

تحلیل استحکامی و فرکانس طبیعی یک ربات زیرآبی کنترل از راه دور (ROV) در هوا و آب جهت کاوش در اعماق دریا

قدیر احمدی جید^۱، محمد گندم کار^۲

gh.ahmadi.j@gmail.com

۱- کارشناسی ارشد مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

در این مقاله با هدف طراحی یک رونده زیرسطحی کنترل از راه دور جهت جستجو و بازرسی از اعماق دریا، با استفاده از نرم افزار ABAQUS تحلیل تنش و فرکانس طبیعی در خشکی و در زیرآب انجام شده است. برای ایجاد استحکام و شناوری از مواد با استحکام بالا و وزن پایین استفاده شده است تا ربات قابلیت شناوری در شرایط مختلف را داشته باشد. با استفاده از تحلیل فرکانس طبیعی در زیرآب با در نظر گرفتن خواص آکوستیکی سیال آب، تغییرات فرکانس طبیعی ROV مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور از تحلیل آکوستیک در نرم افزار ABAQUS استفاده شده و اثرات جرم افزوده در مودهای مختلف ارتعاش وسیله بررسی شده است. نتایج تحلیل تنش ROV نشان دهنده استحکام ربات زیرآبی در شرایط مرزی بحرانی در زیرآب در اثر نیروهای هیدرواستاتیک و درگ می باشد. در تحلیل فرکانس طبیعی با در نظر گرفتن خواص آکوستیک سیال نشان داده شده است که در مودهای فرکانسی بالاتر، اثر سیال اطراف کمتر شده و میزان جرم افزوده آن در فرکانس های بالا کاهش می یابد. برای تحلیل سیال اطراف سازه، ابعاد سیال تا جایی که افزایش آن دیگر تغییری بر روی فرکانس های سازه ایجاد نکند و فرکانس های به دست آمده همگرا شوند افزوده شده است که حدود ۵ برابر ابعاد وسیله در زیرآب است. در این تحقیق نشان داده شد که به خاطر اثرات جرم آب، فرکانس طبیعی وسیله تا ۴۰ درصد کاهش خواهد داشت.

واژگان کلیدی: چهارچوب ربات زیرآبی، فشار هیدرواستاتیک، فرکانس طبیعی، آکوستیک سیال، جرم افزوده.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۱۲/۰۷

۱- مقدمه

اعماق زیاد به عنوان خصوصیات اصلی ROV، جایگزین کردن غواص با ROV حتی در کاربردهای معمولی برای شرکت‌های خدماتی و بازرسی از اهمیت بالایی برخوردار است. کاربرد ROV در این موارد با مطرح شدن فاکتورهای انسانی و بالا رفتن ارزش انسان‌ها در جوامع صنعتی روز به روز در حال افزایش است [۴].

در زمینه طراحی‌های کلاسیک، رومئو^۶ در سال ۱۹۹۸ ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور را طراحی کرد، که در آن برای مطالعه مسائل مختلف مربوط به طراحی ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور در اختیار سایر محققین قرار گرفت [۵]. ویدئوری^۵ یک میکرو ربات زیرآبی کنترل از راه دور تجاری با معماری باز دارای سه تراستر با دو آرایش افقی و یکی عمودی برای کنترل حرکت که برای استفاده در مطالعات تجربی طراحی نمود [۶]. ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور مینرو^۶ به‌طور خاص و ویژه توسط اسپر^۷ به سال ۲۰۰۳ برای تکمیل و اجرا برای پاسخگویی به نیازهای دانشمندان در دانشگاه ام.تی.ان طراحی شد که قابلیت انجام عملیات تا عمق ۷۰۰ متری را دارا است [۷]. سوسا و همکاران^۸ فرایند طراحی ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور کاوس^۹ را گزارش نمودند. این پروژه در یو.اس. تی. ال در دانشگاه پورتو به مقابله با نقطه‌ضعف ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور آی. ای. اس^{۱۰}، به‌خصوص برای رسیدن به قدرت مانور بیشتر و حفظ ثبات در حضور اختلالات در طول عملیات در بندرها، رودخانه‌ها و دریا انجام شد [۸]. مرزبان راد و همکارانش در سال ۲۰۱۱ یک ربات زیرآبی کنترل از راه دور در دانشگاه شیراز بانام آریانا I، طراحی کرده و ساختند که با در نظر گرفتن الزامات و ملاحظات لازم جهت طراحی و ساخت و کنترل ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور، یک ربات زیرآبی را طراحی و مدل نمودند [۹].

وثوقی و همکاران طراحی و ساخت یک ربات کنترل از راه دور زیرسطحی جهت انجام عملیات بازرسی در اعماق ۳۰۰ متری زیرآب را انجام دادند [۱۰]. مکفایی و همکاران با بررسی نیروی هیدرودینامیک و هیدرو استاتیک و همچنین نیروی‌های ناشی از نیروهای درگ، ROV لوله گذار را طراحی

ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور در چند دهه اخیر بخاطر نوع کاربرد و خطرات موجود در حوزه زیرآب و اعماق زیاد که فعالیت انسان‌ها را محدود کرده است مورد استقبال صنایع نظامی و دریایی و غیره قرار گرفته‌اند. در گذشته، ROV^۱ ها به منظور انجام نقش‌های کوچک در نقاطی که کار غواصی غیرممکن است توسعه پیدا کرد [۱].

اولین ربات زیرآبی به نام پادل^۲ توسط دیمیتری ریبیکوف^۳ در سال ۱۹۵۳ توسعه داده شد [۲]. در سال ۱۹۶۰ به‌کارگیری ربات کنترلی زیرسطحی در سیستم دریایی امریکا برای نجات زیردریایی در آب‌های عمیق و جستجو در بستر اقیانوس‌ها مورد استفاده قرار گرفت، در اوایل دهه‌ی ۷۰ نیروی دریایی امریکا که تجهیزات تجسس در اعماق زیاد برای نجات زیردریایی‌های غرق‌شده در کف اقیانوس را طراحی و به مرحله‌ی ساخت رسانیده، این تجهیزات که خود یک کمک برای تجهیزات نجات محسوب می‌شوند را استفاده کرد. در دهه‌ی ۸۰ گروه‌های اکتشاف نفت در بستر دریا ضرورتاً مجهز به این وسیله شدند تا امکانات گروه اعزامی خود را گسترش دهند [۳].

ROV به‌عنوان یک ابزار جایگزین در عملیات زیرآبی زمانی شناخته شد که نیروی دریایی آمریکا در سانحه سقوط هواپیمای بمبافکن در سال ۱۹۶۶، بمب اتم به‌جای مانده در هواپیما را از اعماق دریا در اسپانیا بیرون آورد و چند سال بعد در سال ۱۹۷۳ توانست به کمک همان ROV، خدمه زیردریایی غرق شده در سواحل ایرلند را درحالی‌که تنها چند دقیقه به تمام شدن هوای ذخیره داخل زیردریایی غرق شده باقیمانده بود نجات دهد.

