

شبیه سازی عددی جریان سیال داخل یک کانال بدون انتقال حرارت در اثر امواج دریایی

به کمک نرم افزار FLUENT

محمد موفقی^۱، محمدرضا عباسی^{*}

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

چکیده

راکتورهای کوچک ماژولار و یا SMRS^۱، به نوعی از راکتورهای هسته ای می گویند که دارای توان کمتر از ۴۰۰ مگاوات می باشند. کلمه ی ماژولار به سیستم تولید بخار هسته ای^۲ باز می گردد. زمانی که این سیستم با سیستم تبدیل توان یا سیستم فراوری تولید حرارت همراه می شود، می تواند مقدار انرژی دلخواه کاربر را در هر زمانی تولید کند به دلیل توان و حجم کوچک این راکتورها، می توان آن ها در بخش های مختلف صنعت به کار برد. استفاده از راکتورهای SMR در سازه های مستقر در زمین، دریا و فضا با یکدیگر متفاوت است و کاربرد هر راکتور در هر بخشی از صنعت مستلزم طراحی های مخصوص ترموهیدرولیکی و نوترونیکی خاص آن شرایط می باشد. راکتورهای SMR مستقر در دریا^۳ و یا مورد استفاده در پیشران کشتی ها به دلیل امواج متعدد وارد شده از سمت آب دریا و یا شتاب گرفتن ناگهانی کشتی و یا به دلیل نیازمندی به افزایش توان و یا سرعت، دائماً در حال تحمل نوسانات امواج می باشند. این نوسانات باعث وارد شدن نیرو به بدنه، ایجاد تغییر جهت در کشتی های دریایی و در نتیجه ایجاد حرکت های چرخش حول محورهای مختلف، بالا پایین رفتن کشتی و ... می شوند. این حرکت ها، حرکت در راستای محورهای مختصات X, Y, Z ، حرکت حول محورهای مختصات X, Y, Z می باشد که به ترتیب به آن ها Rolling, Heaving, Swaying, Surging, Pitching, Yawing می گویند. در این پژوهش با مدلسازی حرکت های Rolling و Heaving توسط نرم افزار FLUENT به تحلیل و بررسی تغییرات ترموهیدرولیکی یک راکتور SMR دریا پایه پرداخته شده است. با اعمال شتاب از طریق اضافه کردن یک ترم نیرو به معادله ی مومنوم در دامنه های نوسان متفاوت به این نتیجه دست یافتیم که با افزایش دامنه ی نوسانات در حرکت های Rolling و Heaving، نرخ دبی جرمی خروجی، افت فشار سیال خنک کننده عبوری از قلب و سرعت سیال خروجی همگی دچار نوسانات بیشتری می شوند و تغییرات بزرگ تری را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: SMR، ترموهیدرولیک، راکتورهای دریا پایه، حرکت های Rolling و Heaving

۱- مقدمه

تأمین نیروی پیشران کشتی ها و کاهش آلودگی محیط از گازهای ناشی از احتراق سوخت های فسیلی می باشد. استفاده از پیشران های هسته ای در کشتی ها

راکتورهای SMR به دو بخش زمین پایه و دریا پایه تقسیم می شوند که بیانگر کاربرد آن ها در دریا و زمین است. علت استفاده از راکتور ها در دریا برای

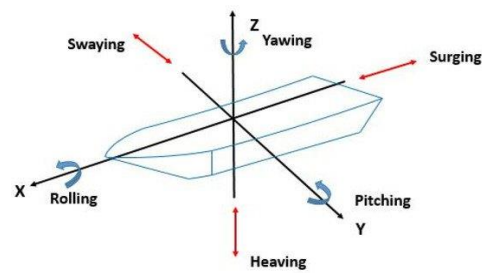
و Knolls اقدام به ساخت و تست های مختلفی بر روی نمونه های شبیه سازی شده برای بررسی اثرات چرخشی بر روی پارامتر های ترموهیدرولیکی از قبیل تغییرات شار حرارتی بحرانی CHF^4 ، تغییرات نقطه ی جوش سیال در حالت گردش سیال اجباری و یا گردش سیال طبیعی توسط دانشمندان مختلف صورت گرفت. پذیرش طرح های مربوط به راکتورهای قدرت دریایی و تحقیقات مرتبط بر روی آن ها به سال ۱۹۶۰ میلادی بر می گردد (Arnold, Gall et al. 1966).

همچنین تحقیقات مربوطه ثابت کرده است که نیروگاه های هسته ای شناور دارای مزایای شناخته شده ی مهم بسیار زیادی از جمله دسترسی بسیار زیاد به خنک کننده، ایمنی بسیار بالا، آسیب پذیر نبودن از حوادثی مانند زلزله و سونامی می باشند (Babu and Reddy 1978). از پیشگامان تحلیل بر روی اثرات Rolling و Heaving می توان به بررسی تأثیر پدیده ی Heaving بر روی ترموهیدرولیک راکتور و تأثیر بر روی شار حرارتی بحرانی توسط Isshiki (1966) اشاره کرد. سپس Otsuji و همکارانش (Otsuji and Kurosawa 1982) به بررسی تأثیر نوسانات وارده بر روی شار حرارتی بحرانی در حین انتقال حرارت هدایتی و جوشش در راکتور پرداختند که به وسیله آزمایش های مختلف و با جابه جایی عمودی بر روی یک سری کانال حرارتی با خنک کننده ی R113 توانستند رابطه ای برای شار حرارتی بحرانی و تغییرات آن در راستای عمودی به دست بیاورند و ثابت کنند که شار حرارتی بحرانی به وسیله ی نوسانات عمودی کانال حرارتی کاهش می یابد. تحقیقات بسیار زیاد صورت گرفته در بحث بررسی تأثیر حرکت های Rolling و یا Heaving بیشتر بر روی راکتورهایی با مکانیزم گردش طبیعی سیال صورت گرفته است اما نمونه هایی برای سیال اجباری نیز می توان مشاهده کرد. Ishida و همکارانش (Ishida, Kusunoki et al. 1990) در سال ۱۹۹۰ دست به توسعه ی کد RETRAN-02 به منظور تحلیل ترموهیدرولیکی عملکرد یک راکتور در شرایط حرکات نوسانی و تغییر جهت دادن یک راکتور هسته ای زدند و نتایج بسیار ارزنده ای پیرامون تغییرات ترموهیدرولیک یک راکتور و CHF به دست آوردند.

