

## تحلیل هیدرودینامیکی اثر سطح آزاد یک سازه فراساحلی<sup>۱</sup> (FOS) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

محمد حسین هادی<sup>۱</sup>، سعید شعبانی<sup>۲</sup>، احمد صداقت<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریای دانشگاه صنعتی اصفهان، hadimechanic@yahoo.com

<sup>۲</sup>هیئت علمی، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریای دانشگاه صنعتی اصفهان، sshabani@cc.iut.ac.ir

<sup>۳</sup>هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، sedaghat@cc.iut.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه تحلیل هیدرودینامیک سطح آزاد یک سازه فراساحلی شناور (FOS) مورد توجه قرار گرفته است که با استفاده از تکنیک‌های جدید CFD مانند کسر حجمی<sup>۲</sup> رفتار سطح آزاد و نیز نیروهای وارده از طرف موج دریا به سازه با استفاده از نرم افزار Ansys CFX بررسی می‌شود. بدین منظور از یک دامنه مکعب مستطیلی شکل استفاده شده است تا مدل به صورت سه بعدی درون دامنه حل تعریف شود. نیروهای بدست آمده از طرف موج وارده در روش سه بعدی بیشتر از حالت دو بعدی است که دلیل آن بزرگ‌تر بودن دامنه‌ی حل و مطابقت بیشتر آن با واقعیت می باشد. همچنین در این مطالعه این نتیجه حاصل شد که اثر هیدرودینامیکی سطح آزاد و نیز نیروی وارده بر سازه‌ی فراساحلی عمدتاً به علت وجود نیروهای فشاری حاصل از برخورد امواج به سطح سازه می‌باشد. در این تحقیق همچنین اثرات متقابل برخورد جریان آب و هوا و نیز اثر برخورد امواج دریا به سطح بویه بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** سازه فراساحلی شناور، هیدرودینامیک سطح آزاد، جریان دوفازی، تکنیک کسر حجمی.

### مقدمه

سازه‌های فراساحلی شناور مانند سکوها نفتی و بویه‌ها در معرض نیروهای تناوبی ناشی از باد، جریان‌های دریایی و امواج دریا می‌باشند. امروزه حرکت سازه‌های فراساحلی و نیروهای ناشی از این حرکت و نیز اثر بارهای ناشی از امواج دریا و جریان‌های دریایی با روش‌های CFD قابل پیش‌بینی هستند. هدف این مطالعه تحلیل CFD دوگانه جریان هیدروآیرو دینامیک اطراف سازه شناور، شامل اثرات لزجی سیال و تولید امواج سطحی در خط تراز آب می‌باشد. بدین منظور از روش کسر حجمی سیال در نرم افزار Ansys<sup>۳</sup> استفاده شده است. این مدل چند فازی برای سیالات مخلوط نشدنی کاربرد دارد و تلاقی بین آنها را دنبال می‌کند. شرایط محیطی دریا در این مقاله از داده‌های هوا-اقیانوس شناسی خلیج فارس اقتباس شده است.

همچنین لازم به ذکر است که ارائه مدل سه بعدی برای اولین بار در داخل ارائه می‌شود. مورد مشابه قبلاً بصورت دو بعدی در مرجع (۹) ارائه شده است.

### بویه به عنوان یک سازه فراساحلی شناور

بویه سازه‌ای فراساحلی است که با تجهیز آن به وسایل پیش‌بینی و اندازه‌گیری شرایط دریایی کاربردهای متفاوتی دارد. عمده‌ترین کاربرد آن دریافت و ارسال اطلاعات دریایی از قبیل سرعت باد، سرعت جریان آب، دمای هوا، دمای آب، شوری آب و نیز اطلاعات مربوط به موج دریا اعم از ارتفاع موج، دوره زمانی موج، دامنه موج به منظور پیش‌بینی شرایط آینده دریا می‌باشد. نمونه‌ای از یک بویه از نوع موج نگار در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: یک نمونه بویه

<sup>۱</sup> Float Offshore Structure

<sup>۲</sup> Volume Of Fraction (VOF)

<sup>۳</sup> Ansys CFX

## تحلیل هیدرودینامیکی

در این مقاله از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS-CFX استفاده گردیده است. در این نرم افزار مشابه نرم افزار فلوئنت<sup>۱</sup> از روش حجم محدود و بطور همزمان معادلات را برای حالت دو فازی آب و هوا حل می کند. برای شبیه سازی حرکت در سطح آزاد از الگوی کسر حجمی استفاده شده است.

