

تحلیل رفتار دینامیکی کشتی صدمه دیده در موج

حمید زراعتگر^۱؛ ریحانه مهری^۲*؛ حمیدرضا جعفریگانه^۳

چکیده

آسیب دیدگی کشتی ها ممکن است باعث آبرگرفتنی بخش هایی از کشتی و یا حتی ازدست رفتن تعادل آن شود. آسیب دیدگی کشتی ها اجتناب ناپذیر است. از زمانی که کشتی دچار صدمه می شود تا هنگامی که بخش های صدمه دیده به طور کامل از آب پر شوند، رفتار کشتی تغییر می نماید. از طرف دیگر به طور معمول در شرایط محیطی سخت (وجود امواج دریا) آسیب دیدگی رخ می دهد، بنابراین لازم است تحلیل رفتار شناور در وضعیت صدمه دیده در موج انجام شود. در این تحقیق سعی شده است رفتار شناور صدمه دیده در موج با تاکید بر سه حرکت رول، پیچ و هیو تجزیه و تحلیل شود. بدین منظور طرح ریاضی برای سه حرکت مزبور همراه با مقدار آبرگرفتنی مخزن صدمه دیده نوشته شده است که چهار معادله دیفرانسیلی وابسته، بطور همزمان در بازه زمان حل می شود. براین اساس یک روش مناسب تهیه شده و کد رایانه ای آن نوشته شده است که تهیه شده ابتدا معتبر سازی شده و سپس برای یک نمونه شناور فریگیت اجرا گردیده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آسیب دیدگی، کشتی، آبرگرفتنی، رول، پیچ، هیو

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

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۱۵

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۳/۸

^۱ استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا و صنایع دریایی hamidz@aut.ac.ir

^۲ * نویسنده مسئول و کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا و صنایع دریایی

Reyhaneh.mehri@aut.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا و صنایع دریایی Hrjy2003@yahoo.com

دادن اجزای غیر قابل نفوذ به آب، صدمه دیدن از راه عواملی

مثل تصادف، به گل نشستن و یا انفجار هستند. چنانچه در عمل

همه کشتی ها در معرض خطر غرق شدگی در اثر از دست دیده می شود، حوادث آنقدر متناوب اتفاق می افتند که محافظت

۱- مقدمه



از شناور در مقابل چنین حوادثی (حتی در مرحله طراحی) یکی از موضوعات ضروری است.

تحلیل رفتار دینامیکی کشتی صدمه دیده برای بررسی پایداری و امکان بقا کشتی اهمیت زیادی دارد. برای افزایش قابلیت نجات پذیری شناور، باید فهم درستی از چگونگی رفتار شناور در حالت صدمه دیده داشته باشیم و با توجه به اینکه بندرت پدیده صدمه دیدگی در آب راکد اتفاق می افتد، محاسبه حرکات کشتی صدمه دیده در موج ضروری است.

پیرامون رفتار کشتی صدمه دیده و آبگرفتگی کشتی تاکنون مطالعاتی در دنیا انجام شده است که به تعدادی از آنها به طور مختصر اشاره می شود.

مایکلیس و ژورنیه در سال ۲۰۰۰ در مقاله ای با عنوان "شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی رفتار اسلاشینگ در مخازن بار مایع و اثر آن در حرکات شناور" روش حل گذرا و دوبعدی محدود^۱ را برای پیش بینی حرکات سیال و فشارهای القایی در مخازن نیمه پر شناور به کار بردند [۱]. ممان القا شده توسط سیال با معادله ای که حرکت رولینگ شناور را توضیح می دهد کوپل شده و نیروی تحریک برای برنامه رایانه ای اسلاشینگ را ایجاد می نماید. علاوه بر آن آزمایش هایی روی مخازن طراحی شده انجام گرفته و فشارها و ممان های اندازه گیری شده با پیش بینی های عددی مقایسه شده اند. سپس آزمایش هایی روی طرح شناور که دارای مخازن نیمه پر بودند انجام شد و اطلاعات مورد نیاز برای مقایسه با نتایج گرفته شده از برنامه رایانه ای مربوط به نیروهای کوپل شده از حرکات شناور و اسلاشینگ به دست آمدند.

در سال ۱۹۹۱ ژورنیه و وردولت در مقاله ای با عنوان "حرکات رولینگ شناور به دلیل نفوذ ناگهانی آب همراه با محاسبات و آزمایش ها" نشان دادند که حرکت دینامیکی شناور به دلیل نفوذ ناگهانی آب قابل چشم پوشی نیست، از این رو طرحی محاسباتی ایجاد نمودند که درستی آن توسط تست های نفوذ^۲ اثبات شد و در همین مقاله به چاپ رسید [۴].

در سال ۱۹۹۴ ژورنیه و همکاران در مقاله ای با عنوان "مدل سازی ریاضی حرکات شناورهای رورو و پایداری آسیب دیده در زمان های میانی آب گرفتگی"، برای تحلیل مسائل ایمنی مربوط به شناورهای رورو یک طرح ریاضی ایجاد نمودند تا رفتار واقعی یک شناور و پایداری باقیمانده^۳ مربوط به آن را در بازه زمان پس از برخورد شرح دهد. این ابزار پیش بینی تا حد مناسبی توسط آزمایش های مدل یک پانتون و نوعی شناور فری با اریفیس های مختلف آسیب دیدگی و در اشکال مختلف محفظه های کشتی معتبرسازی شد [۵].

در سال ۱۹۹۷ ژورنیه در مقاله ای با عنوان "بار مایع و اثر آن بر حرکات شناور" از تئوری ای بر اساس دینامیک گازها و موج شوک^۴ در جریان گازها، برای تشریح حرکات سیال استفاده نمود. در این روش در اعماق بیشتر که رفتار سیال درون مخزن خطی می شود از تئوری پتانسیل استفاده می شود، همانطور که در برنامه های رایانه ای حرکات شناور از تئوری نواری استفاده شده است تا حرکات سیال داخل مخزن را توضیح دهد. در این مقاله در اعماق کم از نتایج آزمایشگاهی موجود در مورد رفتار سیال در سطح آزاد مخازن ضد رولینگ^۵ استفاده شد تا یافته های تئوری را برای اعماق کم آب اثبات کند. علاوه بر آن تست های رول اجباری برای یک طرح دوبعدی از مخزن بار یک شناور حمل گاز مایع شده در سطوح پرشدگی متفاوت انجام شد و از این داده های آزمایشی برای اثبات نتایج تئوری تمام اعماق آب استفاده شد. نتایج این مقاله که بر اساس تئوری های دهه ۶۰ هستند می توانند برای دربرگرفتن اثرات حرکت بار مایع غیرویسکوز در محاسبات حرکات شناور نیز به کار روند [۶].

