

شبیه‌سازی عددی اثر ابعاد تیرخن بر مشخصه‌های جریانی حرکت چرخش عرضی کشتی در سیال لزج

مهدی محمودی^۱، رویا شادمانی^۲، مفید گرجی‌بندپی^۳

gorji@nit.ac.ir

- ۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل
 ۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 ۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

چکیده

در این مقاله، بدنه کشتی با ابعاد مختلف تیرخن برای شبیه‌سازی حرکت چرخشی عرضی کشتی در حضور و عدم حضور سرعت پیشروی آن به منظور بررسی توزیع فشار و گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به سطح بدنه کشتی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار فلونت با دقت بسیار بالا با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. در این شبیه‌سازی از فرضیات تئوری جسم باریک و روش سطح آزاد با گردابه تصادفی استفاده شد. نشان داده شد که با افزایش سطح تیرخن، فشار و گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی بر سطح بدنه کشتی کاهش می‌یابد. توزیع فشار روی سطح تیرخن در جهت طولی بدنه کشتی برای کشتی در حال نوسان چرخش عرضی ساکن، تقریباً یکنواخت است. با افزایش سطح تیرخن، فشار اعمالی به آن افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت کشتی، فشار روی سطح تیرخن افزایش یافته ولی اختلاف فشار بین سطح بالایی و پایینی تیرخن، کاهش می‌یابد که در نتیجه سبب می‌شود تا گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به سطح بدنه کشتی و دامنه نوسانات زاویه چرخش عرضی آن کاهش یابد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی سه بعدی، ابعاد لبه میانی، حرکت چرخشی عرضی، سیال لزج، فشار و گشتاور هیدرودینامیکی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۲/۱۶
 تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۱۱/۱۲

۱- مقدمه

در نظر گرفتن ویژگی‌های پایداری دینامیکی و استاتیکی کشتی از مبانی اولیه طراحی و عملکرد ایمن آن محسوب می‌گردد. پایداری کشتی از لحاظ عدم واژگونی آن به صورت مستقیم به حرکت چرخشی عرضی^۱ کشتی وابسته است. ادغام امواج هم جهت و هم فرکانس که سبب افزایش توان تخریبی امواج و یا افزودن درجه آزادی‌های حرکتی متفاوت به کشتی می‌شود، می‌تواند آسیب‌های جدی و خطرناکی را به همراه داشته باشد. در مواقعی که شرایط وقوع پدیده تشدید حرکت چرخش عرضی فراهم می‌گردد، استفاده از قسمت شلجمی^۲ در جلو و روی بدنه (تیرخن^۳) کشتی یکی از روش‌های سنتی پیشنهادی برای افزایش پایداری سیستم است که افزایش مقاومت هیدرودینامیکی در برابر چرخش کشتی را نیز به دنبال داشته و همچنین اندکی هزینه‌های ساخت و تولید را نیز به سیستم تحمیل می‌نماید.

یکی دیگر از جنبه‌های به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در زمینه صنعت کشتی‌رانی به منظور طراحی بدنه کشتی به منظور کاهش صدای تولیدی ناشی از حرکت در آب است. در انجام این طراحی، شبیه‌سازی دقیق سطح آزاد آشفته پیرامون سطح بدنه کشتی نقش اساسی را بر عهده دارد. شبیه‌سازی جریان در مسائل مرتبط با این صنعت، دارای پیچیدگی و تنوع فراوانی است زیرا مدل‌ها و طرح‌های بسیاری به منظور شکست موج در برخورد با بدنه کشتی و اندرکنش دوفازی با لایه مرزی آرام و یا آشفته ارائه شده است. در حالت کلی دو روش کلی مجزا به نام‌های روش‌های پوشش دهنده سطح^۴ و روش‌های تطبیق دهنده سطح^۵ برای توصیف سطح آزاد در معادلات جریان سیال، وجود دارد. می‌توان ادعا کرد که هدف نهایی هر دو روش تعیین دقیق پروفیل موج است زیرا مساحت سطح خیس در محاسبه نیروی درگ اعمالی بر حرکت کشتی اثر گذار است. در روش تطبیق دهنده سطح یک شرط مرزی سینماتیکی در سطح آزاد اعمال شده و معادلات حاکم تنها برای فاز مایع حل می‌گردند [۲،۱].

این روش برای جریان‌هایی با عدد فرود بالا شامل امواجی با دامنه زیاد، به دلیل نیاز به تطابق شکل سطح آزاد بر شبکه محاسباتی، کاربردی ناست. روش‌های پوشش دهنده سطح قابلیت تطبیق‌پذیری بیشتری برای شرایط جریان سطح آزاد را دارا بوده و معادلات حاکم بر مسئله برای هر دو فاز هوا و آب حل می‌گردند. روش حجم سیال^۶ [۳]، روش تنظیم سطح [۴] و روش دنبال کننده پیشرو^۷ [۵] از روش‌های رایج در این دسته می‌باشند.

ساختار و رفتار جریان آشفته در همسایگی سطح آزاد بسیار پیچیده‌تر از رفتار جریان آشفته در جریان تک فاز است. مشخص شده است که در مورد امواج آشفته، اثرات تنش سطحی در ابعاد کوچک‌تر و اثرات گرانشی در ابعاد بزرگ‌تر دارای اهمیت می‌باشند [۶]. اغلب مدل‌های آشفتگی موجود برای جریان‌های تک فازی پیشنهاد شده و قادر به توصیف رفتار آشفته سطح آزاد نیستند و نیازمند به تعریف توابع افزوده^۸ در کد تجاری فلوئنت می‌باشند.

با توجه به موارد ذکر شده، برای استفاده از مدل‌های آشفتگی موجود، نیاز است تا به ارزیابی شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در سطح آزاد پرداخته شود. نرم‌افزار فلوئنت قادر است تا معادلات رنژ^۹ را با روش حجم محدود بر روش شبکه بی‌سازمان پیوندی^{۱۰} حل نماید. الگوریتم‌های متنوعی بر پایه فشار در این نرم‌افزار موجود است. برای محاسبات حالت پایای موجود، الگوریتم سیمپل^{۱۱} قابل قبول است [۷] و روش حجم سیال برای شبیه‌سازی حرکت سطح آزاد به کار گرفته می‌شود. از طرح اختلاف بالادست^{۱۲} مرتبه دوم برای گسسته‌سازی عبارتهای جابجایی در معادلات مومنتوم استفاده می‌شود. مدل $k-\epsilon$ استاندارد با توابع دیواره^{۱۳} برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است [۸]. سیستم منتج از معادلات برای همگرایی سریع‌تر با استفاده از یک روش چند شبکه‌ای جبری حل شده است. حرکت جریان سطح آزاد توسط نیروهای اینرسی و گرانشی شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین، شرایط مرزی باید تحت تاثیر نیروی گرانشی نیز قرار گیرد [۶]. بررسی الگوی موج‌های تولید شده به واسطه