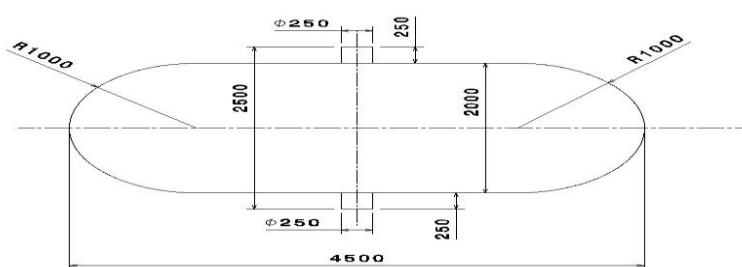
برای جداسازی معادلات از روش رزولوشن بالا<sup>۲</sup> استفاده شده است. مزیت این روش این است که بطور هوشمند هر کجا نیاز باشد از دقت مرتبه ۲ و هر کجا نیاز باشد از دقت مرتبه ۱ استفاده می کند که خود باعث کاهش حجم محاسبات می شود. برای مدل آشفتگی از مدل استاندارد تنش برشی انتقالی<sup>۳</sup> که بیشتر برای جریان های دوفازی کاربرد دارد، استفاده شده است. جریان دوفازی آب و هوا توسط معادلات جریان سیال دوفازی و تراکم ناپذیر بیان می شود که توسط معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده رینولدز<sup>۴</sup> استفاده شده است.

نرم افزار ANSYS از روش حجم محدود برای حل معادلات استفاده می کند. در این روش، دامنه ی حل، به تعداد محدودی از حجم های کنترل هم مرز تقسیم می شود و معادلات بقا بصورت انتگرالی به هر حجم کنترل اعمال می شود. در مرکز هندسی هر حجم کنترل یک گره محاسباتی قرار دارد که مقدار متغیرهای جریان باید در آن نقطه محاسبه شود.

روش حجم محدود می تواند با هر شبکه ای سازگار باشد و از این رو برای هندسه های پیچیده مناسب است. تمام جملاتی که باید تقریب زده شوند مفهومی فیزیکی دارند و به همین دلیل این روش به عنوان یکی از رایج ترین تکنیک های گسسته سازی در سیالات به شمار می رود. تنها اشکال روش حجم محدود در مقایسه با روش تفاضل محدود شاید این باشد که تقریب های بالاتر از مرتبه دو را به سختی می توان در هندسه های سه بعدی گسترش داد زیرا روش حجم محدود نیاز به سه سطح از تقریب دارد که عبارتند از: درونیایی، مشتق گیری و انتگرال گیری. دامنه حل مکعبی به ابعاد مشخص در نظر گرفته شده است، دلیل این انتخاب، طبق قوانین تجربی موجود در دینامیک سیالات محاسباتی، فاصله صفحه برخورد سازه از ورودی دامنه ی حل به اندازه ۱/۵ برابر طول سازه و فاصله صفحه خروجی بویه از خروجی دامنه بین ۴ تا ۵ برابر طول بویه می باشد تا بتواند اثرات برخورد را در پشت سازه بخوبی نشان دهد.

به علت وجود گرادیان بیشتر نیرو، سرعت و فشار در اطراف سازه از یک زیر دامنه استوانه ای در اطراف سازه مطابق شکل ۲ استفاده شده است، که تعداد المان های موجود در این زیر دامنه نسبت به دامنه ی اصلی بسیار بیشتر و ریزتر است که دلیل آن وجود لایه های مرزی اطراف جسم و وجود گرادیان شدیدتر حول سازه می باشد.

خاصیت مهم دیگری که در این مسئله مورد توجه قرار گرفته است استفاده از بحث کسر حجمی سیال است که با توجه به اینکه در ورودی ما دو فاز سیال داریم باید مقدار حجم ورودی هریک از سیال های آب و هوا به دامنه ی حل مشخص باشد.



شکل ۲: شکل شماتیک سازه فراساحلی مورد نظر

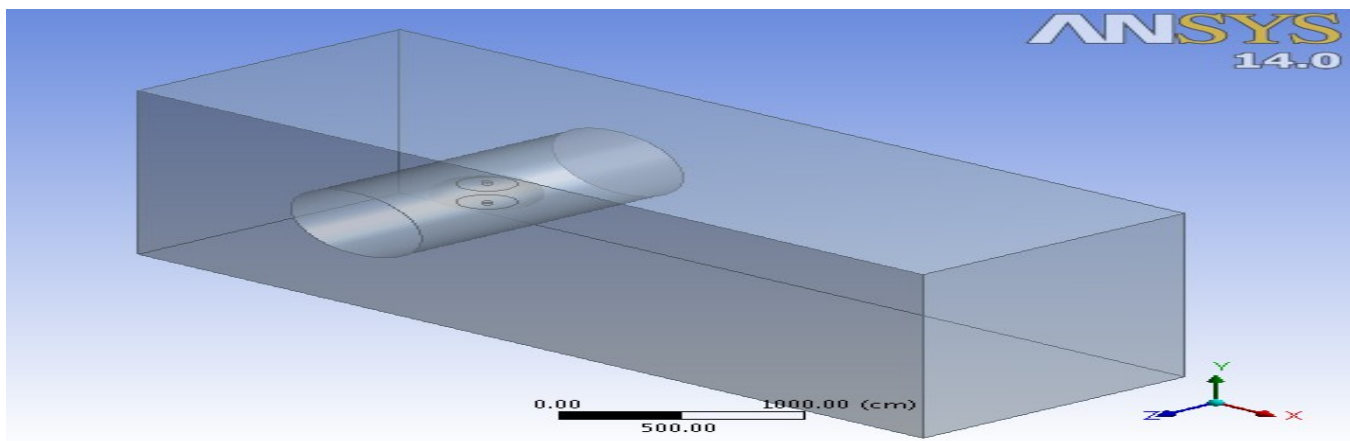
ابعاد دوبعدی بویه در شکل بالا نشان داده شده است. حال این هندسه را درون دامنه حل مسئله قرار می دهیم. همانطور که مشاهده می شود شکل این سازه متقارن می باشد. بنابراین برای تبدیل آن به حالت سه بعدی کافی است با دستور چرخش<sup>۱</sup> از صندوق ابزار آن را مطابق شکل ۳ به حالت سه بعدی تبدیل نماییم.