در سال ۱۹۹۷ ژورنیه و همکاران در مقاله ای با عنوان "آزمایش های طرح روی آب گرفتگی دو شناور رورو"، روی رفتار حرکتی شناور و خصوصیات پایداری مربوط به آن در مراحل میانی آب گرفتگی پس از صدمه دیدگی در آب آرام تمرکز نمودند [۷]. یک طرح ریاضی که حرکات شناور را به دلیل آب گرفتگی در بازه زمانی شرح می داد به وجود آمد. برای معتبرسازی آزمایش هایی روی طرح انجام شد. پس از معتبرسازی طرح، تست های روشمندتری انجام شد. برای دو شناور اثر ارتفاع متاسنتریک اولیه، سطح نفوذ آب، زاویه هیل اولیه، وجود بالکدهای طولی و کانال های عرضی و کاهش نفوذپذیری روی واژگونی مورد آزمایش قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۰ ژورنیه در مقاله ای با عنوان "مخازن سیال و حرکات شناور"، حرکات سیال غیرلزج در مخازن شناور و اثر آن بر روی حرکات کشتی در امواج را مورد بررسی قرار داد [۸]. در این مقاله یک مدل شناور با مخازن بار مایع در میان امواج عرضی در وضعیت ساکن مورد آزمایش قرار گرفت. اطلاعات رولینگ اندازه گیری شده با نتایج تئوری نواری محاسبه شده در بازه فرکانس مقایسه شدند. علاوه بر آن رفتار شناور و خصوصیات پایداری مربوط به آن در بازه زمان پس از صدمه دیدگی و در مراحل میانی آب گرفتگی مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل ریاضی نیز که حرکات شناور را در اثر آب گرفتگی در بازه زمان شرح می داد ایجاد شد.

در سال ۲۰۰۰ پالاتزی و دی کات در مقاله ای با عنوان "

۲- حرکات کشتی سالم در امواج منظم

۲-۱- موج منظم

به طور معمول امواج دریا نامنظم هستند و طبیعتی تصادفی دارند، بررسی و تحلیل رفتار این امواج با توجه به ماهیت پیچیده آنها امری بسیار دشوار است. بنابراین برای ساده سازی مسئله و عملی ساختن امکان بررسی، امواج را مجموعه ای از امواج منظم در نظر می گیرند و بدین ترتیب می توان با تحلیل رفتار امواج منظم تشکیل دهنده یک موج نامنظم، به بررسی آن موج پرداخت.

اگر موج در راستای مثبت x حرکت نماید، شکل موج (شکل سطح آب) را می توان بر حسب تابعی از دو متغیر x و t بیان نمود:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega_e t) \quad (1)$$

$$\omega_e = \omega - kV \cos \mu \quad (2)$$

که:

ω : فرکانس موج

ω_e : فرکانس برخورد

K : عدد موج

V : سرعت کشتی

μ : زاویه برخورد موج به کشتی

۲-۲- معادلات حرکت شناور سالم

با توجه به قانون دوم نیوتن، معادله حرکت کشتی در دریا را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\sum_{k=1}^6 \Delta \ddot{\eta}_{jk}(t) = F_j(t) \quad (3)$$

که در آن $\ddot{\eta}_{jk}$ و $\dot{\eta}_{jk}$ و η_{jk} است.

(۳) یک دستگاه معادله دیفرانسیل خطی وابسته با شش معادله دیفرانسیل است که در آن:

j, k : حالت حرکتی کشتی

Δ_{jk} : ماتریس جرمی کشتی که شامل ممان های اینرسی و عامل جرم کشتی است.

$\ddot{\eta}_{jk}(t)$: شتاب کشتی در حالت حرکتی k ام

$F_j(t)$: نیروی وارد به کشتی در حالت حرکتی j ام.

با توجه به مسئله تعادل پس از صدمه دیدگی، در این تحقیق به سه حرکت هیو و پیچ و رول می پردازیم درحالیکه هیو و پیچ بهم وابسته اند.

آزمایش های مدل و شبیه سازی یک شناور آسیب دیده با احتساب جریان هوا^۱، به مطالعه ای رفتار شناور فریگیت آسیب دیده پرداختند و آزمایش هایی در آب آرام و در امواج با ارتفاع و دوره های تناوب متفاوت انجام دادند [۹]. در این مقاله مقایسه ای بین آزمایش ها و شبیه سازی ها در شرایطی که اثر جریان هوا را بیشتر مشخص می نماید انجام شد. هم چنین به آب گرفتگی گذرا و رولینگ گذرا^۲ و اثرگذاری آرایش آب گرفتگی عرضی توجه خاصی شد. جریان هوای قابل توجهی در آزمایش ها دیده شد و در این مقاله روی اهمیت این پدیده در مدل سازی رفتار شناور تمرکز شده است.

سانتوس و گودس در سال ۲۰۰۱ در مقاله ای با عنوان "محاسبات پایداری در وضعیت آسیب دیده شناور رورو با استفاده از روش انتگرال فشار"، فرمول هایی را برای محاسبه تغییر با زمان پایداری آسیب دیده شناورها در آب آزاد معرفی نمودند [۱۰]. یک روش انتگرال گیری فشار که برای محاسبه خواص هیدرواستاتیکی سازه های دریایی مورد استفاده بوده است در اینجا برای محاسبه سرعت جریان از بازشوهای آسیب دیده در زمان شبیه سازی آب گرفتگی به کار گرفته شد. پس از معترسازی این روش، ثابت شد که می توان از آن برای شبیه سازی آب گرفتگی شناور در بازه زمان و محاسبه خواص هیدرواستاتیکی در وضعیت آسیب دیده و نرخ جریان^۳ از میان بازشوهای آسیب دیده روی بدنه شناور استفاده نمود.

در این راستا در سال ۱۳۸۳ حاجی عرب [۲] حرکات رول کشتی صدمه دیده را برای یک بارج صدمه دیده با زاویه برخورد موج ۹۰ درجه تحلیل نمود و به نتایج قابل قبولی دست یافت.