امروزه یکی از موضوعات مهم به شمار می رود. در ابتدا تحقیقات بر روی نیروی پیشرانده های هسته ای در ایالات متحده در سال ۱۹۴۰ انجام شد و باعث به دست آمدن نتایج مهمی در زمینه توسعه صنعت هسته ای گردید. از آغاز سال ۱۹۵۵ و راه اندازی زیردریایی USS Natilius و کشتی های هسته ای نیروی دریایی ایالات متحده و جمع آوری تجربه ی عملیاتی از چندین راکتور در سراسر جهان، نشان داده شد که با استفاده از فناوری مؤثر و مفید، نیروی پیشرانده هسته ای می تواند یک ره آورد ایمن و قابل اطمینان باشد. نیروی دریایی هسته ای ایالات متحده پس از بررسی های بسیار راکتورها به یک توان قابل اعتماد برای به کارگیری ایمن پیشرانده های هسته ای نائل آمد. همچنین پس از آن تعدادی آزمایشگاه اتمی پیشرفته در ایالات متحده مانند آزمایشگاه اتمی Betis و Knolls بر روی ادامه ی توسعه دادن فناوری پیشرانده های هسته ای آغاز به فعالیت کار کردند (Alam, Kumar et al. 2019). از انواع موجود و ساخته شده ی پیشرانده های دریایی می توان به زیردریایی، ناو هواپیمابر، رزم ناو، امکان سنج های عمیق دریایی، یخ شکن ها و کشتی های تجاری اشاره کرد. راکتورهای پیشرفته ی دریایی به طور کلی تحت تأثیر تغییرات ناگهانی شتاب چه به دلیل امواج دریا و چه به دلیل افزایش ناگهانی توان و یا تغییر جهت حرکت راکتور قرار می گیرند. برای یک کشتی و یا سازه ی دریایی می توان ۶ نوع جابه جایی در دریا در نظر گرفت. درواقع یک کشتی با ۶ درجه ی آزادی می تواند حرکات مختلفی را انجام دهد. این حرکات، حرکت در راستای محورهای مختصات X, Y, Z و حرکت چرخشی حول محورهای مختصات X, Y, Z می باشند که به ترتیب به آن ها Swaying, Surging, Heaving, Rolling, Pitching, Yawing می گویند و در شکل ۱ نیز به خوبی می توان آن را مشاهده نمود. در این پژوهش به بررسی تأثیر حرکت های Heaving و Rolling روی ترموهیدرولیک قلب یک راکتور پیشرانده دریایی خواهیم پرداخت.

پیش از ساخت یک پیشرانده و به طور کلی پیش از ساخت هر نوع راکتوری لازم است یک مدل شبیه و نزدیک به قلب راکتور ساخته و در آزمایشگاه های پیشرفته تست شود لذا در ابتدا آزمایشگاه های Betis

ICEM CFD و ... شبکه بندی شده و سپس به نرم افزار های حل گر CFD منتقل می شوند. در یک دهه گذشته، کد های CFD تجاری برای راکتورهای نیروگاه های هسته ای قدرت در ابعاد واقعی و با هدف آزمایش پدیده های ترموهیدرولیکی مانند تزریق جریان (سیال) به جهت ایمنی به درون مسیر بازگشتی^۶ (Kwon, Yun et al. 2003) به کار رفته است. همچنین Jeong, Park et al. (2008) توزیع جریان درون مسیر بازگشتی نیروگاه هسته ای قدرت استاندارد کره جنوبی را به وسیله کد تجاری STAR-CD تحلیل کردند. آن ها از ابعاد واقعی راکتور استفاده کردند که نتایج آن ها توانست تصویر بسیار واضحی از توزیع جریان درون مخزن راکتور را به نمایش بگذارد و نگرانی های پیرامون بحث ایمنی را کاهش دهد. همچنین Yan و همکارانش (Yan, Zhang et al. 2012) به بررسی تأثیر حرکت های Rolling بر روی توزیع جریان سیال در ورودی قلب یک راکتور با گردش جریان اجباری پرداختند و مشاهدات مختلفی را از طریق شبیه سازی و استفاده از کد تجاری CFX به دست آوردند. در چین نیز Cai و همکارانش (Cai, Yue et al. 2016) دست به توسعه کد ترموهیدرولیکی به نام SACROM زدند و اعتبارسنجی کد نوشته شده را از طریق شبیه سازی به وسیله ی اعمال مومنتوم بر روی کد تجاری CFX انجام دادند و توانستند به نتایج دقیقی دست پیدا کنند. در آخرین فعالیت های انجام شده نیز Wei و همکارانش (Wei, Pan et al. 2019) به مطالعه ی عددی بر روی یک کلنال با گردش طبیعی سیال در یک مدار بسته و در حالت تک فاز، از طریق کوپل کردن نرم افزار FLUENT و نرم افزار RELAP5 برای شرایط جلیه جایی کشتی در دریا پرداختند. آن ها به نوعی از یک تئوری ایجاد اختلال در یک بخش از سیستم و مشاهده ی تأثیر گذاری آن در کل سیستم استفاده کردند و با وارد کردن آشفتگی^۷ در یک کانال، تغییرات فشار را از FLUENT دریافت و سپس مجدد به RELAP5 وارد می کردند و مجدداً دما و دبی جرمی را از RELAP5 دریافت و به FLUENT وارد می کردند و توانستند پدیده ی شتاب های مختلف وارده



شکل ۱- نام گذاری حرکت های ممکن برای یک کشتی

با پیشرفته تر شدن تجهیزات محاسباتی در دنیا، امکان شبیه سازی و تحلیل مسائل مختلف به روش های عددی نسبت به قبل فراهم تر شده است. بعضی از کد های ترموهیدرولیکی هسته ای مانند کبرا و پارکس، قادر به شبیه سازی کامل یک راکتور در حالت دوران نبودند ولی بعضی از کد های دیگر همانند کد RELAP 5 می توانند در شرایط جفت شدن با کد های مختلف و یا به تنهایی در بعضی از نسخه ها مسائل را تحلیل کنند. با توجه به اینکه کد های ترموهیدرولیکی هسته ای که قادر به شبیه سازی مسائل اعمال نیرو و شتاب به سازه باشند در انحصار چند کشور خاص می باشند، لذا کشورهای مختلف برای شبیه سازی اقدام به توسعه کد های بومی و یا استفاده به همراه تغییرات در کد هایی که روش حل آن ها استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۸ CFD نمودند. روش های حل CFD در سالیان دور به سرعت توسعه داده شد و کاربردهای فراوانی در رشته های مهندسی هسته ای، مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، مهندسی هوافضا، مهندسی انرژی و ... دارد و به دلیل دقت بالا محبوبیت بالایی دارد اما هیچ روشی بدون مشکل نیست.

بزرگ ترین ایراد روش CFD هزینه ی محاسباتی بالا و نیازمندی به دستگاه های شبیه سازی توانمند می باشد که امروزه با پیشرفت علم کامپیوتر این مشکل بسیار کمتر شده است. نرم افزار های مختلفی بر پایه CFD وجود دارند که از جمله ی آن ها می توان به کد های محاسباتی همچون آباکوس، FLUENT، CFX، اوپن فوم، STAR-CD، FLOW 3D و ... نام برد. در این کد ها ابتدا هندسه توسط یک نرم افزار طراحی مانند solidworks، catia و ... طراحی و سپس توسط کد های مخصوص شبکه بندی مانند gambit،

روش CFD بر پایه ی محاسبه ی این ۲ مقدار می باشد:

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته k

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته ε

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \overline{u_{i,j}' u_{i,j}'} \quad (2)$$

۲-۲- مدل فیزیکی و معادلات مربوط

کد CFD استفاده شده برای شبیه سازی مورد نظر ما، کد FLUENT می باشد. این کد با استفاده از حل معادلات نویر استوکس و استفاده از قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتوم مسائل را با دقت بالایی با استفاده از شبکه بندی و به وسیله ی روش حجم محدود حل می کند.