<sup>۱</sup> Fluent

<sup>۲</sup> High Resolution

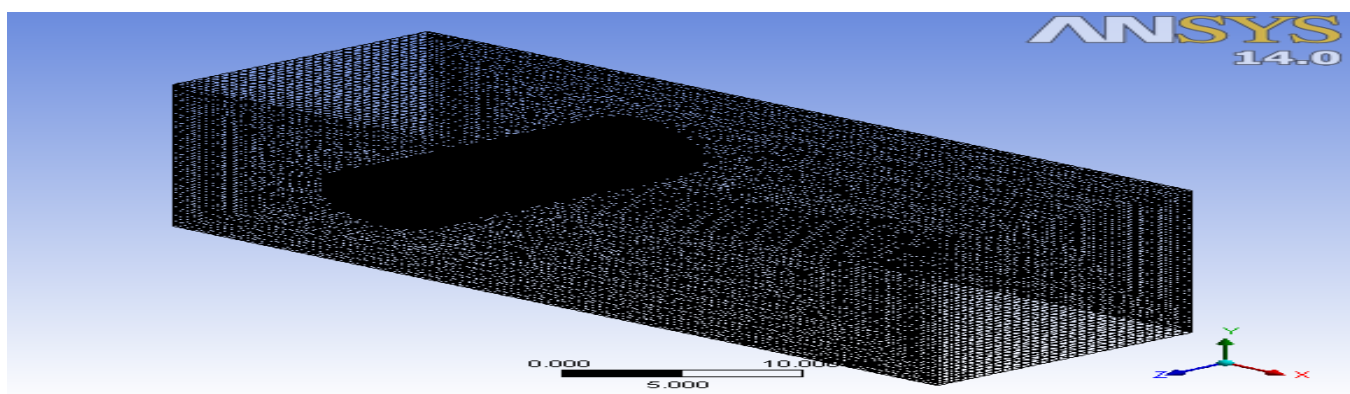
<sup>۳</sup> (SST) Shear Stress Transport

<sup>۴</sup> Reynolds-Average Navier-Stocks (RANS)



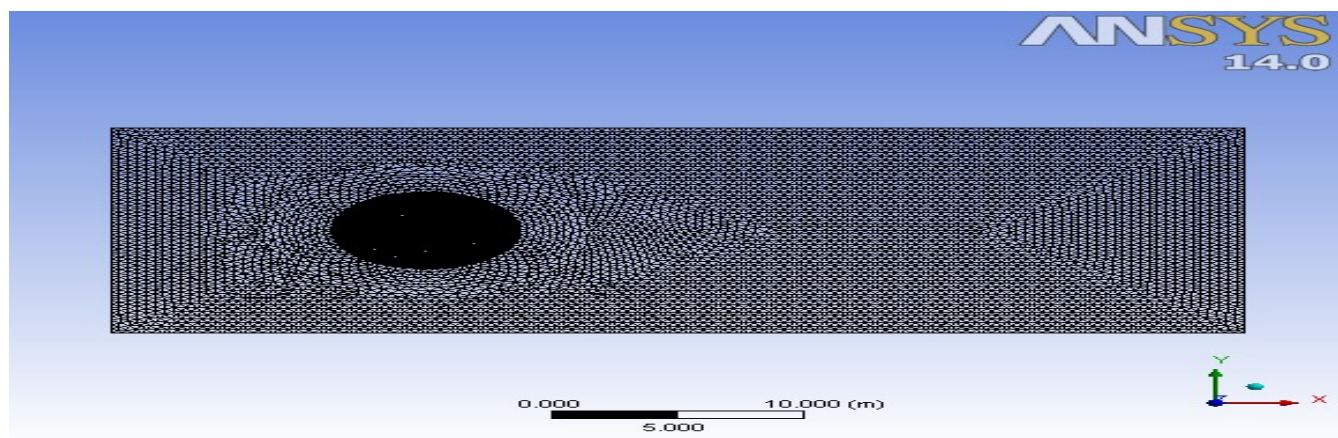
شکل ۳: هندسه سه بعدی سازه شناور از نمای ایزومتریک

برای این سازه مطابق شکل ۴ از یک دامنه و یک زیر دامنه استفاده می شود. بدین منظور علاوه بر مکعب مستطیل به ابعاد  $45[m] \times 30[m] \times 15[m]$  که بصورت دامنه اصلی حل در نظر گرفتیم از یک استوانه به قطر  $7.5$  متر در راستای عمق نیز به عنوان زیردامنه استفاده نمودیم تا رفتار سازه را از طریق تغییر خواص درون زیر دامنه نیز بررسی کنیم.