با پیشرفت‌های فناوری شرکت‌های نفتی متوجه قابلیت‌های ROV در عملیاتی نفتی خارج از ساحل شدند و با سرمایه‌گذاری در این عرصه، فواید استفاده از ROV را در عرصه اقتصادی نمایان ساختند. به‌تدریج با کشیده شدن عملیات حفاری به اعماق زیاد دریاها، ROV به‌عنوان یک عضو اصلی و جدایی‌ناپذیر در عملیات نفتی مطرح گردید. علاوه بر دقت بالا در انجام وظایف محموله و قابلیت رفتن به

⁶ Minerva

⁷ Sparer

⁸ Susa et al

⁹ Koss

¹⁰ IES ROV

¹ Remotely Operated Vehicle (ROV)

² poodle

³ Dimitri Rebikoff

⁴ Romeo

⁵ Video Ray

دمپینگ لایه‌های ویسکوالاستیک نقش بسیار مهمی در رفتار ارتعاشی ورق‌ها دارا می‌باشند و جهت بررسی ارتعاش آزاد و تعیین فرکانس‌های طبیعی ورق‌ها و پوسته‌های ساندویچی در تماس با سیال، می‌بایست تأثیر آن‌ها در نظر گرفته شود. با توجه به کاربردهای مهم ربات‌های زیرآبی در این مقاله هدف طراحی و تحلیل استحکامی یک ربات زیرآبی در زیرآب و خشکی برای اعماق بالا است که تحلیل فرکانس طبیعی در زیرآب و خشکی و بررسی اثرات جرم افزوده^۲ انجام می‌شود. برای تحلیل فرکانس در آب از روش آکوستیک سیال در نرم افزار ABAQUS استفاده می‌شود و برای صحت روش نتایج تحلیل با نتایج تجربی پژوهشگران در مراجع یاد شده صحت سنجی شده و برای ROV مدل شده استفاده می‌گردد.

۲- اصول و مبانی طراحی ربات‌های زیرآبی

ربات‌های زیرآبی مدرن، امروزه طیف متنوعی از وظایف محوله را از بازرسی محیط‌های خطرناک درون راکتور هسته‌ای گرفته تا تعمیر تأسیسات پیچیده‌ی زیردریایی صنایع نفت و گاز به انجام می‌رسانند و دارای دسته بندی‌های مختلف و کلاس کاری متفاوتی می‌باشند که شامل ربات‌های کلاس عملیاتی و کلاس بازرسی می‌باشند. به منظور تأمین اهداف مطلوب در طراحی ربات‌های زیرآبی نوع عملکرد و مقدار عمقی کاری ربات زیرآبی باید مد نظر گرفته شود. در جدول (۱) و شکل (۱) کاربردهای مهم و مثال‌هایی از عملیات ROV ارائه شده است [۱۸].

علی‌رغم موارد ذکر شده، طراحی ربات زیرآبی باید به صورت مجموعه‌ای واحد و با در نظر گرفتن تمامی ملاحظات طراحی لازم و مرتبط صورت پذیرد که می‌توان به هزینه تمام شده، ابعاد مطلوب با توجه به نیازمندی‌ها و قابلیت‌های مورد نظر، تکنولوژی موجود و در دسترس، توان و قدرت مورد نیاز، ابعاد و وزن، فضای لازم در عرشه کشتی، حداکثر عمق، نوع شرایط دریایی که ربات امکان کار دارد، حداکثر بار مفید قابل حمل، کاربرد، چندمنظوره بودن، ایمنی و اطمینان پذیری، ثبت مسیر حرکت (در صورت لزوم) و قابلیت تعمیر و نگهداری اشاره نمود. ربات‌های زیرآبی اجزا مختلف و متعددی دارند که عموماً بدنه ربات، سیستم رانش یا تراسترها و حسگرها، واسط‌های کنترلی و نمایشی، سیستم توزیع قدرت، کابل‌های هدایتی و ارتباطی، سیستم هدایت و کنترل هستند [۱۹].

نمودند [۱۱]. از اولین پژوهش‌ها در حوزه تحلیل فرکانس در آب و تأثیر میزان جرم افزوده می‌توان به نیوتن و زینکوویچ [۱۲] اشاره کرد که در سال ۱۹۶۹ روابط مربوط به جرم افزوده و ماتریس سختی هندسی را برای ارتعاش استوانه‌های غوطه‌ور به دست آوردند. مین^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۳] آنالیز ارتعاشات فرکانس بالای یک بدنه استوانه‌ای در تماس با آب را انجام داده و توابع انتقال فرکانس سازه در هوا و آب و اثرات هیدروالاستیک آن را مورد بررسی قرار دادند.

رضوانی و همکاران [۱۴] مقایسه حل عددی، تحلیلی و تجربی فرکانس طبیعی صفحه تقویت‌شده مغروق در سیال انجام دادند که نتایج عددی با نرم‌افزار ABAQUS با تقریب خوبی نزدیک به نتایج آزمایش دیده شد. همچنین با محاسبه عددی فرکانس‌های طبیعی و بررسی شکل مودهای شناوری در آب و هوا، اثرات جرم افزوده در فرکانس در آب را بررسی نمودند.

شهرآبادی و همکاران [۱۵] با بررسی تجربی اثر عمق آب در کاهش فرکانس خمش اجسام کشیده به این نتیجه رسیدند که علاوه بر کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه در زیرآب، عاملی که باعث کاهش محسوس فرکانس در نزدیکی سطح می‌باشد، اثر سطح سیال است و کاهش فرکانس نیز تا عمق کمی از آب به صورت زیاد و پس از آن کاهش به صورت جزئی است. علت اصلی را می‌توان در کاهش تغییرات جرم افزوده در اثر افزایش عمق غوطه‌وری جسم دانست.

رضوانی و همکاران [۱۶] همچنین شبیه‌سازی ارتعاش پایه جاکت سکوی نفتی تحت نیروی موج در شرایط مختلف اتصال به کف دریا را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که فرکانس سازه در شرایط مرزی اتصال با ایزولاتور، بیشتر از حالتی است که پایه‌ها با استفاده از اتصالات صلب جوش به بستر دریا متصل شده‌اند.