⁸ User Defined Function (UDF)

⁹ RANS

¹⁰ Hybrid

¹¹ SIMPLE

¹² Upwind

¹³ Wall Function

¹ Roll

² Dome

³ Bilge Keels

⁴ Interface Capturing Method

⁵ Interface Fitting Method

⁶ Volume of fluid (VOF)

⁷ Front Tracking

بدون تغییر در جانمایی سلول‌های شبکه، تغییر شکل‌های شدیدی در سلول‌ها رخ داده و محاسبات را به نتایج نادرستی سوق می‌دهد. به دلیل وجود این معایب، استفاده از روش‌های پوشش دهنده سطح برای شبیه‌سازی حرکت پایا و ناپایای کشتی در زمینه مطالعات هیدرودینامیک آن، روز به روز در حال افزایش است.

از مهمترین روش‌های پوشش دهنده سطح می‌توان به روش حجم سیال [۱۵] و روش تنظیم سطح^۳ [۱۶] اشاره نمود. روش حجم سیال قادر است تا حرکت دو یا چند سیال مخلوط نشدنی را با حل یک دسته از معادلات مومنتوم و دنبال نمودن کسر حجمی هر یک از سیالات در این محدوده شبیه‌سازی نماید. تابع کسر حجمی تعریف شده برای هر یک از سیالات در شبیه‌سازی، در صورتی که حجم یک سلول را پر نماید مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر است. اگر سطح تماس دو سیال از میان یک سلول محاسباتی عبور نماید در این صورت، مقدار تابع برای سیالاتی که آن سلول را اشغال نموده‌اند به صورت کسری از حجم اشغالی از آن سیال در کل حجم سلول مذکور است.

روش حجم سیال قادر است تا ضمن ارضای قانون پایستگی جرم تا حد قابل قبولی، مرزهای کاملاً پیچیده را شبیه‌سازی نماید. این روش برای مسائل درگیر با اثرات تنش سطحی توصیه نمی‌گردد. چن و همکاران [۱۷] و ری و اسکینر [۱۸] با استفاده از روش حجم سیال جریان پیرامون بدنه کشتی DTMB-5415 را با موفقیت شبیه‌سازی نمودند. در روش تنظیم سطح، سطح تماس بین دو سیال با مجموعه‌ای از نقاط با توابع درجه بالا تعریف شده‌اند. از معایب این روش، عدم ارضای دقیق معادله پایستگی جرم برای هر یک از سیالات در محدوده مش‌بندی برای شبیه‌سازی‌های وابسته به زمان است.

در روش تنظیم سطح دو فازی، هر دو سیال هوا و آب به عنوان یک سیال مجزا بوده که خواص آن‌ها در طول سطح تماس متغیر است، در حالیکه در روش تنظیم سطح، حل عددی تنها در فاز مایع انجام می‌شود. در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در کاربرد روش تنظیم سطح در مسائل هیدرودینامیکی کشتی‌ها صورت گرفته است. یانگ و همکاران [۱۹] با روش تنظیم سطح دو فازی^۴ به همراه روش

حرکت کشتی در میان آب یکی از مهمترین موضوعات در مطالعات هیدرودینامیکی کشتی و طراحی آن است. این امواج تولیدی دارای انرژی بوده که در سیال پیرامون آن مستهلک می‌گردد. در واقع یکی از مقاومت‌های پیش‌روی کشتی، مقاومت ناشی از امواج تولیدی است. روش‌های جریان پتانسیلی و آشفته برای شبیه‌سازی الگوی جریان پیرامون کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کدهای جریان پتانسیلی بر پایه روش المان مرزی [۹ و ۱۰] اغلب برای مطالعه امواج تولیدی در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثرات لزجت سیال در این روش نادیده گرفته شده و محاسبات جریان به نسبت ساده، سریع و دقیق می‌باشند. بدنه کشتی و سطح آب در کدهای جریان پتانسیلی اغلب با مش‌های مثلثی و مربعی گسسته می‌شوند، بنابراین جریان با حل معادله لاپلاس حل می‌گردد. برای شبیه‌سازی مقاومت موج در جریان پتانسیلی، استفاده از روش منبع رانکین^۱ بسیار رایج است [۱۱]. روش پیشنهادی داوسن^۲ [۱۲] برای شبیه‌سازی پدیده غیر خطی شرط مرزی سطح آزاد نیز قابل استفاده است. روش رنز قادر به شبیه‌سازی جریان آشفته پیرامون کشتی با در نظر گرفتن یا صرف نظر کردن از اثرات سطح آزاد است که نتایج نسبتاً دقیقی را به همراه دارد. استفاده از توابع افزوده مرتبط با لزجت سیال برای بررسی برخی از مشخصه‌های جریان همچون جدایش روی سطح در انتهای بدنه کشتی بسیار ضروری است زیرا تنها این توابع قادر به تعیین الگوی جریان در انتهای بدنه کشتی است. در جریان لزج با توجه به اینکه تا چه حد شبکه مش زده شده بر سطح آزاد منطبق گردد، با استفاده از این توابع قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر خواهیم بود.

برگ و مارکو [۱۳] از الگوریتمی غیر خطی برای سطح آزاد به همراه مش‌بندی بی‌سازمان بر اساس مدل رنز و حجم محدود، برای شبیه‌سازی جریان پیرامون بدنه DTMB-5415 استفاده نمودند. مقاله لی [۱۴] مشابه مقاله برگ و مارکو [۱۳] است که تفاوت آن در تولید مش با سازمان است. یکی از مزایای روش‌های تطبیق دهنده سطح، تعریف نمودن سطوح آزاد با دقت بالا است. از معایب این روش‌ها نیز عدم توانایی مناسب در شبیه‌سازی با حضور امواج به دلیل تغییر شکل زیاد ایجاد شده در شبکه است. بطوریکه،

³ Level Set Method (LS)

⁴ Two Phase Level Set Method

¹ Rankin Source Method

² Dawson

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ در دستگاه مختصات کارترین به شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف کشتی از جمله DTMB-5415 پرداختند و نتایج قابل قبولی به دست آمد. دیماسیو و همکاران [۲۰] از روش تنظیم سطح برای شبیه‌سازی جریان پیرامون بدنه DTMB-5415 با وجود و عدم وجود امواج استفاده نمودند. کاریکا و همکاران [۲۱] از روش تنظیم سطح تک فازی با الگوریتم شش درجه آزادی به منظور شبیه‌سازی حرکات عمودی بدنه کشتی استفاده نمودند.