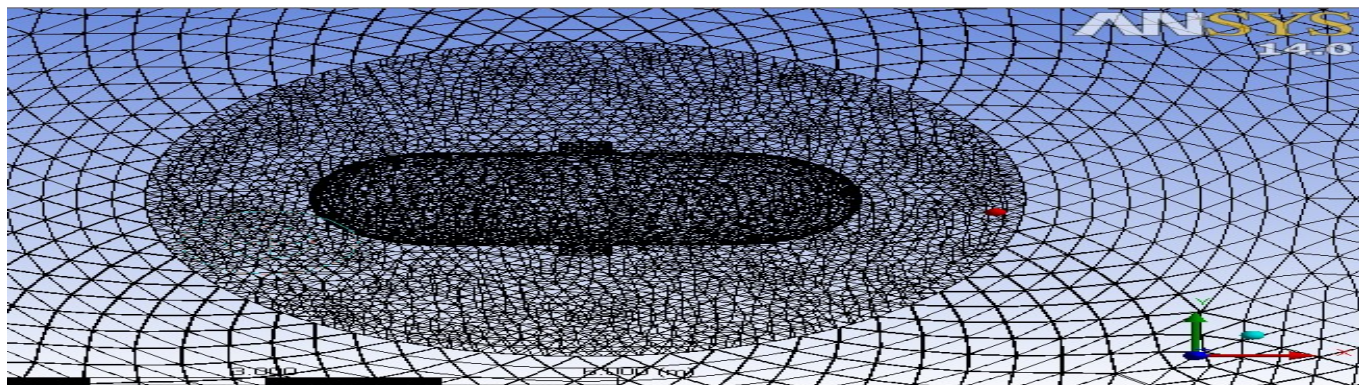
شکل ۴: شبکه مش بندی شده دامنه حل سازه شناور از نمای ایزومتریک

در مش بندی شکل بالا از مش بندی متوسط و از نوع چهار وجهی استفاده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود شبکه اطراف سازه بسیار ریزتر از فضای دورتر از سازه می باشد تا اثرات حرکت سیال اطراف سازه را با دقت قابل قبول نتیجه دهد.

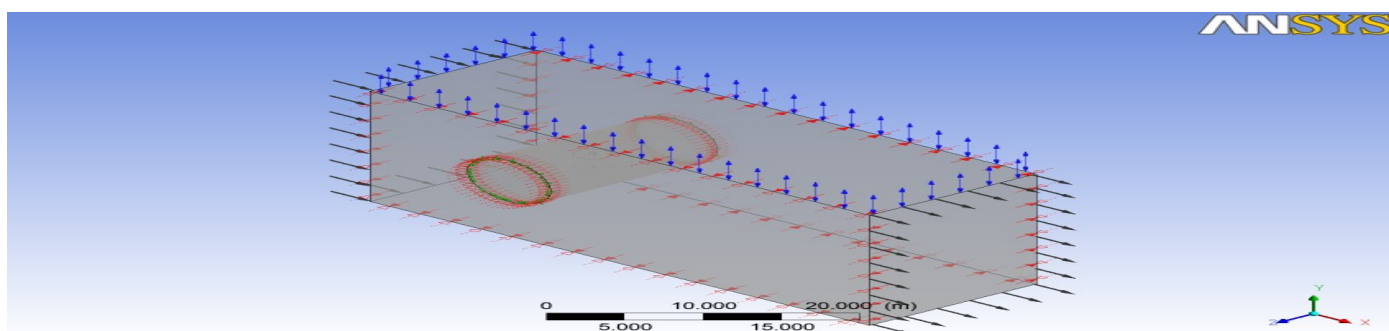


شکل ۵: شبکه مش بندی شده دامنه حل سازه شناور از نمای روبرو

<sup>1</sup>Revolve



شکل ۶: شبکه مش‌بندی شده سازه شناور از نمای روبرو

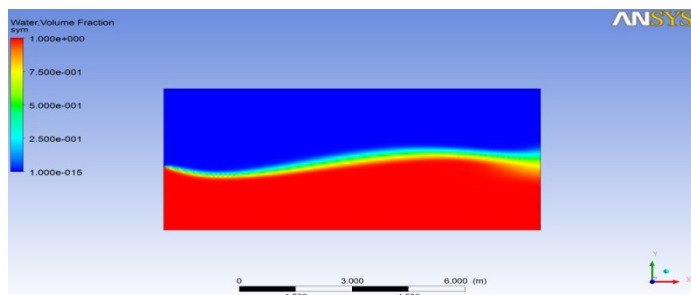


شکل ۶: نمای ایزومتریک سطوح بارگذاری شده دامنه‌حل

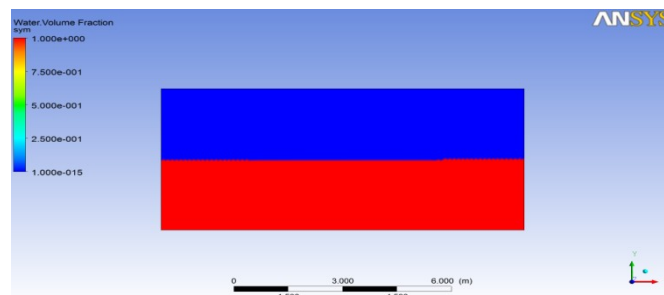
در شکل ۶ سطوح ورودی، خروجی، دیواره‌ها و نیز سطح آزاد نشان داده شده است. لازم به ذکر است تنظیمات لازم جهت تولید موج و نیز سرعت در ورودی و فشار در خروجی نیز باید در قسمت شرایط مرزی مربوط به جسم انجام شود.