برای اعمال Rolling در نرم افزار FLUENT روش های مختلفی وجود دارد. مرسوم ترین این راه ها استفاده از روش دینامیک مش یا مش متحرک به همراه ماژول ۶ درجه آزادی^۹ می باشد که می تواند نتایج خوب و کاملاً دقیق برای یک هندسه با شرایط دیواره بدون انتقال حرارت در دور تا دور هندسه اعمال کند؛ اما به دلیل اینکه قلب یک راکتور دارای سطوح ورودی و خروجی سیال می باشد، نمی توان از این روش استفاده کرد؛ زیرا یک سطح در عین حال که باید نقش ورودی و خروجی را بازی کند نمی تواند همزمان هم در نقش دیواره بدون انتقال حرارت باشد و هم در نقش سطوح مرزی یا interface واقع شود.

روش دوم که از آن بهره گرفته می شود، استفاده از روش ناحیه دورانی و مش دورانی^{۱۰} بود. این روش در تحلیل هندسه های در حال دوران مانند توربین و یا فن ها بسیار پرکاربرد است. لذا با نوشتن کدی و تنظیم دوران به صورت سینوسی حول یک محور به بررسی نتایج حاصل پرداختیم و به دلیل ضعیف بودن نتایج این روش نیز کنار گذاشته شد.

روش سوم اعمال شتاب به هندسه از طریق معادله مومنتوم بود. ما به وسیله ی کد نویسی تحت عنوان UDF و یا ((توابع تعریف شده توسط کاربر^{۱۱})) حرکتی سینوسی حول محور Z و در راستای محور Z را به هندسه اعمال کردیم و مشاهده شد که نتایج از دقت لازم برخوردار است.

به معادلات بقا را به خوبی پیاده سازی کنند.

در مقله حاضر برخلاف Wei و همکارانش که به مدل سازی گردش طبیعی پرداختند، شبیه سازی یک کلنال به هنگام مواجه شدن با امواج دریا که منجر به حرکت Rolling و Heaving می گردند در گردش اجباری سیال دنبال می شود. در ضمن جریان نیز آشفته و بدون انتقال حرارت فرض می شود. با تعریف نیروهای اعمال شده ناشی از چرخش به کد FLUENT مدل سازی صورت می گیرد.

۲- انتخاب روش حل در دینامیک سیالات

محاسباتی

۲-۱- انتخاب مدل آشفتگی مناسب

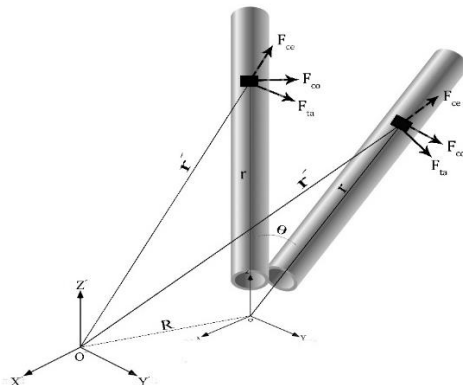
واضح است که مدل های آشفتگی تنوع مختلفی دارند. مدل های K-e و K-w برای بسیاری از مسائل نتایج نزدیک و خوبی را ارائه می دهند. این مدل ها خود نیز برای حل شدن به روش عددی تنوع فراوانی دارند. برای مثال Chun و همکارانش در سال ۲۰۰۴ (Chun et al, 2004) طی گزارشی به این نتیجه رسیده بودند که مدل RSM با وجود هزینه ی بسیار بالای محاسباتی، دقت بی نظیری در تحلیل مسائلی با هندسه های پیچیده دارد. همچنین Rohde و همکارانش (Rohde et al, 2007) برای محاسبات مربوط به تست های مرتبط با راکتور VVER توانستند ثابت کنند که مدل استاندارد K-e با همراه معادله دیواره ی نامتعادل^۸ و مدل RSM با معادلات دیواره ی استاندارد بهترین نتایج را در تحلیل این راکتور از خود نشان داده اند.

به طور کلی مدل کا-اِپسیلون معروف ترین و پرکاربردترین مدل آشفتگی ۲ معادله ای می باشد. به دلیل فهم آسان این معادله و دقت مناسب، در بسیاری از کد نویسی ها و یا استفاده از کد های CFD کاربرد دارد. این مدل خود به ۳ نوع زیر مدل تقسیم می شود:

Standard K-e
Realizable K-e
RNG K-e

در مدل کا-اِپسیلون و تمامی مدل های آشفتگی موجود، میدان آشفته برحسب ۲ متغیر بیان می شود (در اینجا از بیان کلیت معادلات به دلیل گسترده بودن صرف نظر می کنیم) که می توان گفت اساس حل در

شکل ۲ می توان نیرو های وارد بر هندسه در یک حرکت دورانی در فضا را به طور واضح مشاهده کرد.



شکل ۲- نیرو های وارد شده بر سیال در یک حرکت دورانی

از آنجا که جهت شتاب و نیرو همواره در یک راستا می باشند لذا شتاب های وارد به هندسه نیز در راستای نیرو های رسم شده در شکل ۲ می باشند. برای یک هندسه ی دورانی، می توان دو نوع دستگاه مختصات لخت و غیر لخت را در نظر گرفت. به طور کلی دستگاه مختصات لخت حالتی است که در آن دستگاه مختصات دارای شتاب نمی باشد و به آن دستگاه مختصات ثابت نیز می گویند. اما دستگاه مختصات غیر لخت حالتی است که در پان دستگاه مختصات دارای شتاب می باشند و به آن دستگاه مختصات چرخان نیز می گویند. در بعضی موارد ممکن است که این دو دستگاه مختصات بر روی هم منطبق باشند که در این صورت بردار مکان ذره همواره r خواهد بود اما اگر بخواهیم تغییرات را در دستگاه مختصات ثابت وارد کنیم لازم است که بردار تبدیلی برای پارامتر های موجود در نظر بگیریم و لذا بردار مکان ذره توسط ماتریس تبدیلات موجود در رابطه ی ۴ و ۵ در صورتی که همزمان با حرکت دورانی حرکت انتقالی نداشته باشیم به صورت زیر به r' تغییر خواهد کرد.

$$r' = R(\theta_x)R(\theta_y)R(\theta_z)r \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

پیش تر گفته شد بر اثر شتاب گیری ناگهانی کشتی و یا ضربات ناگهانی وارده از امواج دریا، کشتی حرکت هایی مانند بالا و پایین رفتن، حرکت رو به جلو به صورت متمایل، چرخش حول محور ها و ... خواهد شد. در این تحقیق به بررسی دو نوع حرکت برای یک کشتی پرداخته ایم که در ادامه هر یک را به تفصیل توضیح خواهیم داد.