هدف از انجام این پژوهش، محاسبه حرکات پیچ، هیو و رول در کشتی صدمه دیده در زوایای برخورد متفاوت موج است. طرحی از تئوری نواری که در بازه زمان حل می شود برای تحلیل حرکت شناور در موج ارائه خواهد شد. برای این منظور، دبی آب ورودی به مخزن صدمه دیده، حجم آب محبوس در مخزن و نیروهای وارده از طرف آن بر روی شناور و اثرات آن بر حرکات شناور علاوه بر نیروهای وارده از طرف امواج دریا بررسی می شود. مدل ریاضی حاکم بر حرکات استخراج شده و برنامه رایانه ای تدوین شده است. این برنامه برای یک نمونه شناور اجراء شده و نتایج آن معترسازی شده است.

۲-۱-۲- معادله حرکت رول شناور سالم

معادله حرکت رول کشتی صدمه دیده با در نظر گرفتن ممان اعمال شده در حالت صدمه دیدگی عبارت است از:

$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 = F_{EX4} \quad (۴)$$

که:

A_{44} : ممان جرمی افزوده در حرکت رول

I_{44} : ممان اینرسی جرمی در حرکت رول

B_{44} : ضریب میرایی حرکت رول

C_{44} : ضریب ممان برگرداننده حرکت رول

F_{EX4} : نیروی تحریک ناشی از موج برخوردی به شناور (فرو-کریلوف و پراکندگی)

۲-۲-۲- معادله حرکت هیو و پیچ شناور سالم

با فرض اینکه موج به صورت موج ساده سینوسی باشد و از اثرات سایر حرکات کشتی روی کوپل هیو و پیچ صرف نظر کنیم، دستگاه معادلات حرکات هیو و پیچ را میتوان بصورت رابطه (۵) نوشت [۱]:

(۵)

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_{EX3}$$

$$(A_{55} + I)\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_{EX5}$$

که در آن

M : ماتریس جرم و ممان کشتی

A : ماتریس ضرایب جرم افزوده

B : ماتریس ضرایب دمپینگ

C : ماتریس ضرایب فنریت

F : ماتریس مجموع نیروها و ممان های وارده ناشی از موج درحالت سالم هستند.

۳- مدل سازی حرکات کشتی صدمه دیده

برای مدل سازی حرکت کشتی صدمه دیده لازم است نیروهای ناشی از آب وارده به مخزن صدمه دیده به معادلات حرکت اضافه گردد. سپس معادلات حرکت کشتی صدمه دیده استخراج و حل گردد. اصول و فرضیات اصلی بشرح زیر می باشد:

- شناور صدمه دیده، حرکاتی مشابه شناور سالم دارد که تابع همان اصول است.

- شناور بصورت متقارن دچار صدمه دیدگی می شود.

- سیال بصورت ایده آل و غیر چرخشی فرض می شود.

- از تئوری نواری برای محاسبات نیروهای وارده بر شناور صدمه دیده در موج استفاده می شود.

نیروهای وارده بر شناور صدمه دیده شامل نیروی فرو-کریلوف، نیروی تشعشعی و نیروی پراکندگی هستند که علاوه بر آن نیروی ناشی از وزن سیال وارده به داخل شناور نیز اضافه می شود.

۳-۱- معادلات حرکات شناور صدمه دیده

مدل سازی حرکت شناور صدمه دیده در موج، مانند مدل سازی حرکت شناور سالم در موج است که تنها تفاوت آن به آب گرفتگی مخزن صدمه دیده مرتبط است. آب گرفتگی مخزن صدمه دیده تابعی از سه حرکت هیو، پیچ و رول است. در عین حال میزان آب گرفتگی مخزن صدمه دیده بر حرکات هیو، پیچ و رول تاثیر می گذارد. بنابراین وابستگی بین آنها وجود دارد. بطور کلی چهار معادله دیفرانسیلی وابسته و چهار مجهول وجود دارد که مجهولات عبارتند از دامنه هیو، پیچ، رول و حجم آب گرفتگی مخزن صدمه دیده. این چهار معادله دیفرانسیلی بشرح زیر است:

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_{EX3} + F_{Dam3}(t)$$

(۶)

$$(A_{55} + I)\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_{EX5} + F_{Dam5}(t)$$

(۷)

$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 = F_{EX4} + F_{Dam4}(t) \quad (۸)$$

$$V(t) = \int_0^t Q(t) dt \quad (۹)$$

که:

F_{EX3} : نیروی فرو-کریلوف و پراکندگی وارده بر شناور در جهت هیو ناشی از امواج دریا

F_{EX4} : نیروی فرو-کریلوف و پراکندگی وارده بر شناور در جهت رول ناشی از امواج دریا

F_{EX5} : نیروی فرو-کریلوف و پراکندگی وارده بر شناور در جهت پیچ ناشی از امواج دریا

نیروهای گفته شده توسط روابط زیر محاسبه می شوند:

$$F_{EX3} = \zeta \int_L \left\{ e^{ikx} e^{-kT^*(x)} \left[c_{33}(x) - \omega_0 [\omega_e a_{33}(x) - ib_{33}(x)] \right] \right\} dx \quad (۱۰)$$

$$F_{EX4} = \zeta_a \sin \mu \left[(\rho \sqrt{GM} - A_{42}) \omega^2 \sin \omega t + \omega B_{42} \cos \omega t \right] \quad (۱۱)$$

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



سرعت محاسبه شده برای آن خواهیم داشت:

$$Q = C_d v_2 A \quad (۱۸)$$

که

A: مساحت سوراخ

C_d : ضریب تخلیه

ضریب تخلیه، شامل اثرات مختلفی است که در جریان عبور سیال از سوراخ بوجود می‌آید و فاصله بصورت تجربی محاسبه می‌شود و مقدار آن برای یک سوراخ دایره ای شکل و جریان یکنواخت گذرنده از آن حدود ۰/۶ تا ۰/۶۵ است [۱۱].

در پایان با محاسبه مقدار آب وارد شده و با توجه به مقدار حرکات قبلی شناور در مرحله بعدی می‌توان جرم آب وارد شده، مرکز جرم آب وارد شده و در نتیجه ممان و نیروهای ناشی از آن را محاسبه نمود. در ضمن مقدار آب بازگشتی از داخل مخزن به بیرون در این مرحله نیز در نظر گرفته می‌شود.

۵- مدل‌سازی نیروی وارده بر شناور از طرف آب

وارده به مخزن

با محاسبه مقادیر آب وارد شده و زاویه ایجاد شده در حرکات رول، پیچ و همچنین مقدار حرکتی که در هیدروایجاد می‌شود در هر مرحله می‌توان نیروی وارده از طرف سیال به شناور را محاسبه نمود.