ژآو و همکاران [۲۲] روشی عددی را برای محاسبه استهلاک حرکت چرخش عرضی کشتی بر مبنای معادلات سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی در مورد چهار نوع کشتی در حالت سکون انجام دادند که با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. ویر و همکاران [۲۳] فشار روی سطح بدنه و بارهای اعمالی به تیرخن را برای یک استوانه شناور بر آب با ایجاد امواج اجباری در جلوی استوانه به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. مارتینز و همکاران [۲۴] اثر وجود ترک بر تیرخن و نقش آن در استهلاک حرکت چرخش عرضی کشتی را بررسی کردند.

جدول (۱) ابعاد بدنه کشتی [۱۹].

پارامتر	مقدار
طول $o/a(L)$	۱۴۲/۰۳۷ m
پهنا b	۱۷/۹۸۳ m
ارتفاع کشتی درون آب d	۶/۱۷۹ m
مساحت سطح خیس	۲۹۷۶/۷ m ²
مساحت صفحه آب	۱۹۸۷/۲ m ²
جابجایی حجمی	۱۲۹۰۱/۶ m ³
ضریب بلوک ^۲	۰/۵۰۶

جدول (۲) پارامترهای هندسی مدل INSEAN C2340 [۲۰].

پارامتر	مقدار
نسبت اندازه ^۳	۲۴/۸۳۲
حجم جابجایی	۰/۵۵۴ m ³
طول L	۵/۷۲ m
عرض B	۰/۷۶۸ m
آبخور T ^۴	۰/۲۴۸ m
مساحت سطوح خیس S	۴/۸۶۱ m ²



شکل (۱) پارامترهای هندسی بدنه کشتی به صورت نمونه.

ژآو و همکاران [۲۲] روشی عددی را برای محاسبه استهلاک حرکت چرخش عرضی کشتی بر مبنای معادلات سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی در مورد چهار نوع کشتی در حالت سکون انجام دادند که با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. ویر و همکاران [۲۳] فشار روی سطح بدنه و بارهای اعمالی به تیرخن را برای یک استوانه شناور بر آب با ایجاد امواج اجباری در جلوی استوانه به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. مارتینز و همکاران [۲۴] اثر وجود ترک بر تیرخن و نقش آن در استهلاک حرکت چرخش عرضی کشتی را بررسی کردند. ایرکال و همکاران [۲۵] اثر وجود و عدم وجود تیرخن بر استهلاک حرکت چرخش عرضی با صورت حل عددی بررسی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و با مطالعه دقیق میدان جریان، رابطه‌ای بین نتایج حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی به دست آوردند. آوالوس و همکاران [۲۶] با روش عددی المان محدود و اعمال شرایط مرزی اصلاح شده به معادله ناویر استوکس، ضریب استهلاک حرکت چرخش عرضی را بصورت دو بعدی مورد مطالعه قرار دادند.

۲- هندسه بدنه کشتی

پارامترهای کلی هندسه بدنه کشتی در شکل ۱ آمده است. هندسه این مدل از بدنه کشتی شامل قسمت شلجمی در بخش زیرین جلوی آن است. پیشرانش به وسیله پروانه‌های دو قلو در انتهای زیرین بدنه کشتی که توسط تیری نگهداری شده است، تامین می‌گردد.

ابعاد اصلی این طرح هندسی برای مدل بدنه کشتی DTMB-5415 در جدول (۱) و شرایط هندسی مدل

³ Scale Ratio

⁴ Draft

¹ Large Eddy Simulation (LES)

² Block Coefficient



شکل (۲) هندسه بدنه کشتی INSEANC2340 برای اعتبارسنجی روش حل عددی.

سیال تراکم‌ناپذیر و لزج با چرخش مثبت در جهت پاد ساعت‌گرد $\omega \mathbf{k} = \nabla \times \mathbf{u}$ فرض می‌شود. معادلات پیوستگی و مومنوم به صورت زیر می‌باشند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

فرمول‌بندی انیشتین [۲۸] برای خلاصه نمودن فرمول‌بندی تئوری حل میدان‌های سرعت و شتاب استفاده شد. برای شبیه‌سازی اثرات لزجت، تابع پتانسیل مختلط β در صفحه مختلط $Z = x + iy$ توصیف می‌گردد که دارای جز غیرچرخشی β_h و جز گردابی β_v است.

$$\beta = \phi + i\psi = \beta_h + \beta_v \quad (3)$$

$$\beta_h = \phi_h + i\psi_h; \quad \beta_v = \phi_v + i\psi_v \quad (4)$$

متغیر برداری سرعت \mathbf{u} به توابع پتانسیل و جریان با $(u, v) = (\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y) = (\partial\psi/\partial y, -\partial\psi/\partial x)$ مرتبط می‌گردد. جز گردابی عمود بر صفحه xy به صورت $\zeta = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ تعریف می‌شود. معادلات (۱) و (۲) به صورت زیر کاهش می‌یابند:

$$\nabla^2 \beta_h = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \psi_v = -\omega \quad (6)$$

با ارزیابی میدان گردابی:

$$D\omega/Dt = \nu \nabla^2 \omega \quad (7)$$

مشتق مادی در معادله بالا به صورت رابطه $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$ است که در هر t ، ω و ψ باید حل گردد و همین امر در فرمول‌بندی تابع جریان گردابی انتظار می‌رود. میدان گردابی در روش گردابه تصادفی^۵ از

محققان بر روی موضوعات مهمی در این زمینه از جمله مقاومت کلی در برابر حرکت کشتی، اثر پروفیل موج‌های تولیدی بر روی سطح بدنه کشتی، نواحی منتخب و با اهمیت جریان در نزدیک بدنه به ویژه انتهای آن برای تعیین پروفیل‌های سرعت، فشار جریان و ... تمرکز کرده‌اند و داده‌های آزمایشگاهی برای مدل INSEANC2340 ارائه شده است. در شکل (۲) مدل هندسه بدنه این کشتی آمده است. هندسه بدنه کشتی برای هر دو مدل INSEANC2340 و DTMB-5415 با استفاده از روش ابر نقاط در نرم‌افزار کتیا بر مبنای خطوط منحنی بدنه این مدل‌ها به صورت دسترسی آزاد قابل دریافت است.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

محور x در واقع محور افقی در صفحه سطح مقطع عرضی بدنه کشتی در سمت راست شکل (۱)، محور y نیز همان محور عمودی در این صفحه و محور z نیز محور افقی در راستای طولی کشتی در شکل (۱) است.