۲-۲-۱- مدل سازی نوسانات ناشی از Heaving و یا بالا پائین رفتن تناوبی

حرکت Heave یا بالا و پایین رفتن به جلوه جایی در راستای محور z ها می گویند. هنگامی که یک سازه بر روی دریا بر اثر نیرو های خارجی وارده از سمت امواج دریا دچار تغییرات میگردد، سبب اثر گذاری بر روی شتاب گرانش می شود که می توان با اضافه کردن یک ترم نیرو در معادله ی مومنتوم بر طبق رابطه ی ۳ این تغییرات را پیاده سازی کرد.

$$\vec{a}_{ad} = - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -A_0 \left(\frac{2\pi t}{T_0} \right)^2 \sin \left(\frac{2\pi t}{T_0} \right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

اگر جا به جایی کشتی را حول مبدا مختصات به صورت یک حرکت رفت و برگشتی شبیه سازی کنیم آنگاه می توان از یک ترم سینوسی وابسته به زمان برای شبیه سازی استفاده کرد. در معادله ی فوق A_0 بیانگر میزان جا به جایی کشتی در راستای محور عمودی بر حسب متر، T_0 بیانگر پریود یا دوره تناوب زاویه ای حرکت بر حسب ثانیه و t بیانگر زمان و بر حسب ثانیه می باشد.

۲-۲-۲- مدل سازی حرکت Rolling یا دوران محوری

حرکت Rolling یا پیچش به حرکت دورانی حول محور x ها می گویند. برای شبیه سازی حرکت Rolling در حالت فضایی ما ۳ شتاب را می توانیم برای یک جسم صلب که حول یک محور در حال دوران است در نظر بگیریم. این ۳ شتاب؛ شتاب های مماسی، عمودی و شتاب کوریولیس^{۱۲} می باشند که به ترتیب با نمادهای a_{co} ، a_{ce} و a_{ta} نمایش داده می شوند. در

اگر بخواهیم سرعت نسبی جسم را در هر لحظه بدست بیاوریم با توجه به رابطه ی ۶ داریم:

$$v_f = V + v_r + \omega \times r' \quad (6)$$

که در آن v_f بیانگر سرعت نسبی در دستگاه مختصات ساکن، V سرعت مربوط به حرکت انتقالی، v_r سرعت هندسه در دستگاه مختصات چرخان و $\omega \times r'$ سرعت در هنگام دوران حول یک محور می باشد. از آنجایی که ترم شتاب نتیجه ی مشتق گیری از ترم سرعت می باشد، لذا برای تعیین شتاب های وارده می توان رابطه ی ۷ را در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dv_f}{dt}\right)_{fixed} &= \left(\frac{dV}{dt}\right)_{fixed} \\ &+ \left(\frac{dv_r}{dt}\right)_{fixed} \\ &+ \dot{\omega} \times r' \\ &+ \omega \times \left(\frac{dr'}{dt}\right)_{fixed} \end{aligned} \quad (7)$$

در نهایت شتاب وارده بر کشتی در هنگام انجام حرکت های دورانی در صورت عدم وجود حرکت انتقالی به طور کلی بر اساس رابطه ی ۸ تعریف می شود. در رابطه ی ۸، مقادیر ω ، ε به ترتیب بیانگر سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای می باشند و از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می شوند. در رابطه ی ۸ همچنین v سرعت سیال و r بردار مکان در هر لحظه می باشد که لازم است به وسیله ی ماتریس تبدیلات در دستگاه مختصات ساکن نوشته بشوند. همه ی روابط مربوط به حرکت Rolling در صفحه ی YZ و حول محور X بیان شده است. همچنین ما در اینجا دستگاه مختصات مرجع و دستگاه مختصات دورانی را بر روی یک مبدا در نظر گرفته ایم لذا داریم:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{ad} &= -(\vec{a}_{ta} + \vec{a}_{ce} + \vec{a}_{co}) \\ &= -[\vec{\varepsilon} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2\vec{\omega} \times \vec{v}] \end{aligned} \quad (8)$$

یک کشتی در حین انجام حرکت Rolling می تواند با دامنه ثابت و یا متغیر، به صورت منظم یا نامنظم، با توجه به شتاب های ناگهانی وارده از سمت

دریا و ... دوران کند. زاویه ی θ بیانگر موقعیت کشتی در هر لحظه بر حسب زمان نسبت به محور Z می باشد که به صورت سینوسی تغییر می کند و رابطه ی ۹ بیانگر تغییرات مربوط به زاویه θ با زمان می باشد. همچنین در این رابطه θ_0 نیز به عنوان بیشینه مقدار زاویه ی (دامنه) Rolling در نظر گرفته می شود. در روابط ۹ و ۱۰ و عبارت i' بیانگر بردار یکه در راستای x' می باشد.

$$\vec{\theta}(t) = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) \vec{i}' \quad (9)$$

$$\vec{\omega}(t) = \theta_0 \left(\frac{2\pi}{T_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) \vec{i}' \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{\varepsilon}(t) \\ = -\theta_0 \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) \vec{i}' \end{aligned} \quad (11)$$

در هنگام وارد شدن شتاب، زمانی که کشتی از زاویه ی صفر نسبت به محور Z خارج می شود، مقدار شتاب گرانش وارد شده به سیال نیز دائماً در حال تغییر می باشد؛ زیرا با تغییر مرکز ثقل کشتی در هنگام دوران، بلید تغییرات نیروی گرانش را نیز علاوه بر شتاب های وارد شده بر سیال لحاظ کنیم. از این رو با کمی جست و جو در مباحث دینامیک حرکتی اجسام صلب می توان به رابطه ی ۱۲ برای تغییرات شتاب گرانش رسید. در هنگام اعمال حرکت Rolling، به دلیل دوران کشتی به صورت نوسانی حول محور X، میزان تغییرات شتاب گرانش فقط در صفحه ی YZ اعمال می شود. لذا ما فقط در راستای Y و Z تغییرات شتاب گرانش را داریم.

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ g \cdot \sin\left[\theta_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right)\right] \\ -g \cdot \cos\left[\theta_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right)\right] \end{pmatrix} \quad (12)$$

۳-۲- تغییرات معادله ی مومنتوم

به طور کلی ۳ قانون پایستگی جرم، انرژی و مومنتوم در یک مسئله ترموهیدرولیکی باید برقرار باشد. در هنگام وارد شدن شتاب های ذکر شده به کشتی، معادله ی مومنتوم دچار تغییراتی می شود. برای نمایش شتاب های وارده، باید از طریق نوشتن کد UDF و

با اعمال نیرو به معادله ی مومنتوم افت فشار ناشی از گرانش به دلیل تغییرات نیروی گرانش دچار تغییر خواهد شد و همچنین افت فشار ناشی از اصطکاک که از رابطه ی دارسی ویسباخ بدست آمده است نیز به دلیل تغییرات مکرر ضریب دارسی دائما در حال تغییر می باشد.

در رابطه ی ۱۵ عبارت $\sin \theta$ بیانگر زاویه ی میان بردار عمود بر صفحه ی XY و محور Z می باشد که می توان به وسیله ی آن تغییرات z_1 و z_2 را بدست آورد. در رابطه ی ۱۶ عبارت L بیانگر طول کانال، D_e بیانگر قطر هیدرولیکی و f بیانگر ضریب دارسی می باشد. ضریب دارسی در حرکات نوسانی دچار تغییراتی می شود که به صورت زیر بدست می آید:

$$f_{dynamic} = f_{static} - \frac{32.76 L \sqrt{\mu} \omega_m^2}{u^2 \sqrt{\frac{2\pi}{T_0}} \rho} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) \quad (19)$$

که در اینجا f_{static} از طریق دیاگرام مودی و یا رابطه ی زیر برای جریان های آرام و آشفته بدست می آید:

برای جریان آرام:

$$f_{static} = \frac{64}{Re} \quad (20)$$

برای جریان آشفته:

$$f_{static} = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (21)$$

جهت محاسبه تغییرات ضریب دارسی و به دلیل محاسبه تغییرات افت فشار اصطکاکی توسط نرم افزار تنها جمله دوم در رابطه ۱۹ یعنی جمله منفی سمت راست رابطه را پس از تبدیل واحد به سمت راست معادله مومنتوم اضافه می گردد.