در شکل های (۲) و (۳) دو نمونه از حالت هایی که ممکن است در مخازن آب گرفته ایجاد شود نمایش داده شده است. این کار بر اساس تقسیم بندی حالت های مختلف در حرکات سه گانه مورد نظر بدست می‌آید. در این شکل ها عامل های نشان داده شده دارای تعاریف زیر هستند:

G : مرکز جرم کشتی

G_w : مرکز جرم آب وارد شده به کشتی

dG : نیروی وارده به کشتی ناشی از آب وارد شده به

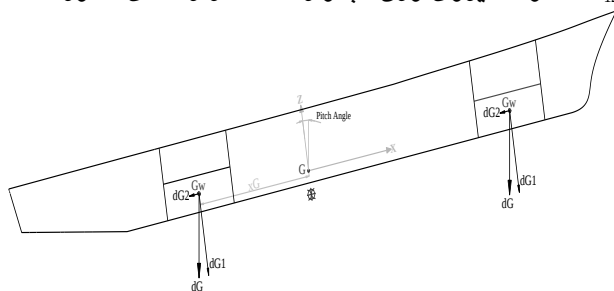
انبار کشتی

dG_1 : مولفه نیروی وزن آب وارد شده در صفحه YZ

dG_2 : مولفه نیروی وزن آب وارد شده در راستای محور X

dG_{11} : مولفه نیروی وزن آب وارد شده در راستای محور Z

dG_{12} : مولفه نیروی وزن آب وارد شده در راستای محور Y



$$-\frac{V}{i\omega_e} \omega_0 [\omega_e a_{33}(x) - ib_{33}(x)] dx \quad (۱۲)$$

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

جهت هیدرو

$F_{Dam4}(t)$: نیروی وارده از طرف مخزن آب گرفته در جهت رول

$F_{Dam5}(t)$: نیروی وارده از طرف مخزن آب گرفته در جهت

پیچ که از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

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

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

۴- مدل‌سازی دبی آب وارده به مخزن

با فرض سیال ایده‌آل، طرح در نظر گرفته شده برای ورود آب به داخل شناور بر اساس معادله برنولی است. به این ترتیب با این فرض که صدمه ایجاد شده به شکل یک سوراخ باشد با اعمال این معادله در دو طرف سوراخ با توجه به شکل (۱) خواهیم داشت [۱۱]:

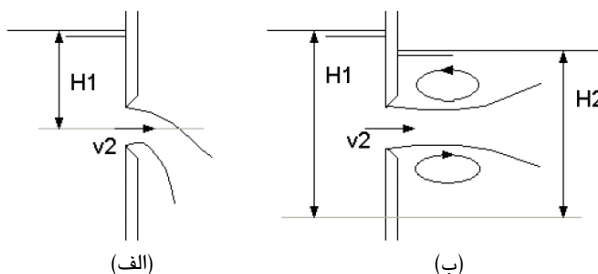
$$\frac{1}{2g} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho g} + H_1 = \frac{1}{2g} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho g} + H_2 \quad (۱۶)$$

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

برای محاسبه سرعت جریان آب ورودی به مخزن با توجه به ارتفاع آب در دو طرف آن می‌توان سرعت آب ورودی به مخزن را به صورت رابطه زیر محاسبه نمود:

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

همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود نمای (الف) مربوط به یک سوراخ است که در آن آب به راحتی و بدون مقاومت از سمت داخل مخزن وارد آن می‌شود و نمای (ب) مربوط به زمانی است که سوراخ از هر دو طرف غرق می‌شود.



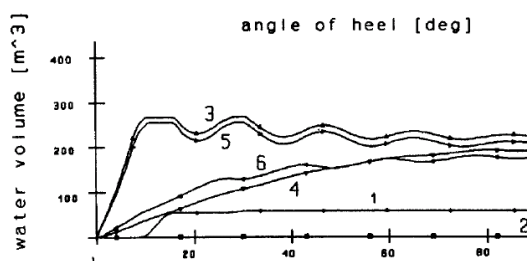
شکل (۱): تخمین سرعت آب وارده با اریفیس [۱۱]

بدین ترتیب برای دبی آب ورودی به مخزن با توجه به

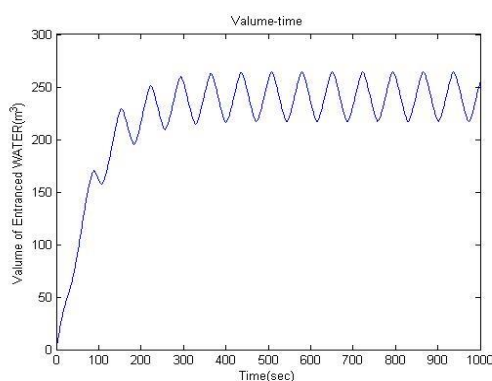
همکاران [۵] و هم چنین جان دی کات و لیونل پالازی [۹] استفاده می‌نماییم و در انتها نتایج را برای یک شناور مکعب مستطیل بدست می‌آوریم و با کار انجام شده توسط حاجی عرب [۲] مقایسه خواهیم نمود.

۷-۱- مقایسه حجم آب وارد شده

ژورنیه و همکاران [۵] به بررسی اثر آب‌گرفتگی در لحظات میانی در واژگونی کشتی پرداخته و در مدل سازی آن از سوراخ شبیه سازی شده با اریفیس استفاده نموده و اثرات حرکت رول در آب آرام با تغییر ارتفاعات طبقاتی کشتی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) حجم آب وارد شده به مخزن را نسبت به زمان نشان می‌دهد. این شکل نتیجه شبیه سازی انجام شده در مقاله مذکور برای یک کشتی رورو است. شکل (۵) نتیجه پر شدن یک مخزن را در کشتی فریگیت که توسط این تحقیق محاسبه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود روند پر شدن آب در مخزن به این ترتیب است که در یک بازه زمانی حجم آب وارد شده به مخزن زیاد می‌شود که این امر با نوسان همراه است. این بازه زمانی همان محدوده گذرای است که تا پر شدن کامل مخزن به طول می‌انجامد و سپس در یک حجم مشخص که حجم انبار مورد بررسی است نوسان نموده و این نوسانات رو به میرایی می‌رود.