### حل نمونه و ارائه نتایج

لازم به ذکر است که کلیه کانتورها و اندازه نیروها در زمان ۱ ثانیه ثبت شده‌اند. دوره تناوب موج در حدود ۴٫۵ ثانیه است بنابراین مقایسه کانتورها و ارقام بدست آمده در بازه‌های زمانی ۰ تا ۴٫۵ ثانیه نشان داد که در زمان ۱ ثانیه، سازه حداکثر نیروی ممکن را تحمل می‌کند. پس بهتر است در این زمان که سازه دارای شرایط بحرانی است متمرکز شویم. در شکل‌های ۶ تا ۹ ابتدا شکل مربوط به موج برخوردی به سازه و سپس کانتور<sup>۱</sup> کسر حجم سیال و نیز فشار مربوطه را در این زمان نشان می‌دهیم.



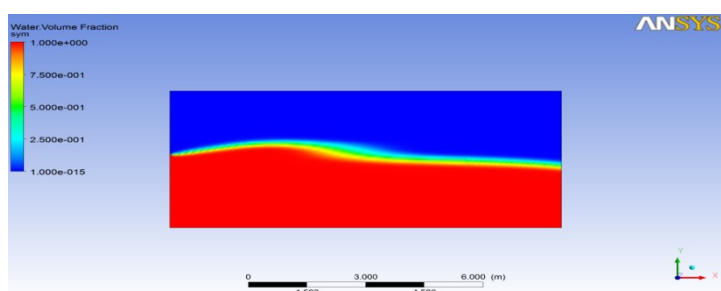
شکل ۷: موج تولیدی در زمان ۱٫۵ ثانیه



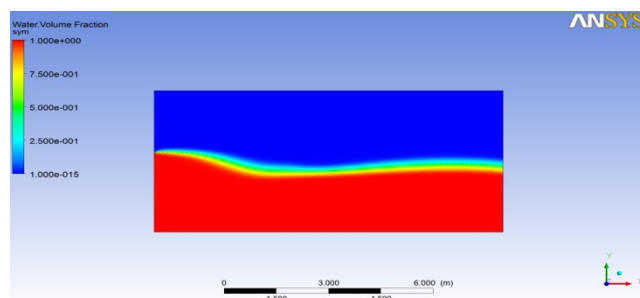
شکل ۶: موج تولیدی در زمان صفر ثانیه

<sup>۱</sup> Contour

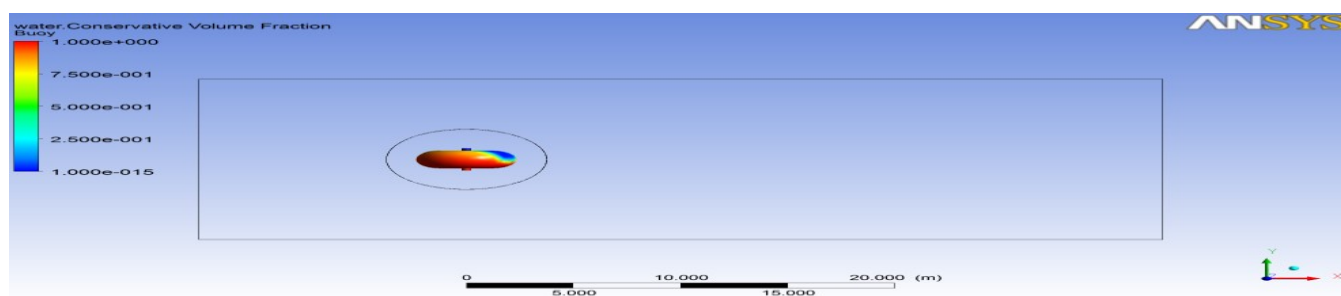