رضوانی و کیاست در سال ۲۰۱۸ [۱۷] یک‌راه حل تحلیلی ارتعاش آزاد در هوا و غوطه‌ور در آب در نرم‌افزار ABAQUS را بر روی ورق لمینیت کامپوزیت و ورق کامپوزیت ساندویچی ارائه دادند. مقایسه نتایج تحلیل مودال اعم از فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها برای ورق لمینیت کامپوزیت و کامپوزیت ساندویچی در هوا و در تماس با آب نشان‌دهنده این بود که دو پارامتر اثر محیط سیال و خواص

² Added Mass

¹ Min

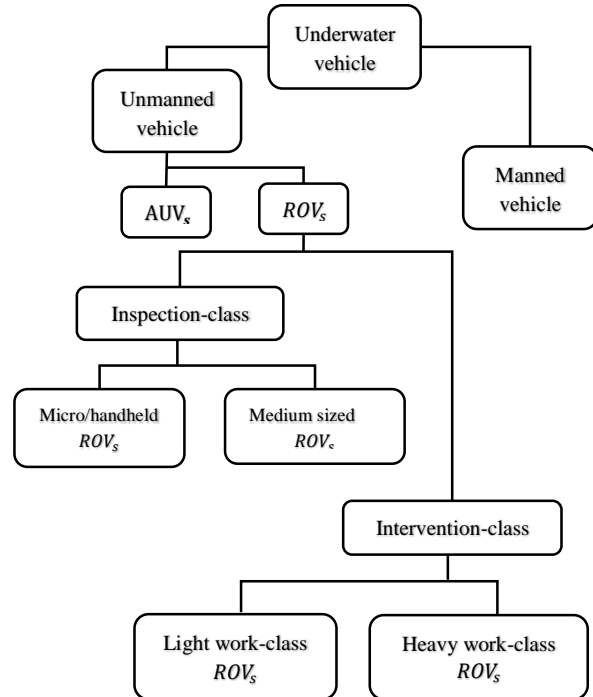
نورافکن‌ها و دیگر لوازم ره‌گیری که امکان کارکرد، هدایت، مسیریابی، کنترل و ناوبری ربات را فراهم می‌سازند، از این جمله‌اند.

۳- الگوی کلی یک ROV

ربات‌های زیرآبی بخاطر استفاده در صنایع نظامی و کاربردهایی که بیان شد اهمیت زیادی دارند اما این فناوری هنوز در ایران بجز در چند پژوهشگاه ناشناخته می‌باشد. برای طراحی ربات زیرآبی در این مقاله تمام تجهیزات از جمله تراسترها و دوربین‌ها متناسب با نیروی درگ و عمق کاری از شرکت‌های معتبر و استانداردها انتخاب شده است. برای طراحی یک ربات زیر آبی نیازمند رعایت الزامات طراحی و همچنین تحلیل استحکامی در خشکی و در زیر آب جهت شناوری مثبت ROV در اعماق عملیات می‌باشد تا ربات زیرآبی در شرایط مختلف مرزی و نیروهای ناشی از درگ و فشارهای هیدرواستاتیک بتواند به انجام عملیات ادامه دهد. علاوه بر اهمیت تحلیل استحکامی و شناوری، تحلیل فرکانس طبیعی در آب و بررسی اثرات جرم افزوده یک از پارامترهای مهم برای طراحی و تحلیل ربات زیرآبی می‌باشد. مسئله ارتعاشات زیرآب در طراحی سازه در منطقه فرکانسی مناسب و با صلبیت کافی و نیز طراحی کنترلر برای اجسام متحرک زیرآب، بسیار حائز اهمیت است. اثر جرم افزوده وجود لزجت سبب می‌شود که فرکانس ارتعاشی در زیرآب در مقایسه با بیرون آب تغییرات قابل توجهی داشته باشد. هنگامی که یک سازه در محیط سیال مرتعش می‌شود مقداری از سیال موجود در اطراف را به همراه خود به ارتعاش درمی‌آورد. اضافه شدن جرم سیال به جرم سازه موجب کاهش فرکانس طبیعی سازه می‌شود. انتخاب مواد سبک با استحکام بالا برای کاهش وزن ربات زیرآبی مهم می‌باشد. در شکل (۲) اجزای اصلی یک ROV و در جدول (۲) مشخصات خواص مکانیکی مواد استفاده شده در چهارچوب و عامل شناوری را نشان می‌دهد. در انتخاب مواد برای چهارچوب و عامل شناوری ربات زیرآبی از موادی که چگالی نزدیک به آب و استحکام بالا در اعماق زیاد را دارند استفاده می‌گردد.

۴- مدل‌سازی ROV

در این مقاله یک ربات زیرآبی به شکل (۳) طراحی و مورد بررسی تحلیل شناوری و فرکانس طبیعی قرار گرفته است.



شکل (۱) طبقه‌بندی ربات‌های زیرآبی ROV [۱۸].

جدول (۱) کاربردهای مهم ROV در کلاس بازرسی و

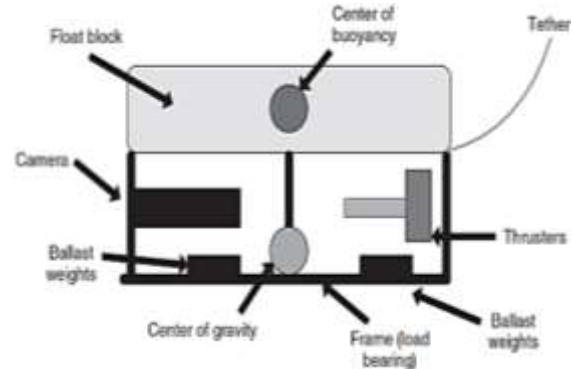
جستجو [۱۸].

کاربرد	مثال‌ها
محیطی	نظارت ساحلی، نظارت زیستگاه، ارزیابی آلودگی
امنیت	بازرسی‌های بدنه و لاشه کشتی، بازرسی‌های ناشی از انفجار
قدرت هیدرولیکی	بازرسی‌های دیوار سد، تشخیص انسداد در ورودی آبیگرها و لوله‌ها
انرژی هسته‌ای	بازرسی و عملیات در مناطق خطرناکی برای انسان‌ها
جستجو و نجات	عملیات جستجو و بازیابی
باستان‌شناسی	نقشه‌برداری منطقه، دوستان غواصی
غیرنظامی	نظارت بر پل و اسکله، بازرسی بنیادین و کلی
آبزی‌پروری	بازرسی خالص، حذف ماهی مرده
نظامی	جستجو و خنثی کردن مین‌ها
علوم	تحقیقات دریایی، مطالعات زندگی دریایی، نمونه‌برداری از دریا
نفت و گاز دریایی	بازرسی لوله و سازه‌های دریایی، تشخیص نشت، عملیات جایگزین غواص
انرژی تجدید ناپذیر	بازسازی سازه‌ها

در نهایت طراح با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در طراحی باید مدل بهینه‌ای برای طراحی ربات پیشنهاد کند. ربات‌هایی زیرآبی در نهایت به واسطه‌هایی متصل هستند که منظور و هدف کاربر را محقق می‌سازند. دوربین‌های تلویزیونی،



شکل (۳) ROV طراحی شده در نرم افزار ABAQUS.



شکل (۲) شکل یک ROV [۱۹].

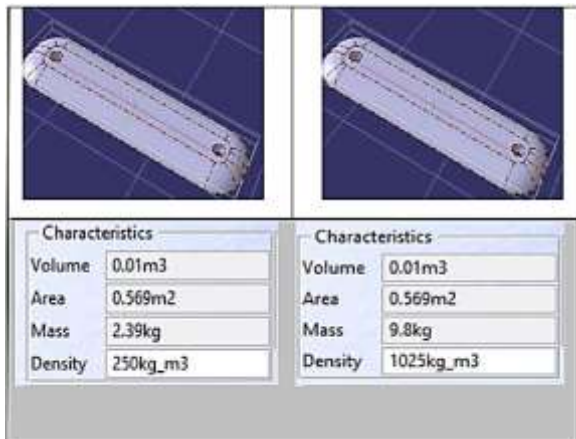
جدول (۳) مشخصات وزن تجهیزات و عامل بویانس و شناوری.