۳- هندسه و المان بندی و روش حل مسئله

هندسه ی مورد تحلیل یک لوله به ارتفاع ۰.۵ متر و قطر ۲۰ سانتی متر می باشد که سیال یا آب با دبی جرمی مشخصی درون آن جریان دارد. ابعاد هندسه جوری در نظر گرفته شده است که پس چند ثانیه شاهد یک جریان کاملا توسعه یافته باشیم. شبکه بندی (المان بندی) انجام شده در این مسئله نیز توسط نرم

ضرب کردن ترم های شتاب گرانش و شتاب کلی در چگالی، می توان به رابطه ی ۱۳ رسید.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه ی فوق مقدار F می تواند هر نیروی تأثیرگذار بر روی معادله ی مومنتوم باشد و در اینجا نیز معادله مومنتوم متأثر از شتاب می باشد. با توجه به رابطه ی ۱۳، می توان در نظر گرفت که نیروهای بسیار مهم و تأثیرگذار بر این گونه مسائل، وابستگی فراوانی به چگالی سیال، فشار، ویسکوزیته دینامیکی و سرعت سیال دارند. رابطه ی ۱۴ به صورت کامل تر می تواند ترم تنش و ترم نیرو در رابطه ی ۱۳ را تشریح کند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \cdot [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right) + \rho \vec{g} + \rho \vec{a}_{ad} \end{aligned} \quad (14)$$

۲-۴- تغییرات فشار سیال

فشار سیال در حالت پایدار و یا گذرا در صورتی که نیروی خارجی به معادله ی مومنتوم اعمال نشود دارای یک مقدار ثابت می باشد. پس از اعمال نیروی خارجی در معادلات مومنتوم تمامی پارامتر های ورودی نیز دست خوش تغییر خواهند شد.

افت فشار در یک سیستم را می توان ناشی از ۴ نوع افت فشار دانست که عبارتند از: افت فشار ناشی از گرانش، افت فشار ناشی از اصطکاک، افت فشار ناشی از شتاب، افت فشار ناشی از تغییرات نگرانی سطح مقطع سیال. روابط ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب بیانگر این افت فشار ها در سیستم می باشند.

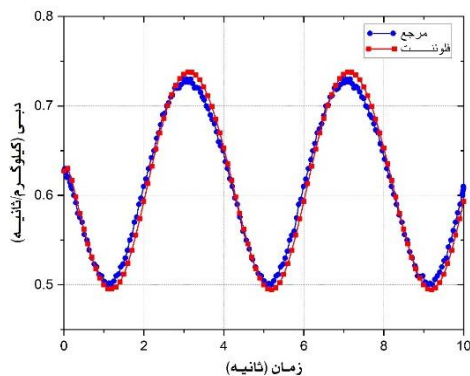
$$\Delta p_{el} = \int_{z_1}^{z_2} \rho g \sin \theta dl \quad (15)$$

$$\Delta p_f = f \frac{L}{D_e} \frac{\rho V^2}{2} \quad (16)$$

$$\Delta p_a = \int_{V_1}^{V_2} \rho V dV \quad (17)$$

$$\Delta p_a = \varepsilon \frac{\rho V^2}{2} \quad (18)$$

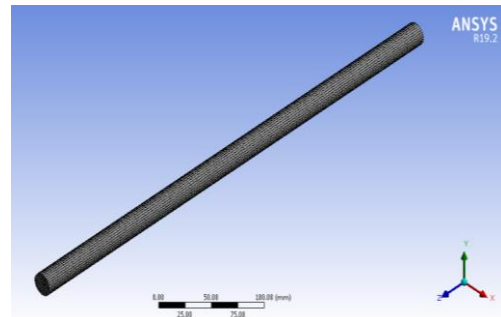
داده های مرجع می باشد. در این مثال، میزان جابه جایی عمودی لوله ۱ متر و دوره ی تناوب ۴ ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود با تغییر شتاب سیال مقدار دبی جرمی بصورت سینوسی تغییر می کند شکل ۴ نشان دهنده ی تغییرات دبی جرمی سیال در هر لحظه در حرکت Heaving می باشد. همچنین اعتبار سنجی با مقادیر مرجع برای حرکت Rolling نیز بررسی گردید و نتایج آن در شکل ۵ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۴، حرکت Rolling برای دامنه نوسانات ۱۰ درجه و دوره ی تناوب ۴ ثانیه با مقادیر مرجع مقایسه شد. این شبیه سازی نیز نشان داد روش حل انتخاب شده برای حل مسئله توسط کد FLUENT کاملاً درست می باشد.



شکل ۴- اعتبار سنجی انجام شده برای حرکت Heaving بین کد FLUENT و مقادیر مرجع

با توجه به شکل ۴، نتایج حاصل از مقایسه ی دو روش دارای اختلاف کمی می باشند که این اختلاف ناشی از؛ جداول خواص سیال و المان های سوختی، خطاهای جزئی طراحی، ساده سازی های مختلف، نوع حلگر، معادلات آشفتگی مختلف، تفاوت در تعداد المان بندی و تعداد تقسیمات گام های زمانی می باشد. با تمامی این موارد، اختلاف نتایج حاصل از دقت مناسب و قابل قبولی برخوردار است و اثبات می کند که روش حل استفاده شده جوابگو می باشد. لذا می توان به این نتیجه رسید که اعمال شتاب از طریق اضافه کردن جمله نیروی خارجی به معادله ی مومنوم در کد FLUENT می تواند روشی مناسب برای شبیه سازی نوسانات پیشران ها و یا راکتورهای هسته ای شناور در دریا باشد.

افزار ANSYS Meshing صورت گرفته است و متشکل از حدود پانصد هزار سلول و از نوع بی سازمان می باشد. هندسه مسئله و نوع شبکه بندی آن در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳- نمایی از هندسه و المان بندی مربوطه

در ابتدای کار به منظور صحت سنجی از شبیه سازی انجام شده نیازمند مثالی برای تطابق نتایج می باشیم. Xing و همکارانش (Xing, Yan et al., 2014) در پژوهش خود تاثیر حرکت Rolling بر جریان سیال را با ساده سازی معادلات و تبدیل آن به معادله ۱۸ برای محاسبه دبی جرمی، شبیه سازی نمودند.

$$\begin{aligned} a \frac{dw_{rel}}{dt} &= \Delta P_{dr}(1 - \zeta w_{rel}^2) \\ &+ \Delta P_{osc} \end{aligned} \quad (18)$$

بنابراین در این مقاله ابتدا با استفاده از روش رانجی-کوتا و نوشتن برنامه ای در محیط Matlab این معادله حل شد و شبیه سازی حرکت های Rolling و Heaving صورت گرفت. سپس با نوشتن یک کد UDF و الحاق آن به نرم افزار FLUENT یک کد دینامیکی که قادر به حل معادلات دیفرانسیلی مربوط به قوانین بقا و شبیه سازی حرکت های Rolling و Heaving باشد، طراحی گردید.