در این شبیه‌سازی از فرضیات تئوری جسم باریک و روش سطح آزاد با گردابه تصادفی^۱ استفاده شده است. این روش یک فرمول‌بندی لاگرانژی-اولری از مسائل سیال است که اثرات لزجت سیال و حرکات سطح آزاد را در بر می‌گیرد. این روش بسیار بسط داده شده است به طوری که قادر است تا حرکت جسم آزاد یا تحت اجبار در حرکت را با هر نوع جریان سیال حاکم از قبیل امواج تصادفی یا متوالی شبیه‌سازی نماید. این روش بر پایه فرمول‌بندی تابع جریان و میدان گردابه‌ای با شرط مرزی سطح آزاد غیرخطی استوار است که می‌تواند تقابلات غیرخطی موج را مدل نماید. این روش حل، میدان جریان را به دو جز غیرچرخشی^۲ و گردابی^۳ تفکیک می‌کند. این روش به صورت کدهای تعریف شده^۴ در نرم‌افزار فلونت قابل ورود است. تئوری جسم باریک کمتر به تقریب میدان اطراف جسم می‌پردازد. تقریب میدان جریان در نزدیکی دیواره بدنه کشتی قبلاً توسط یوانگ [۲۷] انجام شده است.

با فرض جریان دو بعدی، عبارت $\mathbf{u}(X, t) = (u, v)$ توصیفی اولری از حرکت سیال در نقطه $\mathbf{x} = (x, y)$ را بیان می‌نماید.

⁴ User Defined Function (UDF)

⁵ Random Vortex Method (RVM)

¹ Free-surface Random Vortex Method

² Irrotational

³ Vortical

۴- نتایج عددی

آلویسیو و فلیس^۵ [۳۰] مطالعه آزمایشگاهی بر روی میدان سرعت پیرامون بدنه یک مدل کشتی با دماغه شلجمی و تیرخن روی سطح بدنه آن انجام دادند که داده‌ها برای دو عدد فرود صفر و ۰/۱۳۸ اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری‌ها برای ۱۰ سیکل با زاویه چرخش رول اولیه ۱۰ درجه انجام شده است. از داده‌های این آزمایش برای اعتبارسنجی نتایج عددی این مقاله استفاده شده است.

در این بخش، شبیه‌سازی حرکت چرخش عرضی بدنه کشتی با سرعت پیشروی صفر با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. به این منظور، جریان در طول بدنه به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌گردد. با بکارگیری شبیه‌سازی عددی، نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده در سیکل زمانی مستهلک کننده حرکت چرخشی رول بدنه مدل کشتی، مقایسه و در شکل (۳) نشان داده شده است که تطابق بسیار عالی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد و در نتیجه، تئوری مورد استفاده و روش حل عددی را تایید می‌نماید. شبیه‌سازی عددی بر اساس شرایط یکسان با شرایط آزمایشگاهی انجام شده است. مدل کشتی در شبیه‌سازی با سرعت ثابت ۱/۰۳ متر در ثانیه با زاویه اولیه ۱۰ درجه برای بازه زمانی ۵ ثانیه پیش می‌رود به طوری که الگوی امواج سطحی تغییر نخواهد کرد. فرض کنیم در این لحظه مدل کشتی با زاویه ۱۰ درجه آزادانه شروع به نوسان می‌نماید، در این صورت زاویه چرخش بدنه کشتی در اثر گذر زمان بصورت آزمایشگاهی و عددی در شکل (۴) مقایسه شده است.

زمان پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی به ویژه برای سه سیکل نخست نوسان، تطابق بسیار خوبی دارد. به این ترتیب نتایج شبیه‌سازی عددی در دو حالت حضور و عدم حضور سرعت پیشروی کشتی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی داشت. در شکل (۵)، چهار مدل یکسان ولی با ابعاد مختلف تیرخن بر اساس مدل‌های ارائه شده در آزمایشگاه اینسین که به کمک نرم‌افزار Catia مدل شده است، به نمایش در آمده است.

تجمیع اثر گردابه‌های تشکیل شده روی سطح بدنه کشتی برای ارضای شرط مرزی عدم لغزش به منظور تقریب استفاده می‌نماید.

$$\omega(x, t) = \sum_{i=1}^{N(t)} \Gamma_i f(x - x_i(t)) \quad (8)$$

پارامتر N تعداد گردابه‌ها برای هر گردش Γ_i و محل x_i را نشان می‌دهد. تابع از پیش تعیین شده f برای توصیف توزیع گردابی با اندازه محدود برای هر گردابه را توصیف می‌نماید.

معادله انتقال گردابی (۷) با کمک روش گام کسری^۱ حل عددی شده که شامل گام انتقال^۲ (۹) و گام انتشار^۳ (۱۰) در گام‌های نیمه عمر متوالی است [۲۹]. گام انتشار توسط الگوریتم حرکت تصادفی^۴ شبیه‌سازی می‌شود. گام انتقالی از الگوریتم تقابل چندقطبی^۵ از درجه $N \log N$ استفاده می‌نماید [۲۹].

$$\partial \omega / \partial t + (u \cdot \nabla) \omega = 0 \quad (9)$$

$$\partial \omega / \partial t = \nu \nabla^2 \omega \quad (10)$$

جز غیر چرخشی میدان جریان با استفاده از روش المان مرزی مختلط معین^۶ حل می‌شود. شرایط معادله $\beta_h = \phi_h + i\psi_h$ مطابق زیر است [۲۹].

$$Dz/Dt = w^*(z, t) \quad (11)$$

$$BC_f : D\phi_h/Dt = -D\phi_v/Dt - P/\rho + 0.5ww^* - gy \quad (12)$$

$$BC_b : \psi_h = -\psi_v + \dot{x}_b(t) \bar{y} - \dot{y}_b(t) \bar{x} - 0.5 \dot{\alpha} R_b^2 \quad (13)$$

$$BC_\Sigma : D\phi_h/Dt = -D\phi_v/Dt \quad (14)$$

سرعت مختلط $w = u - iv$ با علامت "*" نشان دهنده مزدوج مختلط^۷ سرعت بوده و $R_b^2 \equiv x_b^2 + y_b^2$ نیز است. در شرط مرزی بدنه کشتی (معادله (۱۳)) برای حالت کلی سه درجه آزادی با مرکز جسم $\bar{O} = (x_b(t), y_b(t))$ و زاویه رول $\alpha(t)$ ، را داریم.

مدهای انتقالی در کارکرد حاضر، صلب فرض شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در معادله (۱۲) تا (۱۴) برای حل معادلات انتگرالی کوشی در مورد β_h مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان برای حل عددی توابع ϕ_h یا ψ_h در مرز سیال به کار گرفته شوند.