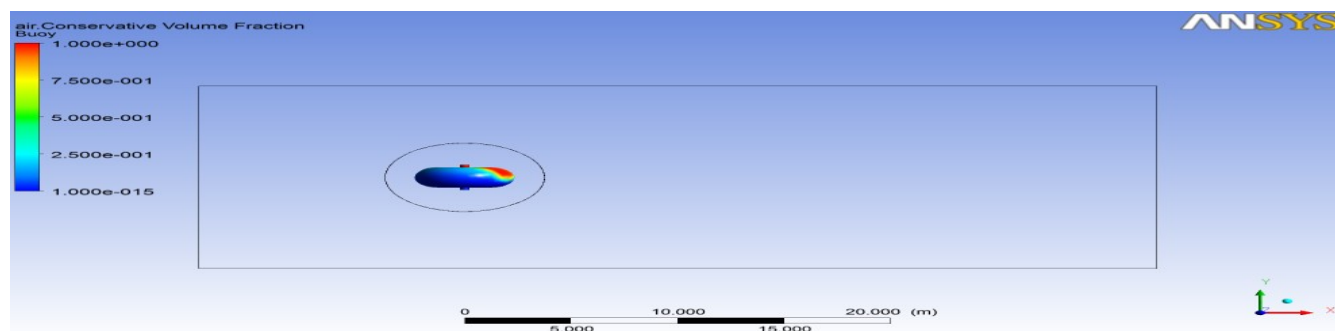
شکل ۹: موج تولیدی در زمان ۴,۵ ثانیه



شکل ۸: موج تولیدی در زمان ۳ ثانیه

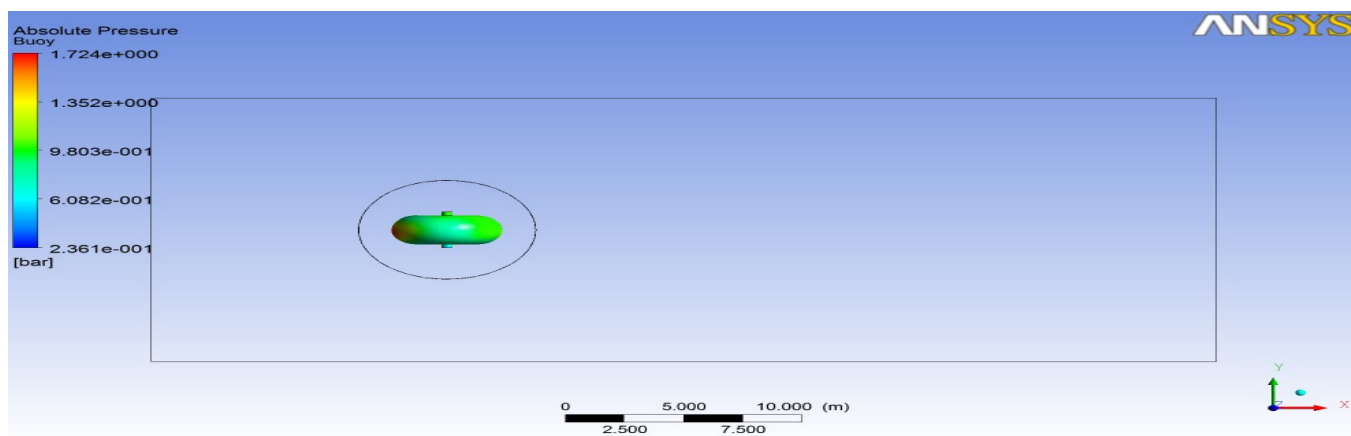


شکل ۱۰: کسرحجمی سیال آب در زمان ۱ ثانیه

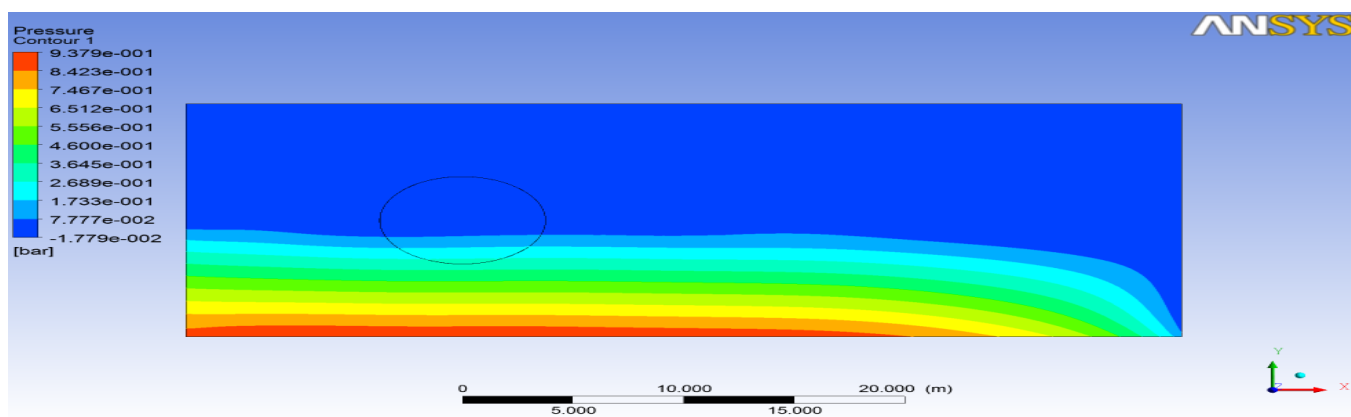


شکل ۱۱: کسرحجمی سیال هوا در زمان ۱ ثانیه

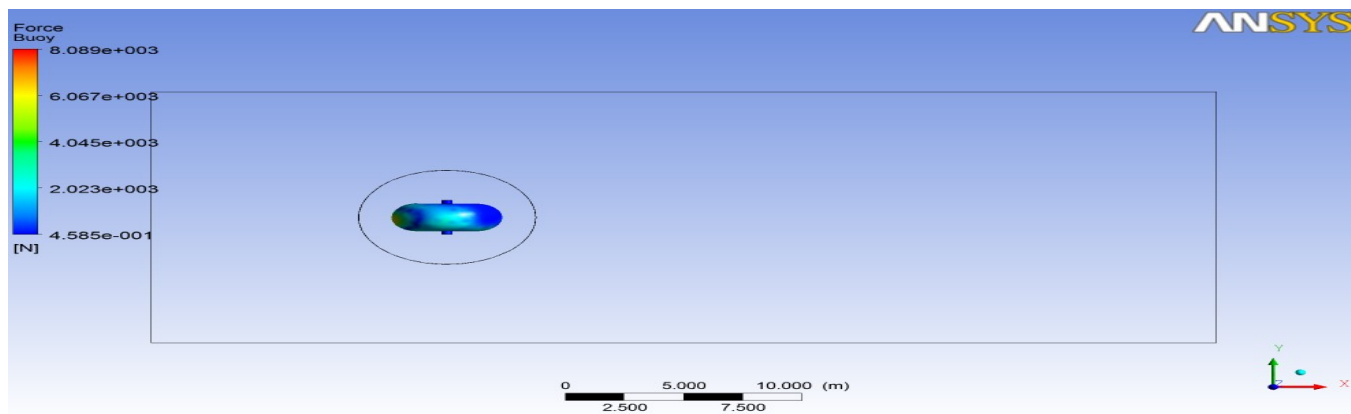
از شکل ۱۰ و ۱۱ نتیجه می‌شود بیشترین حجم روی سطح سازه در زمان ۱ ثانیه که شرایط بحرانی محسوب می‌شود مربوط به سیال آب است و با توجه به چگالی بیشتر آب نسبت به هوا بیشتر نیروی وارد بر سازه از طرف سیال آب است. اثر موج نیز بصورت جداگانه در جهت انتشار، نیروهای عمده‌ای به سازه وارد می‌کند.



شکل ۱۲: فشار مطلق وارد بر سازه در زمان ۱ ثانیه

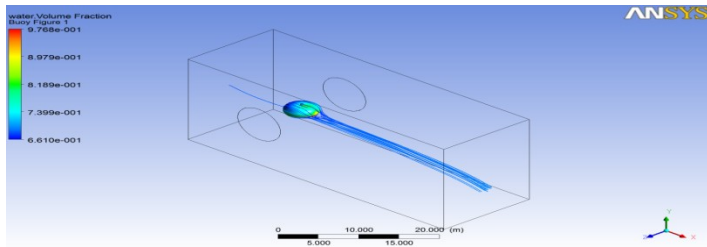