۴- نتایج و محاسبات

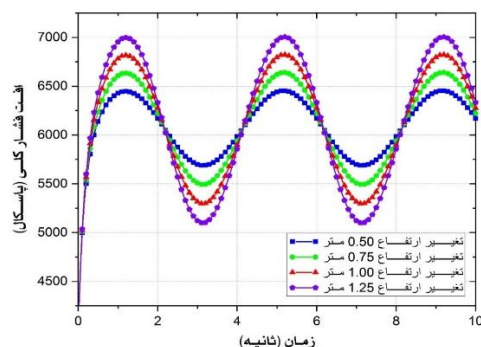
۴-۱- اعتبار سنجی روش

نتیجه ی حاصل از اعتبار سنجی و مقایسه دو روش را می توان در شکل های ۴ و ۵ به وضوح مشاهده کرد که باعث اطمینان از دقت نتایج محاسبه شده توسط FLUENT و کد نوشته شده و درست بودن شبیه سازی و دقت بالای داده های خروجی نسبت به

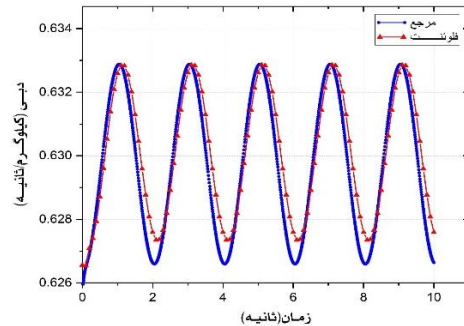
۲-۴- شبیه سازی حرکت Heaving با تغییر

پارامترهای نوسان

پس از اطمینان از اعتبار سنجی انجام شده، اکنون می توان به شبیه سازی های انجام شده برای حرکت های Heaving و Rolling توسط کد FLUENT اعتماد داشت. در ابتدا به سراغ بررسی نتایج حرکت Heaving می رویم. برای این نوع از حرکت، شبیه سازی در چهار حالت مختلف از جابه جایی یعنی جا به جایی ۰.۵، ۰.۷۵، ۱ و ۱.۲۵ متر با دوره تناوب نوسان ۴ ثانیه انجام شده است و در شکل های ۷ و ۸ می توان به ترتیب تغییرات افت فشار کلی و سرعت سیال را مشاهده کرد. به دلیل ثابت فرض شدن چگالی، تغییرات سرعت و دبی جرمی ورودی با سرعت و دبی جرمی خروجی صفر می باشد بنابراین سرعت سیال در هنگام ورود و خروج یکسان است و تغییرات آن مشابه تغییرات دبی می باشد. با توجه به شکل های ۷ و ۸ می توان نتیجه گرفت که هرچه میزان جابجایی لوله یا دامنه نوسان بیشتر باشد، انتظار می رود که میزان افت فشار بیشتر باشد. بنابراین تغییرات فشار سیال برای جا به جایی ۱.۲۵ متر از همه حالات ها بیشتر و برای جابه جایی ۰.۵ متر از همه کمتر می باشد. همچنین تغییرات سرعت حول مقدار ثابت ۲ (متر/ ثانیه) می توان مشاهده کرد.

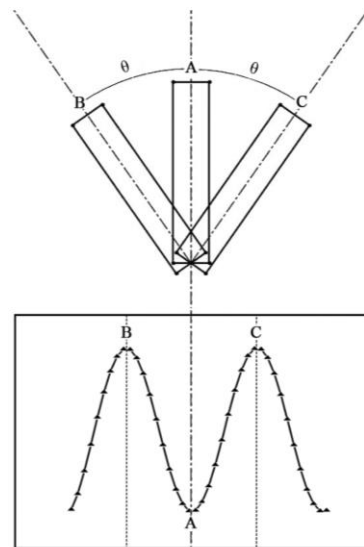


شکل ۷- تغییرات افت فشار سیستم در هنگام حرکت Heaving در ارتفاع های مختلف



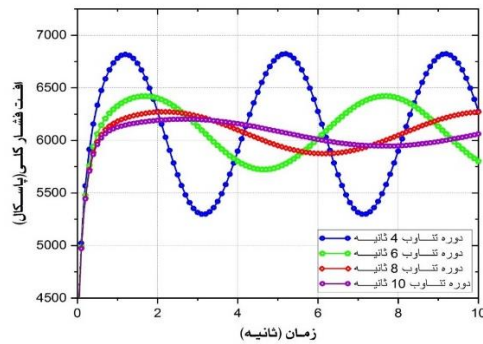
شکل ۸- اعتبار سنجی انجام شده برای حرکت Rolling بین کد FLUENT و مقادیر مرجع

در شکل ۵ می توان مشاهده کرد که دبی خروجی در حرکت Rolling دارای ۲ قله می باشد. برای درک بهتر این مسئله می توان شکل ۶ را مشاهده کرد.

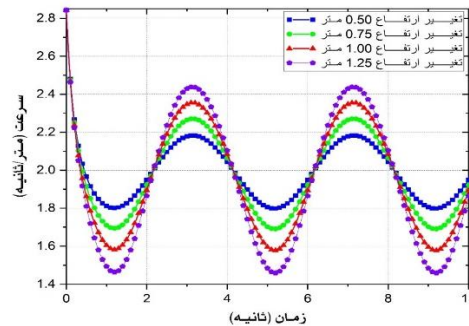


شکل ۶- تغییرات دبی جرمی با توجه به موقعیت میله در حرکت Rolling

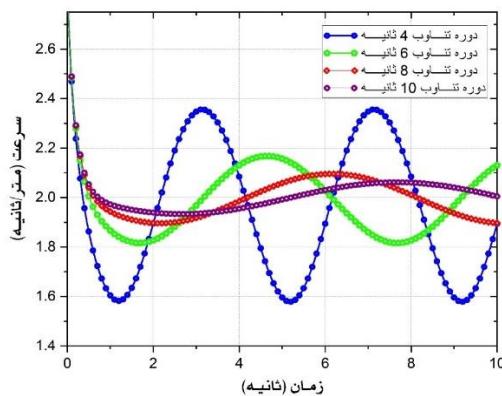
در شکل ۶ تغییرات دبی جرمی سیال منطبق بر موقعیت لوله رسم شده است. در واقع لوله زمانی که از حالت سکون (نقطه ی A) شروع به انجام حرکت Rolling میکند و پس از θ درجه دوران از نقطه ی B باز می گردد و پس از 2θ درجه دوران به نقطه ی C می رسد. در نقاط B و C در واقع ما بیشترین دبی خروجی را داریم که از نظر فیزیک مسئله نیز قابل قبول است. زیرا زمانی که هندسه به سمتی منحرف بشود، با توجه به کاهش اثر گرانش باید دبی خروجی افزایش یابد. پس در شکل ۶ سه نقطه ی مینیمم موجود بیانگر موقعیت میله در حالت سکون (نقطه ی A) و دو نقطه ی ماکسیمم موجود بیانگر موقعیت میله در انتهای دوران (نقاط B و C) می باشد.