تجهیزات ROV	تعداد	وزن در خشکی (kg)	وزن در آب (kg)	مجموع وزن در آب (kg)
تراستر [۲۲-۲۳]	۶	۱/۹	۱/۴	۸/۴
دوربین [۲۴]	۱	۳	۱/۴	۱/۴
لامپ [۲۴]	۳	۱/۹۸	۰/۸	۲/۴
چهارچوب ABS	۱	۶۲/۹۸	۲/۱	۲/۱
شناوری PVC	۲	۲/۳۹	-۷/۴	-۱۴/۸

فرمول محاسبه شناوری یک سازه زیرآب با استفاده از رابطه (۱) به دست می آید که در رابطه ۱، ρ چگالی، V حجم و g شتاب گرانشی است.

$$F_G - F_B = [\rho_{ABS} V_{ABS} g] + \rho_{PVC} V_{PVC} g - [\rho_{water} V_{equipment} g] \quad (1)$$

به ازای مقادیر مشخص برای چهارچوب ROV و تجهیزات مربوط به آن، مقدار بویانسی حاصل می شود.



شکل (۴) وزن در آب دریا عامل بویانس و وزن در خشکی از PVC.

جدول (۲) خصوصیات مکانیکی ABS^۱ و PVC^۲ [۲۰ و ۲۱].

PVC	ABS	خصوصیات مکانیکی
۰/۲۷۹	۲/۸۹	مدول الاستیسیته فشاری (GPa)
۰/۰۹۸	۱/۰۵	مدول برشی (GPa)
۰/۴۲	۰/۳۹	ضریب پواسون
۶/۵۶	۸۶	استحکام نهایی فشاری (Mpa)
۷/۳۴	۶۰	استحکام نهایی کششی (Mpa)
۲۵۰	۱۰۶۰	چگالی (Kg/m ³)
۴۰٪	۲۵٪	ازدیاد طول در شکست
-	۲۲	شکست خستگی (Mpa)
-	۰/۱۹	هدایت گرمایی (W/mk)

مشخصات تجهیزات نصب شده روی آن در جدول (۳) ارائه شده است که از مراجع [۲۲-۲۶] استخراج گردیده است. وزن ربات زیرآبی در خشکی و در آب برای عامل شناوری و چهارچوب در شکل های (۴) و (۵) ارائه شده است. اجزای مختلف ROV مدل شده، به صورت مجزا طراحی شده و در مونتاژ به صورت اتصال یکپارچه انجام شده است و تمام وزن تجهیزات به سیستم اضافه شده است. مشخصات وزن تجهیزات و عامل شناوری در جدول (۳) ارائه شده است.

در این مقاله چهارچوب اصلی ROV و شاسی تراسترها از ورق جنس ABS مدل می باشد که خصوصیات کلی آن در آب و هوا در شکل های (۴) و (۵) ارائه شده است. در این شکل ها ملاحظه می گردد که چهارچوب ربات زیرآبی مدل شده مانند ساختارهای ROV زیرآبی همانند فالکون و تایگر می باشد و ابعاد آن ۱۰۰ × ۱۳۰ × ۶۵ سانتیمتر است [۹]. همچنین جنس عامل شناوری PVC می باشد که قابلیت استفاده در عمق های زیاد دارا است.

² Polyvinyl Chloride

¹ Acrylonitrile Butadiene Styrene

به طوری که F نیروی کشش، ρ چگالی جرمی آب دریا، C_D ضریب درگ، A مساحت پیش‌بینی شده از جسم و V سرعت جسم است. البته در نرم‌افزار ABAQUS برای اعمال درگ به تمام سطوح ROV از Surface Traction استفاده می‌شود.

$$\text{Drag Surface Traction} = \frac{F_D}{A} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D \quad (4)$$

$$= 0.5 \times 1025 \times 1.53^2 \times 0.25 \sim 300 \text{ N/m}^2$$

برای محاسبه دقیق نیروی بویانسی روی چهارچوب نیز از Surface Pressure استفاده می‌شود که جایگزین نیروی بویانسی چهارچوب زیر آب است و بویانسی سایر تجهیزات به صورت نیروی بویانسی وارد می‌شوند.

$$\text{Bouyancy Surface Pressure} = \frac{F_B}{A} = \rho gh \quad (5)$$

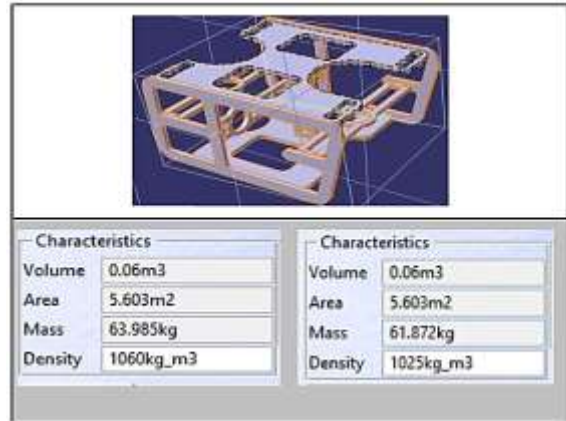
که مقدار h عمق نقاط مختلف چهارچوب از روی سطح آزاد آب با مقدار منفی است.

۶- تحلیل ROV در محیط خشک و زیرآب

در این بخش ربات زیرآبی در شرایط جابه‌جایی در محیط خشک و حرکت در زیرآب مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در آب دستگاه در حالت بویانت می‌باشد و وزن تراستر و سایر تجهیزات نظیر دوربین و لامپ‌های روشنایی فشاری بر چهارچوب و شاسی که قطعات بر روی آن قرار دارند وارد نمی‌شود تا زمانی که تراسترها روشن می‌شوند. اما در خشکی مباحث جابه‌جایی و سهلانگاری کسانی که می‌خواهند ROV را جابجا کنند نیز پیش می‌آید. بنابراین لازم است در حالتی که جابجایی در فضای خارج از آب است مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد.

تحلیل تنش در شرایط داخل آب دریا در راستاهای حرکت رو به بالا، حرکت روبه‌جلو و حرکت چرخشی^۱ انجام می‌شود. برای حالت حرکت ربات زیرآبی در زیرسطح آب، شرایط بحرانی مرزی شامل مقید کردن کف ROV انجام می‌شود تا شرایطی که در زیرآب کف آن در باتلاق و گل گیر می‌کند شبیه‌سازی شود.