شکل ۱۳: کانتور فشار در سطح روبرو در زمان ۱ ثانیه

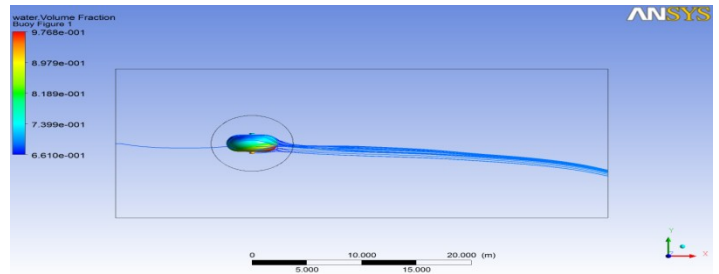


شکل ۱۴: نیروی وارد بر سازه در زمان ۱ ثانیه

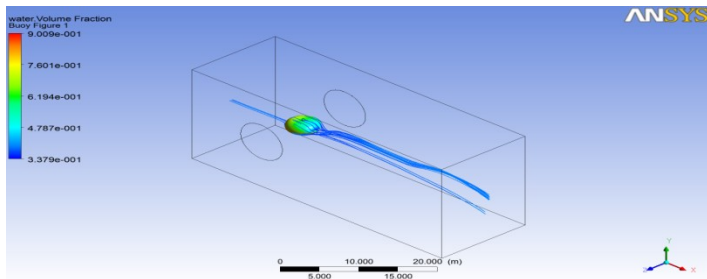
در شکل ۱۲ فشار مطلق را در زمان ۱ ثانیه در بویه بررسی شده است. همانطور که دیده می‌شود در دهانه ورودی برخورد سیال به سازه بیشترین مقدار فشار مطلق را داراست که دلیل آن برخورد سیال و رسیدن سرعت آن به مقدار صفر است. در شکل ۱۳ کانتور فشار در سطح روبرویی نشان داده شده است که تغییرات فشار نسبت به تغییرات ارتفاع در زمان ۱ ثانیه نشان داده شده است که در پشت سازه این تغییرات مشهودتر است. شکل ۱۴ نیز معرف نیروی وارد بر سازه در زمان ۱ ثانیه که سازه در شرایط بحرانی خود است را نشان می‌دهد. جزئیات کامل مقدار نیروها در جدول شماره ۲ آورده شده است.