شکل ۹- تغییرات افت فشار سیستم در هنگام حرکت Heaving در دوره تناوب های مختلف



شکل ۸- تغییرات سرعت سیال در هنگام حرکت Heaving با ارتفاع های مختلف



شکل ۱۰- تغییرات سرعت سیال در هنگام حرکت Heaving در دوره تناوب های مختلف

۴-۳- شبیه سازی حرکت Rolling با تغییر

پارامترهای نوسان

شکل ۵ نشان دهنده ی دقت بالای اعتبار سنجی انجام شده برای حرکت Rolling بین شبیه سازی صورت گرفته توسط کد FLUENT و مقادیر مرجع می باشد. برای حرکت Rolling تغییرات در چهار دامنه ی نوسان مختلف یعنی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و در دوره تناوب ۴ ثانیه بررسی شده است و تغییرات مقادیر افت فشار کلی و سرعت صورت گرفته است و مقایسه ی آن ها به ترتیب در شکل های ۱۱، ۱۲ آورده شده است. بررسی ها نشان می دهد مقدار نوسانات افت فشار کلی و سرعت با افزایش دامنه ی نوسانات بیشتر می شود و می توان نتیجه گرفت که هرچه دامنه ی امواج وارده بیشتر باشد، تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی نیز بیشتر می گردد.

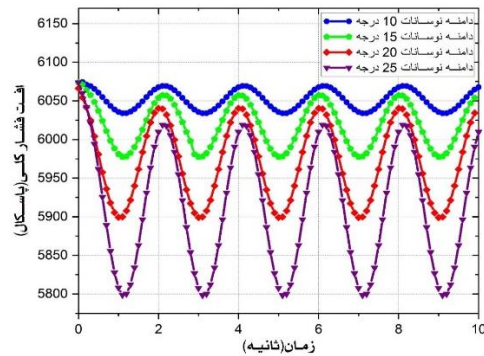
از عواملی که تأثیرگذاری زیادی بر روی ترموهیدرولیک یک راکتور پیش‌رانه دارد می‌توان به شدت آشفتگی و طول آشفتگی سیال اشاره کرد. شدت آشفتگی و طول آشفتگی سیال با توجه به روابط مربوطه ترموهیدرولیکی موجود در منابع محاسبه می‌شوند اما در این میان شدت آشفتگی به تنهایی تأثیرپذیری خاصی از دامنه‌ی نوسانات دارد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این پژوهش تماماً در حالت تک فاز و فشار ۱۶ مگا پاسکال می‌باشند. حال اثرگذاری این امر زمانی بسیار مهم می‌شود که فشار کاری یک راکتور کمتر از ۱۰ مگا پاسکال باشد و یا نوع راکتور از نوع آب جوشان باشد. به دلیل وجود حالت دوفازی، آشفتگی سیال نیز بیشتر خواهد شد. زیرا با تغییرات دامنه‌ی نوسان، می‌توان اثرگذاری بسیار مهمی بر روی ترم شار حرارتی و سایر پارامترهای دخیل در بحث ترموهیدرولیک راکتور را مشاهده کرد که از منظر ایمنی برای یک راکتور هسته‌ای اهمیت به خصوصی دارد. شکل های ۹ و ۱۰ نشان دهنده ی تأثیرگذاری دوره تناوب های مختلف در حرکت سینوسی بر روی افت فشار سیستم و سرعت می باشد. با افزایش مقدار دوره ی تناوب و یا کاهش فرکانس نوسانات، تغییرات موجود بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی آرام تر می شود و هر چه دوره تناوب کوتاهتر شود، شدت نوسانات افزایش می یابد. همان گونه که از شکل های ۹ و ۱۰ مشاهده می شود، تغییرات حول مقدار حالت پایدارکمیت ها برای هر یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی می باشد.

همچنین تاثیر تغییرات دوره تناوب امواج وارده در هنگام حرکت Rolling نیز در این مقاله بررسی گردید. شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب بیانگر مقایسه ی تغییرات دوره تناوب در مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ثانیه در دامنه ی نوسانات ۱۰ درجه می باشد. با توجه به نتایج حاصله می توان به وضوح مشاهده کرد که هرچه دوره ی تناوب امواج بزرگتر باشد، شدت نوسانات کمتر خواهد بود. بنابراین می توان گفت در این شبیه سازی، بدترین وضعیت ممکن در هنگام حرکت Rolling برای دامنه ی نوسانات ۲۵ درجه و دوره تناوب ۴ ثانیه می باشد. پس در هنگامی که امواج وارده از سمت امواج دریا سریع تر رخ دهد، راکتور دچار نوسانات شدیدتری می شود.

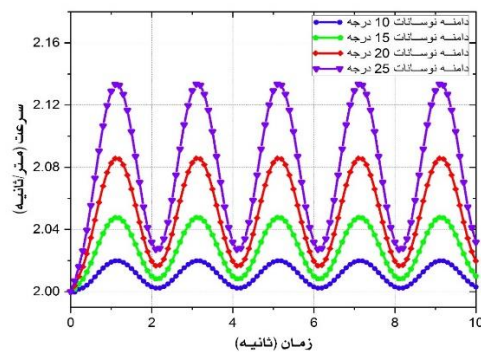
۴-۴- شبیه سازی حرکت Rolling در فشار

کاری مختلف

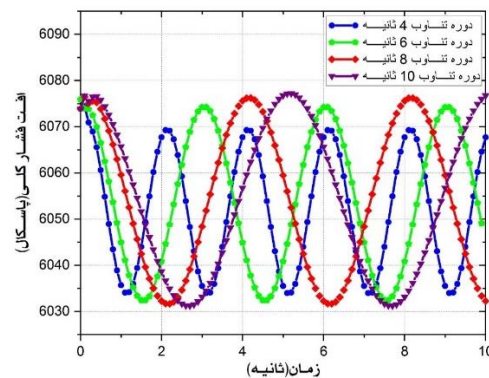
به منظور بررسی تاثیر فشار کاری سیستم بر روی نوسانات ناشی از امواج وارده و بررسی تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی، حرکت های دریایی در فشارهای کاری ۱۶ مگاپاسکال و ۰.۱ مگاپاسکال برای دبی جرمی مقایسه گردید. شکل ۱۵ بیانگر مقدار نرمالیزه شده ی دبی جرمی برای ۲ فشار کاری مختلف می باشد. همانطور که مشاهده می شود، در زمانی که فشار کاری سیستم پایین می باشد، میزان نوسانات پارامترهای ترموهیدرولیکی در هنگام حرکت Rolling بیشتر از نوسانات در فشارهای کاری بالا می باشد. یکی از مهمترین دلایل این تغییرات را می توان مربوط به خواص سیال و تفاوت در دانسیته ی سیال دانست. نکته ی دیگر تفاوت مقادیر دبی می باشد. فشارهای کاری مختلف، در صورت عدم تغییر سایر شرایط، باعث تغییر مقدار دبی جرمی نیز می گردد. لذا می توان نتیجه گرفت که تاثیر نوسانات در فشارهای کاری بالا، به نسبت کمتری قابل ملاحظه می باشد.