⁵ Multi-pole Interaction

⁶ Complex Valued Boundary Element Method

⁷ Complex Conjugate

⁸ Aloisio & Felice

¹ Fractional Step Method

² Convection Step

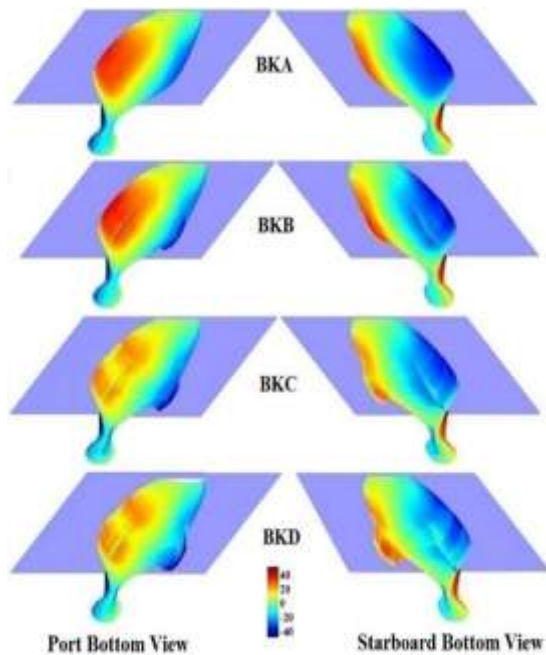
³ Diffusion Step

⁴ Random Walk

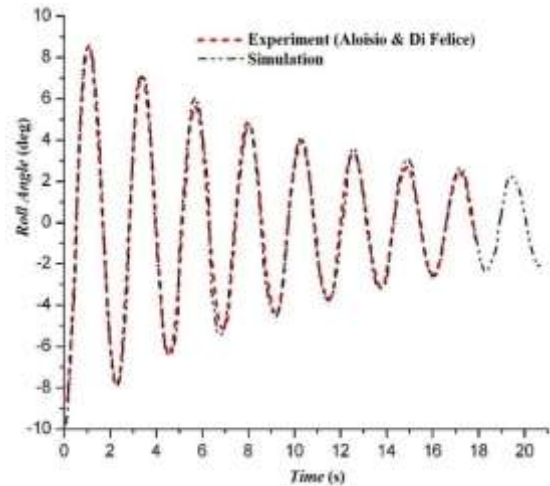
پهنای تیرخن در مدل BKB حدود ۶/۵ درصد از عرض مدل بدنه کشتی است. پهنای تیرخن در مدل های BKB و BKD به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر پهنای تیرخن در مدل BKB است. شکل (۶) پروفیل فشار هیدرودینامیک روی سطح بدنه کشتی در هفتمین نوسان در زاویه رول ۵- درجه را نمایش می دهد.

در این لحظه، کشتی به موقعیت عمودی باز می گردد. رنگ قرمز نشان دهنده فشار مثبت (بر حسب پاسکال) و رنگ آبی نشان دهنده فشار منفی است. توزیع فشار در شکل (۶) سمت چپ مربوط به سمت چپ کشتی و توزیع فشار داده شده در سمت راست این شکل نشان دهنده توزیع فشار در سمت راست کشتی است. با ترکیب این دو شکل، کل توزیع فشار روی سطح بدنه کشتی به دست می آید. با توجه به شکل، مشخص است که تغییرات فشار به صورت پیوسته صورت می پذیرد و هیچگونه گسستگی در توزیع فشار روی سطح بدنه کشتی وجود ندارد. روی سطح سمت چپ بدنه کشتی فشار مثبت و روی سطح سمت راست آن فشار منفی است. فشار بر سطح بدنه کشتی با افزایش سطح تیرخن کاهش می یابد.

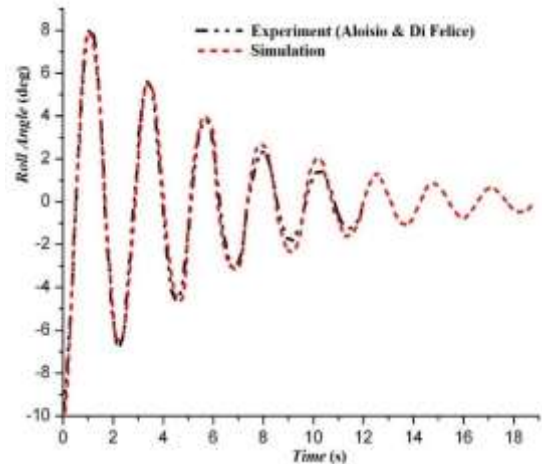
با توجه به شکل (۷)، توزیع فشار روی سطح تیرخن در جهت طولی بدنه کشتی λ برای کشتی ساکن (عدد فرود برابر صفر) و در حال نوسان چرخش عرضی تقریباً یکنواخت است.



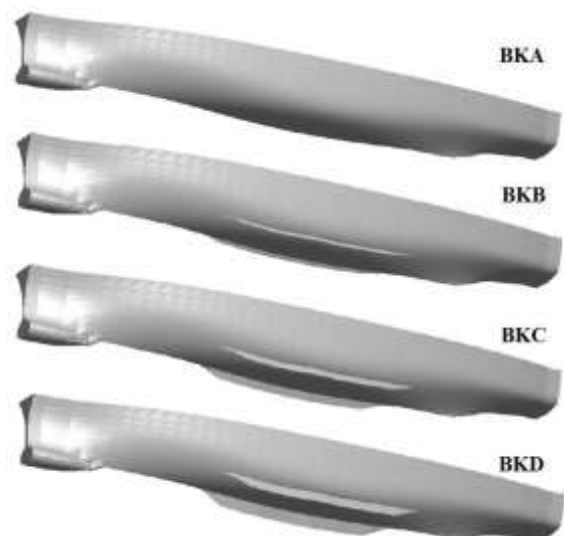
شکل (۶) مقایسه فشار هیدرودینامیکی روی سطح بدنه کشتی با ابعاد متفاوت تیرخن در هفتمین نوسان.



شکل (۳) سیکل زمانی زاویه چرخش عرضی به صورت آزمایشگاهی و حل عددی INSEAN C2340 در $Fr = 0$.

