at Kyushu University. Report 1237, 27 October 2000,Delft University of Technology.

[۹] Lionel Palazzi ; Jan de Kat; Model Experiments & Simulations of A Damaged Ship With Air-Flow Taken Into Account, Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, 2002.

[۱۰] T.A. Santos; C. Guedes Soares; RO-RO Ship Damage Stability Calculations Using The Pressure Integration Technique, Journal of International Shipbuilding Progress Volume 48, Number 2/2001.

[۱۱] Lewis, Edward V.; Principles of Naval Architecture: Volume III Motions in Waves and Controllability, Society of Naval Architects & Marine Engineer, 1990.

[۱۲] Bhattacharyya, Rameswar; "Dynamics of Marine Vehicles (ocean engineering)" , John Wiley & Sons Inc, Hardcover - 1978-12-06, ISBN

[۱۳] Van't Ver R.; De Kat J.; Experimental and Numerical Investigation on Progressive Flooding and Sloshing in Complex Compartment Geometry, Marine, The Netherlands, 2002..

[۱۴] Riaan van 't Veer; Andrea Serra; Large Passenger Ship Safety: Time to Sink Simulations , Marine, The Netherlands ,2002.

[۱۵] Vassalos, Dracos; Andrzej Jasionowski "Theoretical Treatise of Damage Ship Stability" The Ship Stability Research Centre, Universities of Glasgow and Strathclyde,23-24 April 2003.

[۱۶] Kamo, T and Ikeda, Y (2002) "Effects of Transient Motion in Intermediate Stages of Flooding on the Final Condition of a Damaged PCC, Proc. of Asia Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics", Kobe, May. 2002, pp.26-31.

[۱۷] Ruponen, P. 2006b. 'Model Tests for the Progressive Flooding of a Box-Shaped Barge', Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Report M-292, 88 p.

[۱۸] NEREUS E.C. project, (2000). First Principles Design for Damage Resistance against Capsize. DG XII-BRITE, 2000-2003.

[۱۹] Dony Setyawan, "DAMAGE STABILITY OF SMALL VESSEL" Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, MARCH 2006.

[۲۰] Ainian Zhang, 'A study on ship collision and grounding using nonlinear finite element method',university of Tokyo, Feb.2007.

[۲۱] Ruponen, P., Sundell, T., Larmela, M.;'Validation of a Simulation Method for Progressive Flooding', Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Rio de Janeiro, Brazil, 25-29.9.2006, Vol. 2, pp. 607-616.




## ۱۰- زیرنویس‌ها

[1] Finite-difference
[2] Ingress tests
[3] Residual stability
[4] Shock wave
[5] Anti-rolling
[6] Air flow
[7] Roll transients
[8] Rate of flow
[9] Beam Sea
[10] Foresea