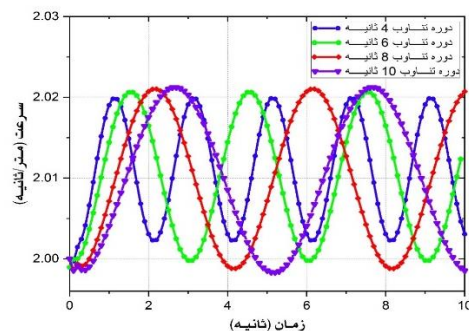
شکل ۱۱- تغییرات افت فشار سیستم در هنگام حرکت Rolling در دامنه نوسانات مختلف



شکل ۱۲- تغییرات سرعت سیال در هنگام حرکت Rolling در دامنه نوسانات مختلف



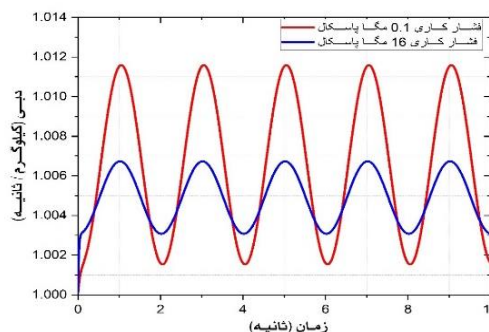
شکل ۱۳- تغییرات افت فشار سیستم در هنگام حرکت Rolling در دوره تناوب های مختلف



شکل ۱۴- تغییرات سرعت سیال در هنگام حرکت Rolling در دوره تناوب های مختلف

۵- منابع

- Alam, S. B., D. Kumar, B. Almutairi, P. K. Bhowmik, C. Goodwin and G. T. Parks (2019). "Small modular reactor core design for civil marine propulsion using micro-heterogeneous duplex fuel. Part I: Assembly-level analysis." *Nuclear Engineering and Design* **346**: 157-175.
- Arnold, H. G., W. R. Gall and G. Morris (1966). "Feasibility of offshore dual-purpose nuclear power and desalination plants." *Nuclear Engineering and Design* **4**(3): 311-321.
- Babu, P. T. and D. Reddy (1978). "Existing methodologies in the design and analysis of offshore floating nuclear power plants." *Nuclear Engineering and Design* **48**(1): 167-205.
- Cai, R., N. Yue, R. Chen, W. Tian, G. Su and S. Qiu (2016). "Development of a thermal-hydraulic subchannel analysis code for motion conditions." *Progress in Nuclear Energy* **93**: 165-176.
- Ishida, I., T. Kusunoki, H. Murata, T. Yokomura, M. Kobayashi and H. Nariai (1990). "Thermal-hydraulic behavior of a marine reactor during oscillations." *Nuclear engineering and design* **120**(2-3): 213-225.
- Isshiki, N. (1966). "Effects of heaving and listing upon thermo-hydraulic performance and critical heat flux of water-cooled marine reactors." *Nuclear engineering and Design* **4**(2): 138-162.
- Jeong, J. H., J. P. Park and B. S. Han (2008). "Head Loss Coefficient Evaluation Based on CFD Analysis for PWR Downcomer and Lower Plenum." *Heat Transfer Engineering* **29**(8): 677-684.
- Kwon, T.-S., B.-J. Yun, D.-J. Euh, I.-C. Chu and C.-H. Song (2003). "Multidimensional mixing behavior of steam-water flow in a downcomer annulus during LBLOCA reflood phase with a direct vessel injection mode." *Nuclear technology* **143**(1): 57-64.
- Otsuji, T. and A. Kurosawa (1982). "Critical heat flux of forced convection boiling in an oscillating acceleration field—I. General trends." *Nuclear Engineering and Design* **71**(1): 15-26.
- Wei, L., L.-M. Pan, H. He, D.-W. Yuan, J.-J. Xu, D.-C. Xing and Y.-P. Huang (2019). "Numerical study on single-phase flow of natural circulation under ocean condition using coupled relap5 system code and fluent code." *Nuclear Engineering and Design* **343**: 138-150.
- Xing, D., C. Yan and L. Sun (2014). "Flow fluctuation behaviors of single-phase forced circulation under rolling conditions." *Ocean engineering* **82**: 115-122.



شکل ۱۵- مقادیر نرمالیزه شده ی دبی در فشار های کاری مختلف برای حرکت Rolling

۵- نتیجه گیری

روش دینامیک سیالات محاسباتی که از مدت‌ها قبل ایجاد شده بود با توجه به معادلات و گستردگی‌های فراوان، می‌تواند برای مسائل مختلف به کار گرفته شود. کدهای مختلف CFD قابلیت شبیه‌سازی‌های مختلف را دارا می‌باشند و معمولاً تمامی روش‌ها و معادلات مختلف برای شبیه‌سازی را در بر می‌گیرند. در این پژوهش توجه به اثرگذاری شتاب‌ها، تغییرات ناگهانی سرعت و توان، بررسی تأثیر امواج و ضربات وارده به بدنه ی کشتی و به هم زدن کشتی از حالت تعادل و ... به منظور افزایش ایمنی راکتورهای دریایی اهمیت بسیار زیادی دارد. پارامترهای ترموهیدرولیکی مختلفی مانند عدد ناسلت، شار حرارتی بحرانی، افت فشارها، تغییرات دمای خروجی سیال خنک‌کننده ی و ... همگی تحت تأثیر نیروی خارجی وارده می‌باشند و قطعاً دچار تغییرات فراوان می‌شوند.

از شبیه سازی عددی می‌توان نتیجه گرفت نوسانات جریان سیال هنگامی قابل توجه است که هد پمپ کم باشد در غیر این صورت باید آنرا در محاسبات پارامترهای ترموهیدرولیکی لحاظ کرد. در ضمن شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد نوسانات افت فشار در کانال دارای تغییرات مطابق با پریود حرکات چرخشی کشتی بوده لیکن به صورت سینوسی نمی‌باشد. مضافاً دامنه نوسانات تغییرات فشار داخل کانال با افزایش دامنه پریود چرخش کشتی افزایش می‌یابد اما با افزایش پریود چرخش به صورت قلیل توجه افزایش نمی‌یابد. علاوه بر این مدل سازی نشان می‌دهد نوسانات افت فشار در داخل کانال بیشتر متأثر از تغییرات فشار ناشی از جاذبه می‌باشد.

Nuclear Energy **41**: 17-25.

Yan, B. H., G. Zhang and H. Y. Gu (2012).
"CFD analysis of the effect of rolling motion on
the flow distribution at the core inlet." Annals of

پی نوشت ها

- ¹ Small Modular Reactors
- ² Nuclear Steam Supply System (NSSS)
- ³ Marine Reactors
- ⁴ Critical Heat Flux
- ⁵ CFD: Computational Fluid Dynamics
- ⁶ Downcomer
- ⁷ perturbation
- ⁸ standard k-e model with non-equilibrium wall function
- ⁹ 6DOF: Six degrees of freedom
- ¹⁰ Zone Motion and Mesh Motion
- ¹¹ User Define Function
- ¹² Coriolis acceleration