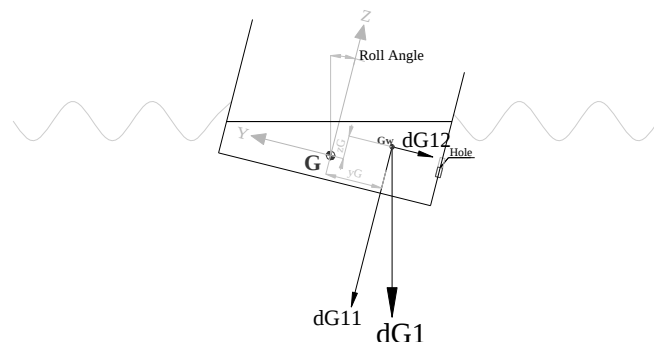


شکل (۴): رفتار کلی ورود آب به شناور صدمه‌دیده [۵]



شکل (۵): نتیجه شبیه‌سازی یک شناور فریگیت

شکل (۲): نیروهای وارده از طرف آب در زاویه پیچ



شکل (۳): نیروهای وارده از طرف آب در نمای عرضی

۶- حل معادلات کشتی صدمه‌دیده

معادلات حرکت شناور صدمه‌دیده، یک دستگاه معادلات چهار معادله، چهار مجهول مرتبه دو خطی است (معادلات ۶ تا ۹). معادلات اول، دوم و چهارم به هم وابسته‌اند. معادله سوم هم به معادله چهارم وابسته است. ضرایب پشت متغیرهای دیفرانسیلی نیز ثابت هستند.

معادلات دیفرانسیل (۶)، (۷) و (۸) دارای یک بخش دوره‌ای هستند که روشی کلاسیک برای محاسبه آنها وجود دارد. برای جمله تابع زمانی ناشی از آب‌گرفتگی، معادلات در لحظات کوچک، بعنوان جواب اختصاصی حل می‌شوند.

برای محاسبه سه حرکت هیو، پیچ و رول و هم چنین مقدار آب ذخیره شده در مخازن، دستگاه معادلات چهار معادله، چهار مجهول بطور هم‌زمان حل می‌شود. حل معادلات از نظر زمانی تا جایی ادامه می‌یابد که حرکات و آب وارده به داخل مخزن صدمه‌دیده شبه دوره‌ای شود و در یک دوره زمانی تکرار شوند.

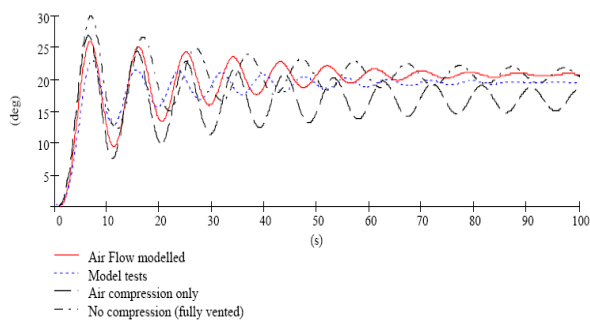
بر اساس مدل سازی بالا برنامه‌ای تهیه شده که امکان محاسبه را برای هر نوع شناوری فراهم می‌سازد.

۷- معتبر سازی

در بررسی اعتبار یک روش محاسباتی با روش‌های دیگر، لازم است ابتدا شکل عمومی رفتارها یکسان باشد سپس باید مقادیر نیز اختلاف زیادی با یکدیگر نداشته باشند. برای مقایسه دو روش محاسباتی لازم است ورودی یکسانی را به برنامه داد. بدلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات ورودی دیگر محققین، شکل عمومی مقادیر مورد محاسبه با آنها مقایسه شد و فقط برای یکی از روش‌های محاسباتی با مقادیر نیز مقایسه شده است.

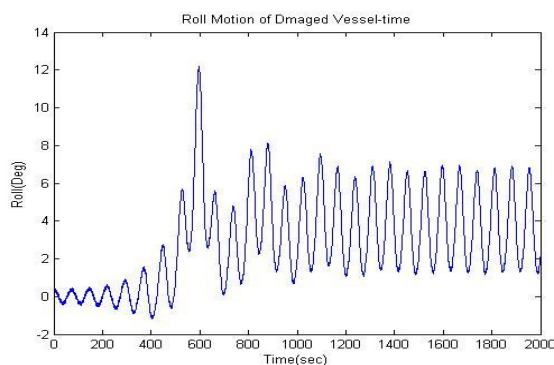
در این راستا از کارهای انجام شده توسط ژورنیه و

شکل (۷): رفتار کلی زاویه رول برای شناور رورو در ابعاد متفاوت
سوراخ [۵]



شکل (۸): رفتار کلی زاویه رول برای شناور فریگیت [۹]

در کار انجام شده به وسیله پالازی و دیکات [۹] نیز حرکت رول یک شناور فریگیت بررسی شده است که در شکل (۸) نمونه نتیجه آن را می‌توان دید. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود؛ در اینجا نیز با یک روند افزایشی ناگهانی در حرکت رول روبرو هستیم و سپس میرایی آن را در آب آرام شاهد خواهیم بود. صرف نظر از اندازه هر یک از حالت‌هایی که در شکل نشان داده شده و مربوط به جواب‌های مختلف آن برنامه است، در پایان همگی روال مشخص گفته شده را طی می‌نمایند. شکل (۹) نتیجه اجرای برنامه برای فریگیت در حرکت رول در فرکانس پایین است. در شکل (۹) در یک محدوده زمانی، با افزایش زاویه رول روبرو هستیم و پس از آن نوسانات اطراف زاویه‌ای دیگر رخ می‌دهند. از مقایسه شکل (۹) با شکل‌های (۷) و (۸) می‌توان گفت که شکل عمومی حرکت رول به دست آمده از این تحقیق و نتایج تحقیق دیگر محققین مشابه است.



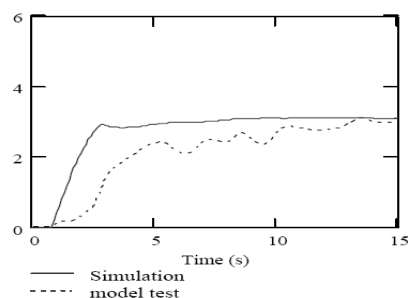
شکل (۹): رفتار کلی زاویه رول برای شناور فریگیت در فرکانس پایین

۳-۷ - مقایسه نتایج برای یک شناور بارج

حاجی عرب [۲] حرکت رول یک شناور بارج شکل را محاسبه نمود. برای بارج گفته شده محاسبات به وسیله نرم‌افزار تکرار شده تا نتایج مقایسه شوند. مشخصات بارج عبارت است

چنانچه در شکل (۵) نیز دیده می‌شود تا محدوده خاصی افزایش آب وارد شده به مخزن را خواهیم داشت و از آن به بعد در حجم معینی نوسان نموده که نشان‌دهنده این است که آب بصورت مداوم به مخزن وارد شده و سپس از آن خارج می‌شود.