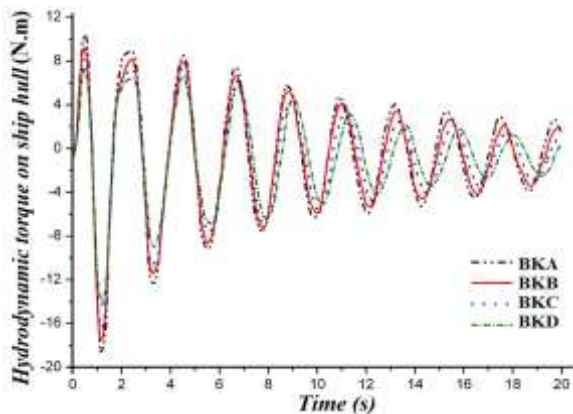


شکل (۴) سیکل زمانی زاویه چرخش عرضی به صورت آزمایشگاهی و حل عددی INSEAN C2340 در $Fr = 0.138$.

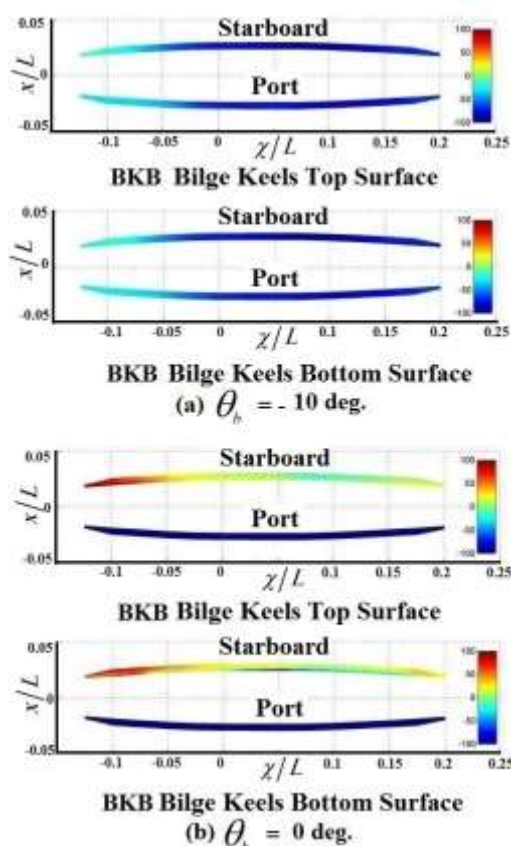


شکل (۵) هندسه مدل کشتی با ابعاد متفاوت تیرخن بر بدنه.

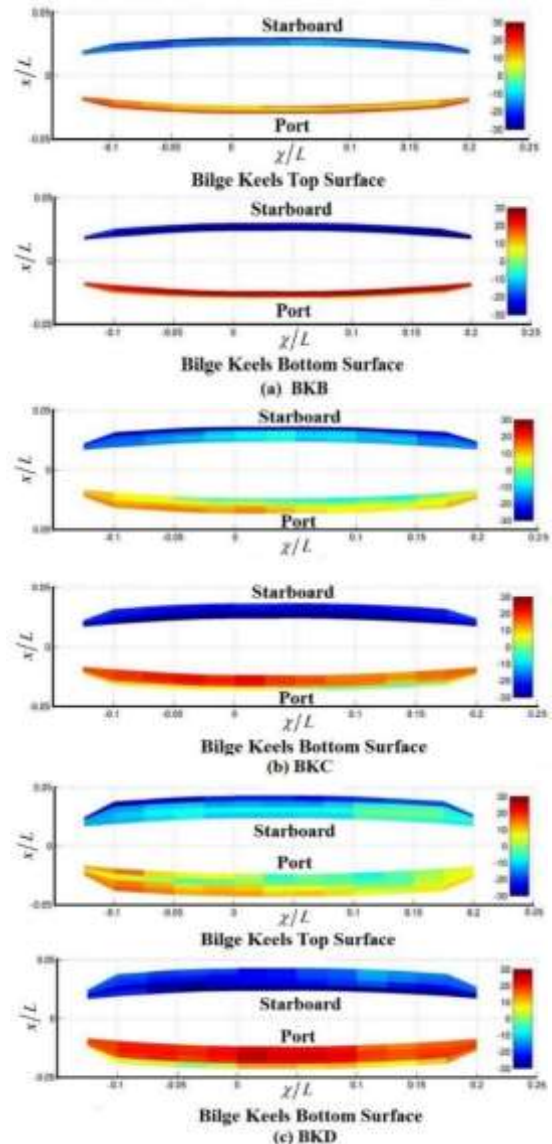
با توجه به شکل، فشار روی سطح تیرخن با افزایش سرعت کشتی، افزایش می‌یابد ولی اختلاف فشار بین سطح بالایی و پایینی تیرخن در حالتی که به علت سرعت پیشروی کشتی عدد فرود برابر 0.138 است، بسیار کمتر از این اختلاف در حالت سکون کشتی (شکل (۷)) عدد فرود برابر صفر است.



شکل (۸) مقایسه گشتاور هیدرودینامیکی روی سطح بدنه کشتی با ابعاد متفاوت تیرخن.



شکل (۹-۱) فشار هیدرودینامیکی روی سطح تیرخن در طرفین بدنه کشتی در ربع نوسان نخست از نمای بالا و پایین.



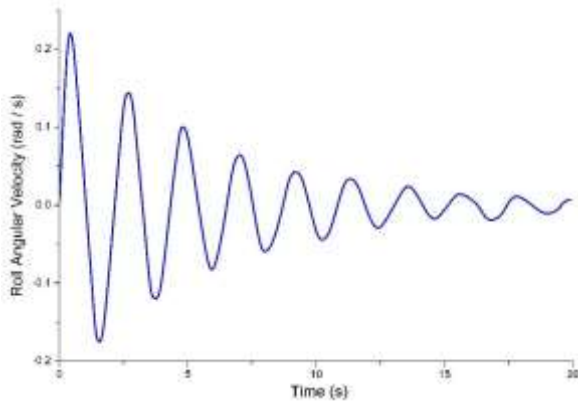
شکل (۷) مقایسه فشار هیدرودینامیکی بر سطح تیرخن روی بدنه کشتی در هفتمین نوسان

با انتگرال‌گیری از فشار هیدرودینامیکی روی سطح بدنه کشتی، گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی بر روی سطح بدنه کشتی محاسبه می‌گردد (شکل (۸)). با توجه به شکل قابل تشخیص است که با افزایش ابعاد تیرخن، گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به بدنه کشتی کاهش می‌یابد. شکل (۹) فشار هیدرودینامیکی روی سطح تیرخن موجود بر بدنه کشتی را در حالت $Fr = 0.138$ در طرفین چپ Port و راست Starboard نمایش می‌دهد. فشار در جهت طولی x/L به دلیل وجود سرعت پیشروی کشتی متغیر است، در حالی که توزیع فشار روی سطح تیرخن در جهت طولی بدنه کشتی z/L برای حالت سکون کشتی در حال نوسان چرخش عرضی تقریباً یکنواخت بود (شکل (۷)).