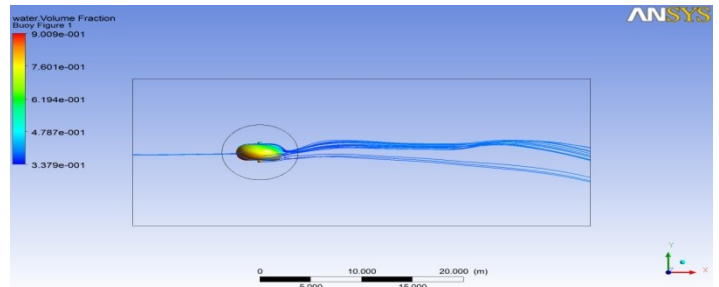
شکل ۱۶: خطوط جریان اطراف سازه در زمان ۱ ثانیه از نمای ایزومتریک



شکل ۱۵: خطوط جریان<sup>۱</sup> اطراف سازه در زمان ۱ ثانیه از نمای روبرو



شکل ۱۸: خطوط جریان اطراف سازه در زمان ۲ ثانیه از نمای ایزومتریک



شکل ۱۷: خطوط جریان اطراف سازه در زمان ۲ ثانیه از نمای روبرو

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ خطوط جریان در زمان‌های ۱ و ۲ ثانیه نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است سازه مانند یک جسم صلب در مقابل موج وارده ایستادگی می‌کند که اثر این ایستادگی نیروهای وارد بر سطح سازه میباشد.

جدول ۱: پارامترهای موج

ارتفاع موج (m)	دوره تناوب (s)	دامنه موج (m)	عدد موج	سرعت وزش باد ( $m/s$ )	سرعت جریان آب ( $m/s$ )
1.954103	4.509424	.970515	.147	10.50968	8.39336

جدول ۲: نیروهای وارد بر سازه فراساحلی

مجموع نیروها (N)	نیروی وارد از طرف آب (N)	نیروی وارد از طرف هوا (N)	راستای نیرو
5381.98	5183.53	225.891	(X)
232.4	196.72	37.681	(Y)
279.89	265.73	14.451	(Z)

در جدول ۱ پارامترهای مربوط به موج از مرجع ۱۰ و مربوط به خلیج فارس می‌باشد آورده شده است. در جدول ۲ نیروهای وارد بر بویه در ۳ جهت و بصورت تفکیکی برای آب و هوا در زمان ۱ ثانیه که مقدار بحرانی مقدار نیرو است نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نیرو در جهت انتشار امواج در مقایسه با دو جهت دیگر عمود بر آن مقدار قابل توجه تری دارد، بنابراین می‌توان از مقدار نیروی وارد بر سازه در دو جهت دیگر غیر از جهت انتشار امواج صرف‌نظر کرد.

### جمع بندی نتیجه‌گیری

یک روش ساده برای تحلیل جریان سیال دو فازی در اطراف یک سازه فراساحلی شناور با استفاده از نرم افزار Ansys CFX ارائه گردید. همانطور که در نتایج حل مثال نمونه از یک سازه فراساحلی مشهود است فشار مطلق در کف به علت غالب بودن اثر عمق بیشتر است. در پشت سازه در جهت X نیز فشار مطلق به شدت پایین آمده که علت آن ایجاد گرادیان معکوس و در نتیجه تشکیل ناحیه گردابه می‌باشد. نیروهای لزج در مقابل نیروهای فشاری قابل چشم‌پوشی هستند بنابراین برای این‌گونه مسائل مدل جریان پتانسیل می‌تواند با دقت خوبی به نتایج مورد نظر برسد و به ساده‌سازی حل مسئله کمک کند.

<sup>1</sup> Stream Line

<sup>2</sup> Wake

- [1] Sarpkaya, T., Isaacson, M., Mechanics of Wave Force on Offshore Structures, Van Nostrand Reinolds company, New York, 1981
- [2] Newman, J.N., Marine Hydrodynamics, M.I.T. Press, Mass, 1997.
- [3] Hogben, N. and Stading, R.G., "Experience in Computing Wave Loads on Large Bodies", Proc.
- [4] A. Berg and F.G. Nielsen, "Panel Method for Computing Wave Load on a Vertical Cylinder" Applies Ocean Research, Vol. 13, No. 6, 1991
- [5] A. Korobkin, "Water Impact Problems in Ship Hydrodynamics", in Advance in Marine Hydrodynamics, Comp. Mech. Publ., PP. 323-371, 1996.
- [6] V. Bertram, Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.
- [7] E.O. Tuck and L. Lazauskas, "Free-Surface Pressure Distribution With Minimum Wave Resistance" Anziam J. 43(E), PP. E-75-E101, 2001
- [8] Manual Help & Ansys Tutorials for Finite Volume Problems.
- [9] Gafar Gholi Nezhad, Sh., Hadad, T., Shabani, S., Sedaghat, A., "Free surface hydrodynamic analysis of floating offshore structures (FOS) using multiphase flow modeling", 8<sup>th</sup> marine industries conference (MIC2006), 28 Nov. 2006.
- [10] داده‌های باد و موج اقتباس از داده‌های اداره مهندسی سواحل و بنادر .