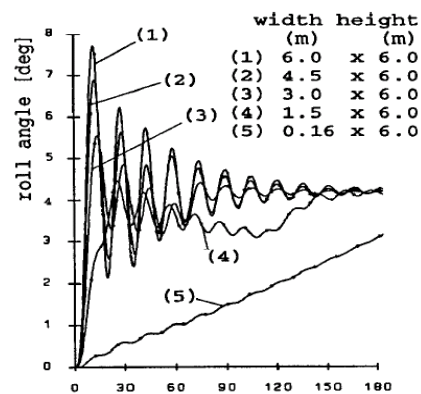
پالازی و دیکات ارتفاع آب وارد شده به مخزن را در لحظات زمانی مختلف ارائه نموده‌اند که در شکل (۶) دیده می‌شود [۹]. مقایسه شکل (۶) و (۵) نشان می‌دهد که رفتار عمومی پر شدن مخازن دو روش شبیه یکدیگر هستند.



شکل (۶): رفتار کلی ورود آب به شناور صدمه‌دیده [۹]

۲-۷ - مقایسه حرکت رول

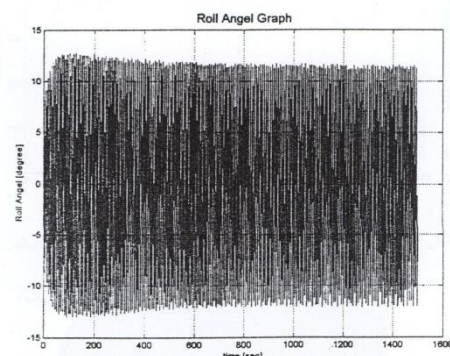
ژورنیه و همکاران [۵] حرکت رول در آب آرام در اندازه‌های مختلف صدمه‌دیدگی را نیز برای یک شناور رورو محاسبه نموده‌اند که در شکل (۷) دیده می‌شود. روند کلی به این صورت است که در ابتدا با وارد شدن آب به مخزن، حرکت رول نیز افزایش می‌یابد و پس از گذشتن از دوره گذرا و پر شدن مخزن، حرکت در یک زاویه هیل معین میرا می‌شود البته اینها در صورتی است که کشتی آسیب‌دیده واژگون نشود.



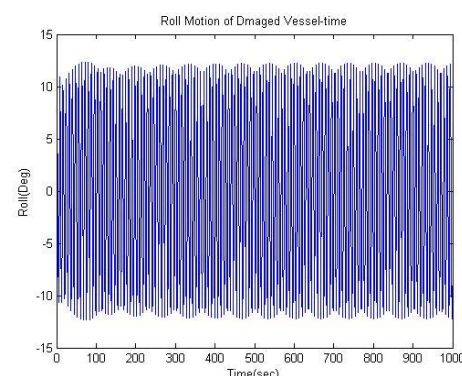
از:

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

نتایج این دو برای شناوری یکسان در اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



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



شکل (۱۱): حرکت رول برای بارج محاسبه شده در این تحقیق

چنانچه دیده می شود نتایج بدست آمده در شکل (۱۱) با شکل (۱۰) هم از نظر مقدار و هم از نظر روند کلی حرکت، هم خوانی خوبی دارند. در ابتدا، حرکت رول بصورت تدریجی افزایش می یابد و پس از آن با یک حرکت نوسانی در دامنه مشخص ادامه می یابد.

بر اساس معتبرسازی انجام شده، می توان به نتایج محاسبات روش مورد استفاده در این تحقیق اعتماد نمود.

۸- نمونه نتایج برنامه

۸-۱- نمونه محاسبات با جزئیات در زاویه برخورد ۴۵

درجه

برای شناور نظامی فریگیت با مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، که صدمه دیدگی بشرح جدول (۲) و در شرایط محیطی بشرح جدول (۱) است، نرم افزار مجموعه ای از رفتار شناور صدمه دیده بر حسب زمان بشرح شکل های (۱۲) تا (۱۹)

محاسبه نموده است.

شکل (۱۲) رول شناور را نشان می دهد. بر حسب انتظار از مقدار حداقلی شروع شده و به یک مقدار زیاد و گذرا می رسد. سپس بصورت نوسانی به یک مقدار تکرارشونده با دامنه ۳/۸ درجه می رسد.

شکل (۱۳) حرکت هیو را نشان می دهد. افزایش آبخور شناور به مقدار تقریبی ۵ سانتی متر به وضوح قابل دیدن است که هیو اطراف آن با دامنه تقریبی ۱۰ سانتی متری نوسان می نماید.

شکل (۱۴) پیچ شناور را نشان می دهد. بدلیل آب گرفتگی تریم دینامیکی در حدود ۱/۲ درجه بوجود آمده و شناور اطراف آن با دامنه ای حدود ۰/۶ درجه نوسان می نماید. شکل های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) نیروهای وارده بر شناور در راستای صدمه دیدگی بترتیب در جهت رول، هیو و پیچ را نشان می دهد. شکل عمومی نیروهای وارده، با طبیعت حرکات شناور هم خوانی دارد.

شکل (۱۸) آب ذخیره شده در مخزن را نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود، آب ابتدا با نرخ زیادی بصورت شبه نوسانی وارد شده و سپس نرخ آب ورودی کاهش می یابد. در پایان بصورت دوره ای آب وارده و خارج شده از مخزن به حالت پایا می رسد. این موضوع بصورت نرخ آب وارده و خارج شده از مخزن در شکل (۱۹) دیده می شود.