برای شرایط بارگذاری، نیروهای حاصل از فشار هیدرواستاتیک، گرانش و درگ در تحلیل اعمال می‌شود. نتایج تنش برای حرکت به سمت جلو، بالا و حرکت چرخشی به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۷) ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل تنش در شرایط و حرکت‌های مختلف نشان دهنده انتخاب مناسب مواد برای چهارچوب و عامل شناوری،



شکل (۵) وزن چهارچوب در آب و خشکی از ABS.

مقدار تفاضل نیروی گرانشی و نیروی شناوری از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$F_G - F_B = -5.2N \quad (2)$$

وزن کل سازه در آب تقریباً معادل ۰/۵ کیلوگرم بویانسی مثبت می‌باشد که در صورت خرابی تراسترها یا قطع شدن منبع تغذیه ربات زیرسطحی خود به خود به سطح آب بازگردد. در این مدل ROV چیدمان اجزا مختلف طوری انجام می‌گیرد تا ضمن وزن و حجم کمتر وسیله، نکاتی رعایت گردد. از جمله این نکات، باتوجه به آنکه ROV می‌بایست در جهات پیچ و رول به صورت غیرفعال پایدار باشد، چیدمان اجزا باید به‌گونه‌ای باشد که در ROV تقارن وجود داشته باشد و وسیله بایستی زیرآب تقریباً بی‌وزن باشد تا در هنگام حرکت عمقی آن نیاز به توان زیادی نباشد.

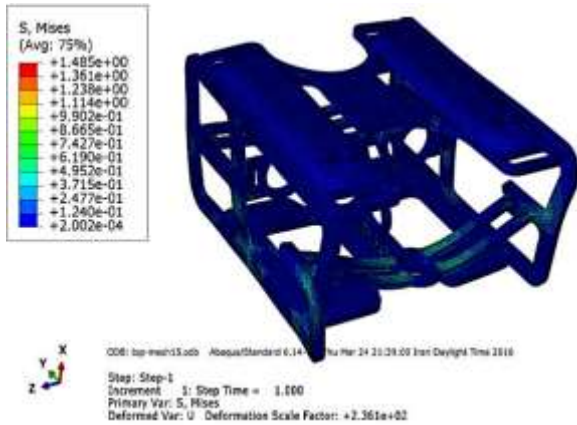
۵- محاسبه نیروی درگ وارد بر ROV

انتخاب سیستم رانش برای یک ROV به دو عامل بستگی دارد اول اینکه باید برای توان مورد نیاز شناور کافی باشد و نیز اینکه با توجه به ابعاد شناور فضای کافی برای نصب و به کارگیری را داشته باشد و با توجه به این مسئله که نیروی بیشتر پیشران، تجهیزات روی ربات کنترلی زیرسطحی را سنگین‌تر می‌کند [۱۷ و ۲۷].

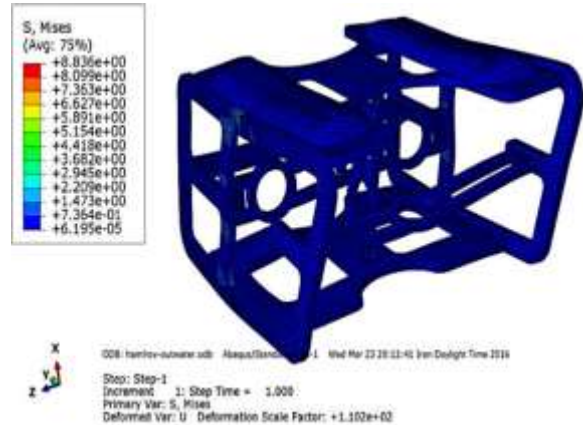
برای محاسبه درگ نیاز به تقریب ضریب درگ و همچنین سرعت حداکثر در آب (3Knot) معادل 1.53 m/s می‌باشد در رابطه (۳) نیروی درگ وابسته به سرعت در آب و سطح مقاوم دیده می‌شود [۱۸].

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (3)$$

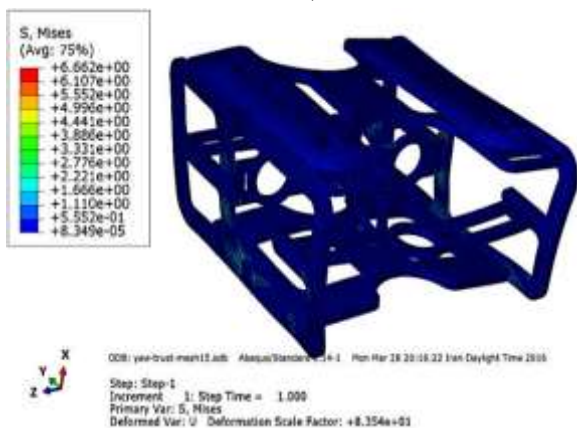
^۱ Yaw



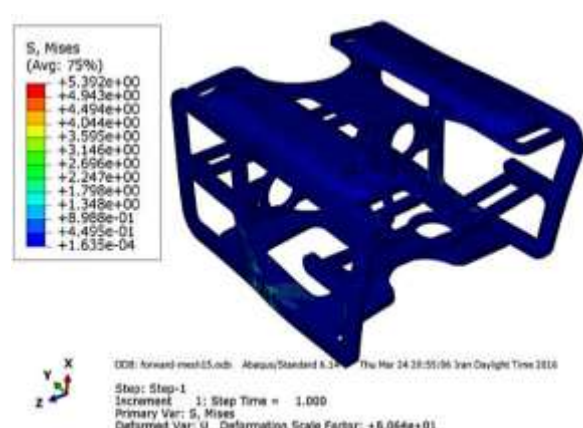
شکل (۸) کانتور تنش برای ROV زیر آب حرکت تراستر رو به بالا.



شکل (۶) کانتور تنش برای حمل و نقل خارج از آب.



شکل (۹) کانتور تنش برای ROV زیر آب حرکت چرخشی.



شکل (۷) کانتور تنش برای ROV زیر آب در حرکت رو به جلو.

اهمیت به دست آوردن فرکانس طبیعی از اینجا مشخص می‌شود. فرکانس طبیعی سازه در هوا نسبت به فرکانس آن در آب بیشتر می‌باشد زیرا در آب فاکتور جرم افزوده به جرم سازه افزوده می‌شود.