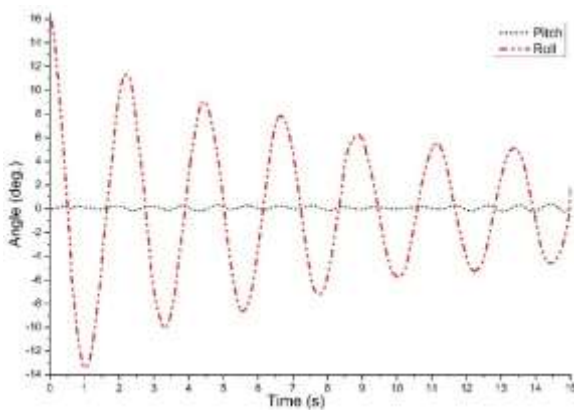
به همین دلیل با افزایش سرعت پیشروی کشتی، گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به بدنه کشتی، کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت پیشروی کشتی (بزرگ‌تر شدن عدد فرود) دامنه نوسانات زاویه چرخش عرضی کاهش می‌یابد. در شکل (۱۰) سرعت زاویه‌ای مربوط به حرکت چرخش عرضی برای مدت زمان ۲۰ ثانیه در عدد فرود برابر با 0.138 ترسیم شده است. در شکل (۱۱) حرکت چرخش عرضی و حرکت Pitch کشتی با یکدیگر در یک بازه زمانی مشترک ۱۵ ثانیه‌ای مقایسه شده است که بزرگ‌تر بودن محسوس دامنه نوسان حرکت چرخش عرضی را نشان می‌دهد.

۵- نتایج

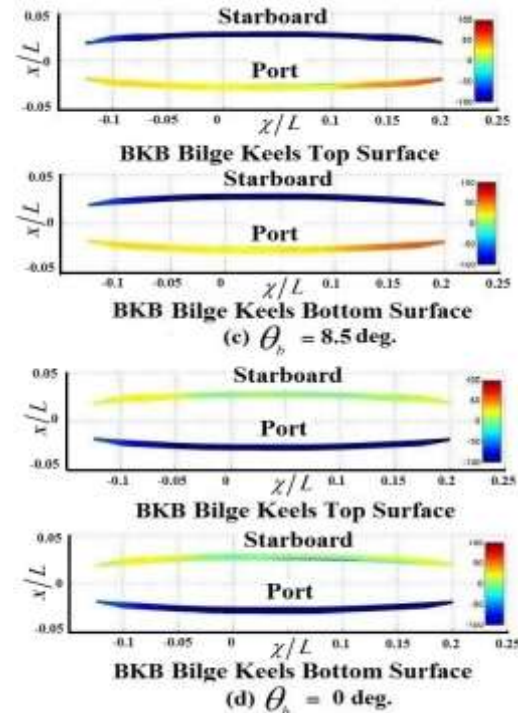
در این مقاله، شبیه‌سازی حرکت نوسانی چرخش عرضی کشتی در حضور و عدم حضور سرعت پیشروی آن با ابعاد مختلف تیرخن انجام شد.



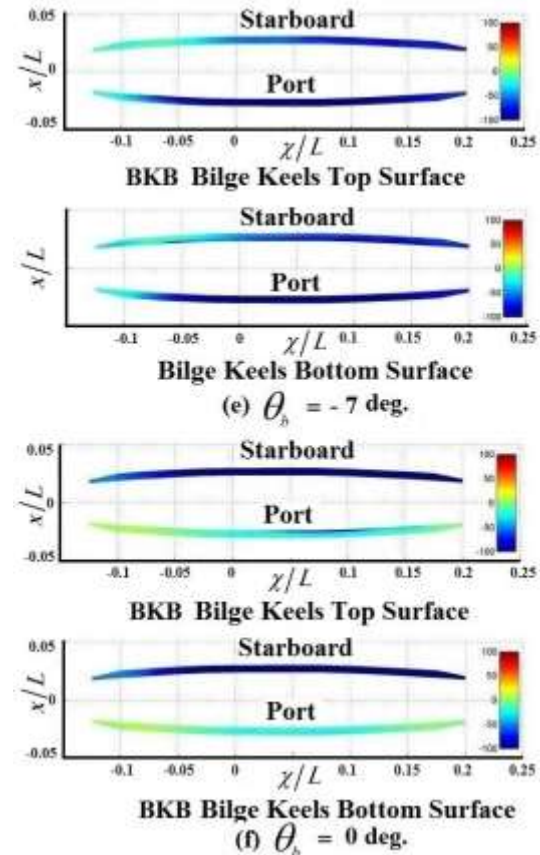
شکل (۱۰) سرعت زاویه‌ای مربوط به حرکت چرخش عرضی بر حسب زمان.



شکل (۱۱) مقایسه حرکت چرخش عرضی و حرکت Pitch کشتی.



شکل (۹-۲) فشار هیدرودینامیکی روی سطح تیرخن در طرفین کشتی در نوسان اول پس از ربع نوسان نخست از نمای بالا و پایین.



شکل (۹-۳) فشار هیدرودینامیکی روی سطح تیرخن در طرفین کشتی در نوسان دوم از نمای بالا و پایین.

y راستای افقی عرضی (m)

زیرنویس

i نقاط محور افقی عرضی

v جز گردابی

h جز غیر چرخشی

۷- مراجع

- [1] Rhee, S.H., Stern, F. "Unsteady RANS Method for Surface Ship Boundary Layer and Wake and Wake Field", Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol.37, pp.44, 2001.
- [2] Li, T., Matusiak, J., Lehtimaki, R. "Numerical Simulation of Viscous Flows with Free Surface Around Realistic Hull Forms with Transom", Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol.37, pp.601, 2000.
- [3] Hirt, C.W., Nichols, B.D. "Volume of Fluid Method for the Dynamics of free Boundaries", J. Comp. Phys., Vol.39, pp.201, 1981.
- [4] Osher, S., Sethian, J. "Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms based on Hamilton Jacobi Formulations", J. Comp. Phys., Vol.79, pp.12, 1988.
- [5] Harlow, F.H., Welch, E.J. "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flows of Fluid with Free Surface", Phys. Fluids, Vol.8, pp.2182, 1965.
- [6] Brocchini, M., Peregrine, D.H., "The Dynamics of Strong Turbulence at Free Surfaces Part 1: Description", J. Fluid Mech., Vol.449, pp.225, 2001.
- [7] Patankar, S.V., Spalding, D.B. "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", Int. J. Heat Mass Trans., Vol.15, pp.1787, 1972.
- [8] Launder, B.E. Spalding, D.B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Comp. Methods App. Mech. Eng., Vol.3, pp.269, 1974.
- [9] Hess, J.L. "Panel Methods in Computational Fluid Dynamics", Annual Review of Fluid Mechanics, No.22, pp.255-274, 1990.
- [10] Hess, J.L. Smith, A.M.O. "Calculation of Nonlinear Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies", Journal of Ship Research, Vol.8, No.2, pp.22-44, 1964.
- [11] Larsson, L. Broberg, L. Kim, K.J. Zhang, D.H. "New Viscous and Inviscid CFD Techniques for Ship Flow, Fifth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics", Hiroshima, Japan, pp.1-25, 1989.
- [12] Dawson, C.W. "A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems", Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, CA, pp.30-38, 1977.