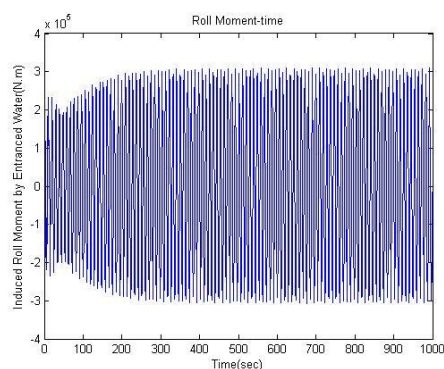
جدول (۱): مشخصات موج

طول موج	m ۵۰
ارتفاع موج	m ۱
زاویه برخورد موج به کشتی	deg ۴۵
سرعت کشتی	m/s ۵
فرکانس موج	rad/s ۱/۱۱
فرکانس برخورد موج	rad/s ۰/۶۶

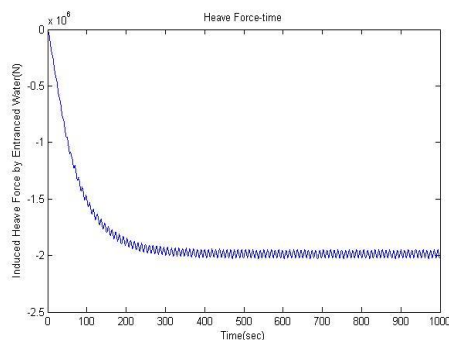
جدول (۲): مشخصات مخزن صدمه دیده

عرض انباره صدمه دیده	m ۷/۵
ارتفاع انباره صدمه دیده	m ۵
موقعیت طولی انباره صدمه دیده نسبت به مرکز ثقل کشتی	m -۲۳
موقعیت طولی سوراخ ایجاد شده در انباره صدمه دیده نسبت به مرکز ثقل کشتی	m -۲۳
موقعیت عرضی سوراخ ایجاد شده در انباره صدمه دیده نسبت به مرکز ثقل کشتی	m -۳/۸
موقعیت ارتفاعی سوراخ ایجاد شده در انباره	m ۱

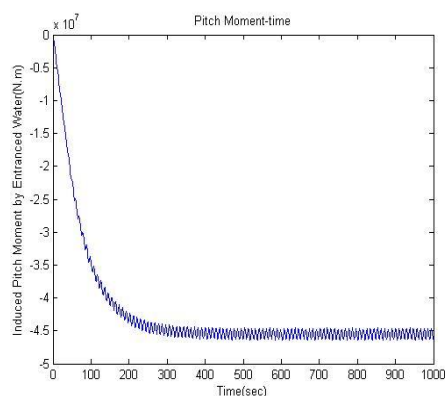




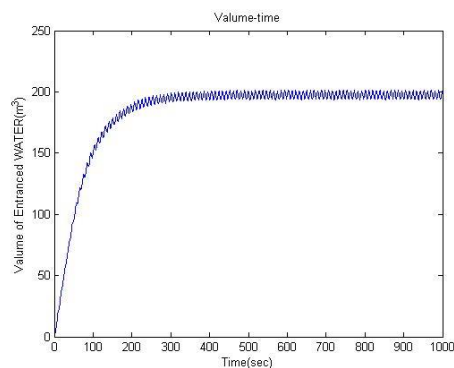
شکل (۱۵): ممان رول وارد شده بر شناور در اثر صدمه دیدگی



شکل (۱۶): نیروی وارد شده در جهت هیو شناور در اثر صدمه دیدگی



شکل (۱۷): ممان پیچ وارد شده بر شناور در اثر صدمه دیدگی

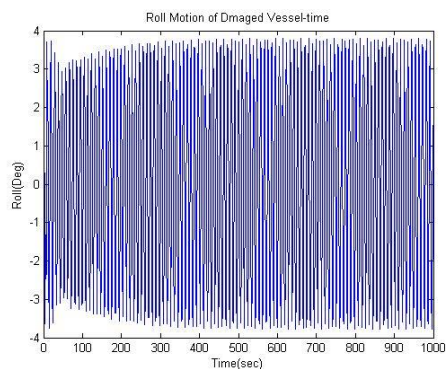


شکل (۱۸): حجم آب داخل انبار

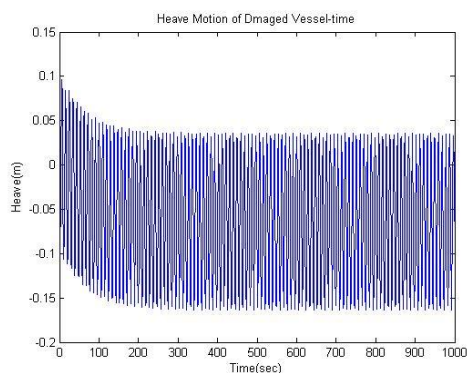
	صدمه دیده نسبت به کف آن
m ۱۰	طول انبار
m ۰/۵	ارتفاع مرکز ثقل نسبت به کف انبار
m ۱	قطر سوراخ

جدول (۳): مشخصات اصلی فریگیت

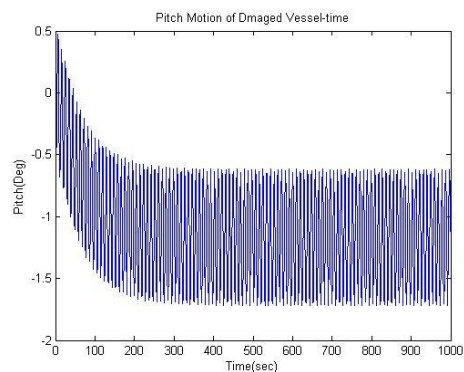
طول کل	۹۴/۴۹ متر
طول بین دو عمود	۸۸/۳۹ متر
عرض ماکزیمم	۱۱/۱۰ متر
ارتفاع	۷/۶۲ متر
وزن جابجایی	۱۵۵۰ تن
آبخور	۳/۵ متر



شکل (۱۲): حرکت رول شناور در حالت صدمه دیده



شکل (۱۳): حرکت هیو شناور در حالت صدمه دیده در شرایط مذکور

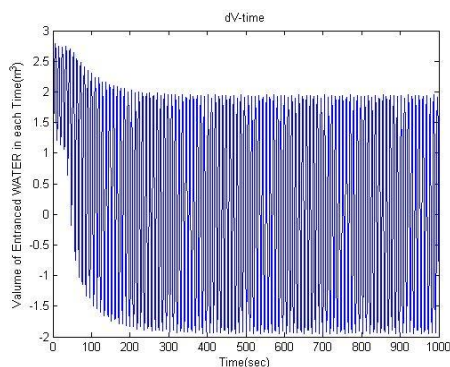


شکل (۱۴): حرکت پیچ شناور در حالت صدمه دیده



شد. نتایج عبارتند از:

- طرح تهیه شده برای صدمه دیدگی شناور علیرغم ساده سازی های انجام شده در مورد حرکات کشتی، رفتار مناسبی را نشان می دهد.
- با توجه به محاسبات انجام شده در حالت های مختلف، نرم افزار توان ارائه پاسخ های منطقی را دارد.
- با یک بررسی کلی می توان به این نتیجه رسید که پایداری کشتی صدمه دیده دارای دو قسمت است:
 - محدوده زمانی گذرایی، که بسته به شرایط شناور و موج می تواند متفاوت باشد.
 - محدوده پایداری که اگر شناور پس از آب گرفتگی و عبور از مرحله گذرا دچار واژگونی نشود دارای حرکاتی شبه دائم خواهد شد.
- بیشترین ممان های اعمال شده از طرف آب وارده به کشتی در محدوده گذرا اتفاق می افتد.
- برای شناور فریگیت محاسبه شده، دامنه حرکت رول به ۱۰ درجه در حالت موج از کنار^۱ می رسد درحالی که در حالت موج از سینه^۲ و یا پاشنه مقدار زاویه رول ناچیز است. بنابراین حفظ سیستم رانش و سیستم کنترلی شناور پس از صدمه دیدگی و هدایت زاویه برخورد موج می تواند نقشی اساسی در قابلیت بقای شناور صدمه دیده ایفاء نماید.
- هیو، پیچ و هم چنین شتاب های ناشی از آنها معیارهای کلیدی در دریامانی شناور سالم هستند، ولی این تحقیق نشان داده است که برای شناور صدمه دیده مقدار رول شناور کلیدی ترین معیار برای حفظ بقاء شناور است.



شکل (۱۹): دبی آب وارد یا خارج شده به انباره

۲-۸- نتایج کلی محاسبات در زوایای برخورد مختلف

جدول (۴) نتایج محاسبات را با حفظ در نظر گرفتن شرایط بخش ۸-۱ و تغییر زوایای برخورد نشان می دهد. زاویه برخورد صفر درجه موج از پاشنه، زاویه برخورد ۱۸۰ درجه موج از سینه و زاویه برخورد ۹۰ درجه موج از کنار شناور است. همان طور که انتظار می رفت رفتارهای کلی شناور، تغییرات زیادی در زوایای برخورد مختلف ندارند فقط دامنه حرکت رول شناور در زاویه برخورد ۹۰ درجه به شدت افزایش می یابد. این مسئله اثر کمی بر رفتارهای دیگر دارد.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق روشی برای محاسبه حرکات مهم کشتی صدمه دیده در امواج ارائه شده است که اثرات آب ذخیره شده در مخزن صدمه دیده کشتی را نیز در نظر می گیرد. بر این اساس طرحی ریاضی ارائه گردید و بر اساس آن برنامه رایانه ای تدوین گردید. نتایج بدست آمده از نمونه محاسباتی بصورت کیفی و کمی با کارهای دیگر محققین مقایسه شد و اعتبار برنامه نوشته شده مورد تأیید قرار گرفت. برنامه نوشته شده برای یک فریگیت، مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن ارائه

جدول (۴): رفتار شناور صدمه دیده در کلیه زوایای برخورد

عناوین	$\mu = 0$	$\mu = 45$	$\mu = 90$	$\mu = 135$	$\mu = 180$
فرکانس موج (Rad/s)	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴	۰/۶۴۰	۰/۶۴
فرکانس برخورد (Rad/s)	۰/۵۵۷	۰/۵۸۲	۰/۶۴	۰/۷۰۰	۰/۷۲۵
زمان لازم برای پایداری حرکت (S)	۲۲۰	۲۵۰	۲۱۰	۱۸۰	۱۵۰
حجم متوسط آبی که در مخزن می ماند (m^3)	۱۹۳/۴	۱۹۱/۸	۱۸۹/۸	۱۸۸/۹	۱۸۸/۸
دامنه تغییرات حجم (m^3)	۷/۹۷۴	۶/۴۸۲	۷/۱۹۸	۴/۶۷۵	۱/۰۹۵
مقدار زاویه هیل (درجه)	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	-۰/۰۱۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰
دامنه نوسانات رول پس از پایداری (درجه)	۰/۱۲۶	۶/۰۳۶	۱۰/۰۸	۶/۰۹۳	۰/۱۲۷
افزایش آبخور شناور (متر)	۰/۱۲۱	۰/۱۶۸	۰/۲۱۹	۰/۲۵۷	۰/۲۶۷
دامنه نوسانات هیو پس از پایداری (متر)	۰/۴۲۳	۰/۴۹۲	۰/۵۸۴	۰/۶۰۲	۰/۶۰۰
دامنه نوسانات پیچ پس از پایداری (درجه)	۱/۲۲۰	۱/۲۷۲	۱/۲۴۰	۱/۲۱۶	۱/۲۱۷

۸- مراجع



- 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. [۱۰]
- Lewis, Edward V.; Principles of Naval Architecture: Volume III Motions in Waves and Controllability, Society of Naval Architects & Marine Engineer, 1990. [۱۱]
- Bhattacharyya, Rameswar; "Dynamics of Marine Vehicles (ocean engineering)", John Wiley & Sons Inc, Hardcover - 1978-12-06, ISBN Van't Ver R.; De Kat J.; Experimental and Numerical Investigation on Progressive Flooding and Sloshing in Complex Compartment Geometry, Marine, The Netherlands, 2002.. [۱۲]
- Riaan van 't Veer; Andrea Serra; Large Passenger Ship Safety: Time to Sink Simulations, Marine, The Netherlands, 2002. [۱۳]
- Vassalos, Dracos; Andrzej Jasionowski "Theoretical Treatise of Damage Ship Stability" The Ship Stability Research Centre, Universities of Glasgow and Strathclyde, 23-24 April 2003. [۱۴]
- 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. [۱۵]
- 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. [۱۶]
- NEREUS E.C. project, (2000). First Principles Design for Damage Resistance against Capsize. DG XII-BRITE, 2000-2003. [۱۷]
- Dony Setyawan, "DAMAGE STABILITY OF SMALL VESSEL" Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, MARCH 2006. [۱۸]
- Ainian Zhang, 'A study on ship collision and grounding using nonlinear finite element method', university of Tokyo, Feb.2007. [۱۹]
- 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. [۲۰]
- سیف، محمد سعید؛ دینامیک کشتی، انتشارات دانشگاه هرمزگان، مهر ۱۳۷۶. [۱]
- حاجی عرب، محمد؛ عملکرد و نجات پذیری شناور در موج، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۳. [۲]
- 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. [۳]
- 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 [۴]
- J.M.J. Journée; 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. [۵]
- 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. [۶]
- 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. [۷]
- J.M.J. Journée; Fluid Tanks and Ship Motions, Lecture, held at Kyushu University. Report 1237, 27 October 2000, Delft University of Technology. [۸]
- 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. [۹]

۱۰- زیر نویس ها

- 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