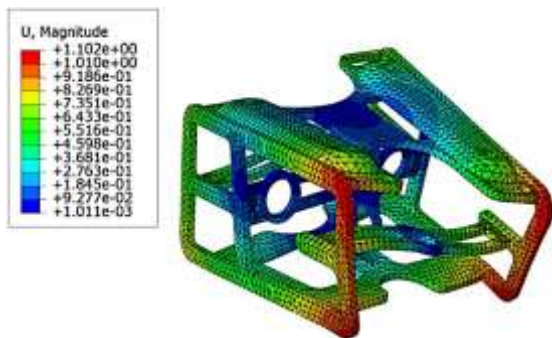
لذا باعث کاهش فرکانس سازه می‌شود [۲۸-۲۹]. برای تحلیل فرکانس طبیعی ROV در خشکی و زیر آب جرم و ممان اینرسی راستای مختلف تجهیزات محاسبه شده در جدول ۵ ارائه شده و در نرم افزار ABAQUS اعمال گردیده است. این اعداد از مدل‌های ارائه شده از مراجع [۲۶-۲۲] استخراج گردیده است. همچنین برای تحلیل آکوستیک مدول بالک $(B=\rho v)$ که چگالی و v سرعت صوت در سیال است. مشخصات جنس سیال در جدول (۴) ارائه شده است. در جدول (۴)، ρ چگالی آب دریا و B مدول بالک سیال می‌باشد. در قسمت Verification که یکی از بخش‌های Help نرم افزار ABAQUS است تعداد زیادی مسئله حل شده در زمینه های مسایل آکوستیکی فراوانی ارائه شده است که صحت عملکرد نرم افزار ABAQUS را در حوزه مسایل

تراستر و تجهیزات مناسب بر روی ROV با توجه به تحلیل‌های انجام شده می‌باشد. بیشترین تنش فون میزمر مربوط به ROV در خشکی بوده است. نتایج به دست آمده با توجه به فرضیات و خصوصیات مکانیکی مواد عامل شناوری، چهار چوب و تجهیزات انتخاب شده قابل قبول است.

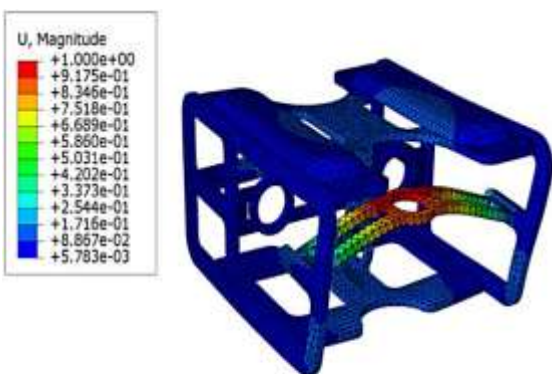
۷- تحلیل فرکانس ROV در خشکی و آب

مطالعه رفتار ارتعاشی سازه‌های دریایی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی سازه در کنار طراحی هیدرو مکانیکی سازه است. ارتعاش موضعی و یا عمومی بدنه سازه در مجاورت آب کاملاً متفاوت با ارتعاش بدنه خارج از آب و در مجاورت هوا است زیرا وقتی سازه در تماس با آب قرار می‌گیرد دو پدیده جرم و دمپینگ افزوده به وجود می‌آید که باعث تغییر در فرکانس طبیعی سازه می‌گردد. محاسبه فرکانس طبیعی سازه‌ها از آن جهت مهم می‌باشد در صورتی که فرکانس سازه به فرکانس طبیعی آن نزدیک شود سازه دچار تشدید می‌شود و باعث نابودی سازه می‌شود.

نتایج حاصل از تحلیل فرکانس طبیعی در هوا برای مود اول و دوم در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. وقتی جسمی در سیالی با چگالی قابل‌ملاحظه دارای حرکت شتابدار باشد، به‌واسطه شتاب جسم، سیال اطراف آن به حرکت درمی‌آید. بنابراین نیرویی اضافه جهت شتاب دادن به سیال اطراف جسم لازم است. معمولاً برای مشخص کردن این نیروی اضافی فرض می‌شود جرم جسم مقداری بیش از جرم اصلی آن است که به این جرم، جرم افزوده گفته می‌شود [۳۳]. زمانی که یک جسم درون آب شتاب می‌گیرد، حرکت جسم سیال اطراف جسم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر سبب افزایش انرژی جنبشی سیال اطراف می‌شود [۳۴]. مفهوم جرم افزوده به اینرسی سیال اطراف جسم که در اثر حرکت جسم ایجاد شده است اشاره دارد. در معادلات دینامیک حرکت و شبیه‌سازی هیدرودینامیک حرکت یک جسم در سیال باید جرم افزوده مدنظر قرار گیرد.



شکل (۱۱) تحلیل فرکانس مود اول ۱۹/۷۱۲ در هوا.



شکل (۱۲) تحلیل فرکانس مود دوم ۲۴/۰۸۸ در هوا.

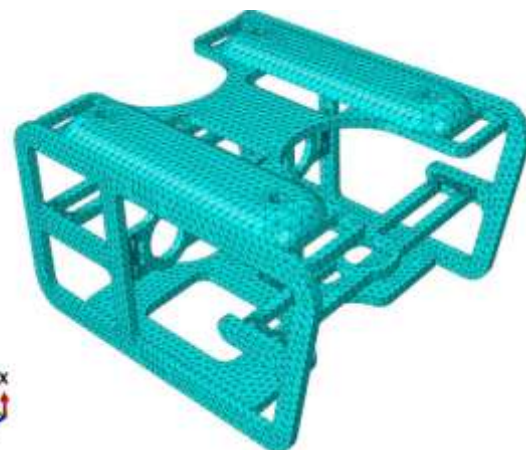
آکوستیکی نشان می‌دهد [۲۹]. برای دقت و صحت این روش یک ورق را رضوانی و همکاران با استفاده از نتایج تجربی و نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیل آکوستیکی در نرم‌افزار ABAQUS را مقایسه نموده و اعتبارسنجی انجام شده است [۳۰، ۳۱]. برای صحت‌سنجی این روش ابتدا نتایج حاصل از تحلیل آکوستیکی در نرم‌افزار ABAQUS با نتایج رضوانی و همکاران اعتبارسنجی انجام شده و برای تحلیل ROV مورد استفاده قرار گرفته است [۳۲]. برای مدل‌سازی ROV در خشکی، مدل‌سازی المان مورد استفاده المان C3D10 بوده که یک المان پیوسته، سه‌بعدی درجه‌ی دو و دارای نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشد. شبکه‌بندی ROV مدل شده به‌صورت free صورت گرفته است که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود. در این مقاله نتایج عددی فرکانس طبیعی ROV در هوا و مغروق در آب به روش آکوستیک تحت شرایط مرزی چهار طرف آزاد به‌صورت نمایش مود اول و دوم ارائه می‌شود. در حالت ارتعاش در آب، نمای آب بیرونی اطراف ROV به دلیل مشاهده مودها برداشته شده ولی در محاسبات تأثیر داده شده است.

جدول (۴) مشخصات جنس سیال [۲۸].

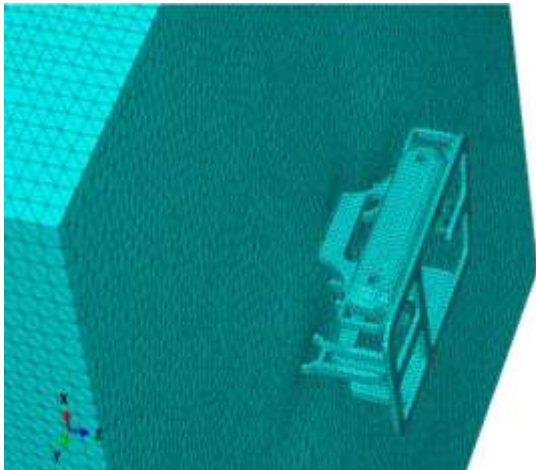
$\rho(kg/m^3)$	B(GPa)
۱۰۲۵	۲/۷۰

جدول (۵) ممان اینرسی برای تجهیزات.