شبیه‌سازی عددی بر مبنای پارامترهای منتخب روش عددی مناسب و توابع افزوده شده بر مبنای معادلات اضافی، نتایج بسیار نزدیکی را با داده‌های آزمایشگاهی تولید نمود.

پس از اعتبارسنجی موفق مدل، مش‌بندی و حلگر، مدل بدنه کشتی با چهار اندازه مختلف برای تیرخن مورد مطالعه قرار گرفت. فشار بر سطح بدنه کشتی با افزایش سطح تیرخن کاهش یافته و گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به سطح بدنه کشتی نیز کاهش می‌یابد.

توزیع فشار روی سطح تیرخن در جهت طولی بدنه کشتی χ برای کشتی ساکن و در حال نوسان چرخش عرضی تقریباً یکنواخت بوده و با افزایش سطح تیرخن، فشار اعمالی به آن افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت کشتی، فشار روی سطح تیرخن افزایش می‌یابد ولی اختلاف فشار بین سطح بالایی و پایینی تیرخن، کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت پیشروی کشتی، گشتاور هیدرودینامیکی اعمالی به سطح بدنه کشتی و در نتیجه، دامنه نوسانات زاویه چرخش عرضی آن کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

α	زاویه رول (deg)
β	تابع پتانسیل مختلط (بدون بعد)
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
ν	لزجت سینماتیکی ($m^2.s^{-1}$)
χ	راستای افقی طولی (m)
Γ	گردش (بدون بعد)
ω	چرخش (بدون بعد)
ϕ	تابع پتانسیل (بدون بعد)
ψ	تابع جریان (بدون بعد)
BC_b	مرز سطح بدنه کشتی
BC_f	مرز سطح آزاد
BC_Σ	مرز میدان دوردست
g	شتاب گرانش ($m.s^{-2}$)
P	فشار ($kg.s^{-2}.m^{-1}$)
t	زمان (S)
u	سرعت سیال در جهت x ($m.s^{-1}$)
v	سرعت سیال در جهت y ($m.s^{-1}$)
w	سرعت مختلط ($m.s^{-1}$)
x	راستای عمودی عرضی (m)

- [27] Yeung, R. Roddier, W. Alessandrini, D. R. Gentaz, L. and Liao, S.W. "On Roll Hydrodynamics of Cylinders Fitted with Bilge Keels", Proceedings of the 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, 2000.
- [28] Einstein, A. "Investigation on the Theory of Brownian Movement, Courier Dover Publications", New York, 1956.
- [29] Yeung, R.W. "Fluid Dynamics of Finned Bodies - from VIV to FPSO", Plenary Paper, Proceedings of the 12th International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Vol.3, pp.1-11, 2002.
- [30] Aloisio, G. Felice, F. "PIV Analysis Around the Bilge Keel of a Ship Model in Free Roll Decay", XIV Congresso Nazionale AI VE. LA., Rome, Italy, November, 2006.
- [13] Burg, C.O. Marcum, D.L. "Moving Towards High-Fidelity RANS Calculations Of Maneuvering Surface Vessels Using Unstructured Grids", 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea, 2003.
- [14] Li, T. "Computations of Turbulent Free-Surface Flows Around Modern Ships", Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol.43, pp.407-430, 2003.
- [15] Hirt, C.W. Nichols, B.D. "Volume-of-Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries", J. Comput. Phys., Vol.39, pp.201-221, 1981.
- [16] Sussman, M. Smekherda, P. Osher, S.J. "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow", J. Comput. Phys., Vol.114, pp.146-159, 1994.
- [17] Chen, Y.J. Chau, S.W. Kouh, J.S. "Application of Two-Phase Fluid Approach for free surface ship flow simulation", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.25, No.2, pp.179-188, 2002.
- [18] Rhee, S. Skinner, C. "Unstructured Grid Based Navier-Stokes Solver for Free-Surface Flow Around Surface Ships", Proceedings of the Workshop on CFD Ship Hydrodynamics, pp.504-509, Tokyo, Japan, 2005.
- [19] Yeung, R. Vaidhyanathan, M. "Highly Separated Flows Near a Free Surface", Proc. Intl Conf. on Hydrodynamics, Wuxi, China, 1994.
- [20] Di Mascio, A. Broglia, R. Muscari, R. "On the Application of the Single-Phase Level Set Method to Naval Hydrodynamic Flows", Computers and Fluids, Vol.36, pp.868-886, 2007.
- [21] Carrica, P. Wilson, R. Noack, R. Stern, F. "Ship Motions Using Single-Phase Level Set with Dynamic Overset Grids", Computers and Fluids, Vol.36, pp.1415-1433, 2007.
- [22] Zhou, Y.H. Ning, M.A. Xun, S. Zhang, C. "Direct Calculation Method of Roll Damping based on Three-Dimensional CFD Approach", Journal of Hydrodynamics, Ser.B, Vol.27, No.2, pp.176-186, 2015.
- [23] Veer, R. Schut, X.B. Huijismans, R. "Bilge Keel Loads and Hull Pressures Created by Bilge Keels Fitted to a Rotating Cylinder", Applied Ocean Research, Vol.53, pp.1-14, 2015.
- [24] Martins, R. Rodrigues, H. Neves, L. Silva, P. "Failure Analysis of Bilge Keels and its Design Improvement", Engineering Failure Analysis, Vol.27, pp.232-249, 2013.
- [25] Irkal, M. Nallayarasu, S. Bhattacharyya, S. "CFD Approach to Roll Damping of Ship with Bilge Keel with Experimental Validation", Applied Ocean Research, Vol.55, pp.1-17, 2016.
- [26] Avalos, G. Wanderley, J. Fernandes, A. Oliveira, A. "Roll Damping Decay of a FPSO with Bilge Keel", Ocean Engineering, Vol.87, pp.111-120, 2014.