تجهیزات	دوربین	لامپ	تراستر
$I_{xx} (tonne * mm^2)$	۱۴/۶۱	۹/۲۷	۳/۹۸
$I_{zz} (tonne * mm^2)$	۴۸/۳۲	۳۱/۱	۹/۴۴
$I_{yy} (tonne * mm^2)$	۶/۷۶	۴	۹/۵۸

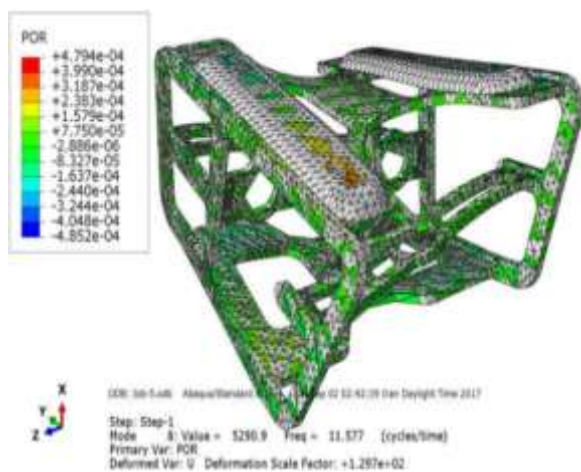


شکل (۱۰) مش ریزی ROV در تحلیل فرکانس در هوا.

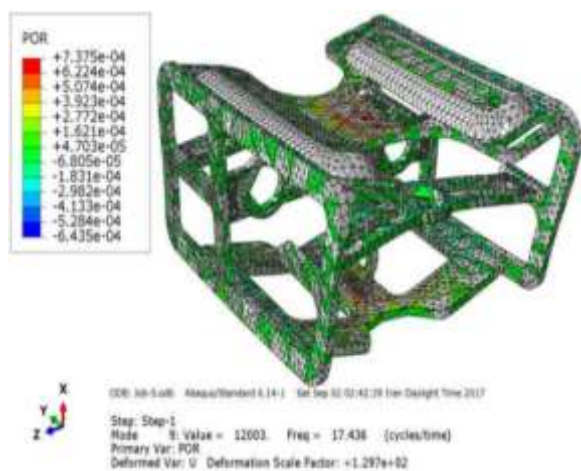


شکل (۱۳) مش ریزی ROV در تحلیل فرکانس در آب.

که حدود ۵ برابر ابعاد وسیله در زیر آب است. نتایج آنالیز مودال در اشکال (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۴) فرکانس مود اول ۱۱/۵۷۷ در آب.



شکل (۱۵) فرکانس مود دوم ۱۷/۴۳۶ در آب.

البته برای حالتی که جرم سیال متحرک حول جسم به نسبت جرم جسم کم می‌باشد این عبارت قابل صرف نظر است [۳۵]. از این رو در جریان‌های اجسام در هوا معمولاً اثرات جرم افزوده صرف نظر می‌شود اما زمانی که جسم مانند وسیله زیرآبی در داخل آب حرکت می‌کند با توجه به بالا بودن چگالی آب و زیاد بودن جرم آب در هنگام حرکت وسیله زیرآبی جملات جرم افزوده حائز اهمیت می‌شوند و باید منظور گردند [۳۶]. با توجه به اینکه طراحی وسیله زیرآبی به صورت تجربی دارای هزینه بسیار بالایی می‌باشد استفاده از شبیه‌سازی به منظور دستیابی به طراحی بهینه و نیز مدل‌سازی برای اعمال تغییرات و بهینه کردن پارامترهای طراحی امری ضروری است. آنالیز مودال سازه‌های ثابت و متحرک دریایی به منظور به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها، در طراحی مهندسی یکی از نکات بسیار مهم می‌باشد. زیرا همان‌طور که می‌دانیم در صورتی که فرکانس تحریک سازه نزدیک به فرکانس طبیعی آن شود سازه دچار تشدید خواهد شد که در عملکرد تجهیزات تاثیر منفی خواهد داشت. در این مقاله با استفاده از حل عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS به محاسبه فرکانس‌های طبیعی شناوری با ابعاد دلخواه و در نهایت به بررسی شکل مودها در هر فرکانس پرداخته می‌شود.

برای مدل‌سازی ROV و محیط آب اطراف آن، هر دو المان مورد استفاده C3D10 و AC3D10 بوده که المان پیوسته، سه‌بعدی درجه‌ی دو و دارای نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشند. شبکه‌بندی ROV مدل شده به صورت free است و همچنین اندازه مش ریزی ROV در آب و خارج از آب یکسان می‌باشد.

در شکل (۱۳) شبکه‌بندی در آب ملاحظه می‌شود که به خاطر مشاهده دقیق ROV شبکه اطراف نیمه متقارن آن نشان داده نشده است. لازم به ذکر است جهت بررسی اندازه المان، شبکه در چند مرحله ریز شده و همگرایی بررسی گردیده است. برای مدل سیال اطراف سازه، می‌بایست ابعاد سیال تا جایی زیاد شود که افزایش حجم دیگر تغییری بر روی فرکانس‌های سازه ایجاد نکند و فرکانس‌های به دست آمده در ابعاد مختلف سیال همگرا شوند و به جواب‌های ثابتی برسند. از این رو پس از شبیه‌سازی آب با ابعاد مختلف در نهایت ابعاد سیال به صورت مکعب مربع ۵۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شد.

از نظر شکل مودهای سازه نیز شکل مودهای به دست آمده از ارتعاش یک سازه مغروق با شکل مودهای حاصل از ارتعاش همان سازه در هوا تفاوتی ندارد و محیط سیال هیچ تأثیری بر شکل مودها ندارد (شکل‌های (۱۱) تا (۱۵)).

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از حل عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS به محاسبه تحلیل استحکامی و فرکانس‌های طبیعی ROV در خلأ و در آب پرداخته شده و در نهایت تحلیل تنش و شکل مودها در فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل ROV در حالت‌های بحرانی در خارج از آب، در زمانی که تراسترها روشن می‌باشد تنش‌ها نزدیک ۹ مگا پاسکال محاسبه شد. با توجه به استحکام نهایی مواد استفاده شده قابلیت تحمل در شرایط بحرانی را دارند. برای تحلیل ROV در زیرآب در شرایط مرزی بحرانی که در باتلاق یا لجن گیر کرده است.

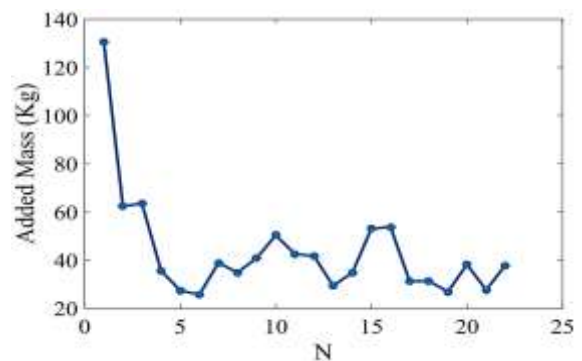
نتایج تحلیل تنش‌های وارده به بدنه ROV نشان می‌دهد که چهارچوب می‌تواند در حالت بحرانی استحکام بالایی داشته باشد و در اثر قرار گرفتن در شرایط با کمترین آسیب به انجام عملیات جستجو ادامه دهد.

برای تحلیل فرکانس از نظر شکل مودهای سازه، شکل مودهای به دست آمده از ارتعاش مغروق با شکل مودهای حاصل از ارتعاش همان سازه در هوا تفاوتی ندارد و محیط سیال هیچ تأثیری بر شکل مودها ندارد. در تحلیل برای مدل سیال اطراف سازه، ابعاد سیال تا جایی که افزایش حجم دیگر تغییری بر روی فرکانس‌های سازه ایجاد نکند و فرکانس‌های به دست آمده در ابعاد مختلف سیال همگرا شوند و به جواب‌های ثابتی برسند ابعاد سیال به صورت مکعب مربع ۵۲۰۰ میلی‌متر محاسبه شده است که حدود ۵ برابر ابعاد وسیله در زیرآب است. بر اساس تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS نمودار فرکانسی تا ۲۲ مود اول را برای شناور در سیال و خشکی (شکل (۱۷)) در فرکانس‌های بالا دو منحنی با یکدیگر حدوداً اختلاف یکسانی دارند و نشان می‌دهند که کاهش فرکانس ناشی از محیط آب، ارتباط کمتری با عدد فرکانس دارد که این نتیجه کلی برای تمام سازه‌های در تماس با سیال می‌باشد و همچنین با افزایش عدد مود، جرم افزوده کاهش می‌یابد (شکل (۱۶)). فرکانس طبیعی ربات زیرآبی در تماس با محیط آب کمتر از فرکانس

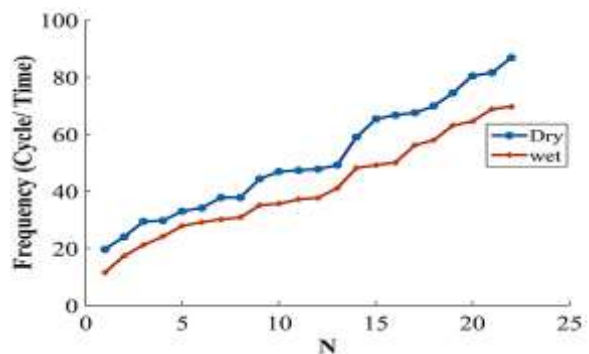
با ملاحظه شکل مودهای سازه در هوا و آب یافت می‌شود که شکل مود سازه در هوا و آب برای نمونه‌ها یکی است و تغییر محیط سیال تأثیری بر شکل مودهای سازه‌ها ندارد. همان‌طور که می‌دانیم جرم افزوده شناور در سیال با فرکانس در سیال و خلأ به صورت زیر مرتبط می‌باشد. که m جرم شناور و m_a جرم افزوده سیال به سازه، همچنین ω_f فرکانس سازه در سیال و ω_v فرکانس سازه در خلأ می‌باشد. مقدار جرم ROV در هوا حدود ۷۰ کیلوگرم می‌باشد. فرمول محاسبه جرم افزوده در معادله (۶) آمده است [۳۷]. با استفاده از این فرمول نمودار جرم افزوده شکل (۱۶) حاصل می‌شود.

$$\frac{\omega_f}{\omega_v} = \sqrt{\frac{m}{m_a + m}} \quad (۶)$$

در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با افزایش عدد مود، جرم افزوده کاهش می‌یابد. همچنین نمودار فرکانسی تا ۲۲ مود اول را برای ROV در سیال و خلأ در شکل (۱۷) آمده است. در شکل (۱۷) در فرکانس‌های بالا دو منحنی تقریباً اختلاف یکسانی دارند نشان می‌دهد که کاهش فرکانس ناشی از محیط آب، ارتباط کمتری با عدد فرکانس دارد.



شکل (۱۶) نمودار جرم افزوده بر حسب مود.



شکل (۱۷) نمودار فرکانس بر حسب عدد مود برای ROV در خلأ و آب.

- [13] Min, C.H., Park H., Yoo J.H., and Jung H.G.. "An Experimental Study on High-Frequency Vibration Analysis of a Circular Cylindrical Shell in Contact with Water", In The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
- [14] Rezvani, S., and Kiasat M.S. "Analytical and Experimental Investigation on the Free Vibration of a Floating Composite Sandwich Plate Having Viscoelastic Core." Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol.18, No.4, pp.1241-1258, 2018.
- [15] Shahrabadi, M. A., H. Salarieh, and R. Dehghani Firouzabadi. "Experimental Study on the Effects of Water Depth in Frequency Reduction of Slender Bodies." Aerospace Mechanics Journal, Vol.9, No.2, pp.41-53, 2013.
- [۱۶] [سیدساعت رضوانی، سعیدکیاست مهدی، معصومی شهروز. "شبیه سازی ارتعاش پایه جاکت سکوی نفتی تحت نیروی موج در شرایط مختلف اتصال به کف دریا." صص ۶۸-۷۶. دو فصلنامه علمی- پژوهشی دریا فنون، ۱۳۹۴.
- [17] Rezvani, S. and Kiasat M.S., "Analytical and Experimental Investigation on the Free Vibration of a Floating Composite Sandwich Plate Having Viscoelastic Core", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol.18, No.4, pp.1241-1258, 2018.
- [18] Capocci, R, Dooly G., Omerdić E., Coleman J., Newe T., and Toal D.. "Inspection-Class Remotely Operated Vehicles A Review." Journal of Marine Science and Engineering, Vol.5, No.1, pp.13, 2017.
- [19] Christ, Robert D., and Robert L. Wernli Sr., "The ROV Manual: A User Guide for Remotely Operated Vehicles. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [20] <https://www.eplastics.com/sheets/abs/textured-general-purpose>
- [21] www.gurit.com. Gurit® PVC Structural Foam Material is a Cross-Linked PVC Foam for Composite Applications.
- [22] http://www.tecnadyne.com/THRUSTER_560
- [23] http://cornerstonerobotics.org/curriculum/lesson_s_year3/eriii10_buoyancy2
- [24] www.seaeye.com subseay company. Specialists in the Design and Manufacture of Remotely Operated Vehicles
- [25] Dally, William R., and Robert George Dean. "Conceptual Design of a Remotely Operated Vehicle for Beach Surveying.", 1989.
- [۲۶] [آقدیر احمدی جید، و محمد گندم کار، تحلیل استحکامی چهارچوب یک ربات زیرآبی کنترل از راه دور (ROV) جهت جستجو و بازدید در اعماق دریا، دومین همایش بین المللی مهندسی مکانیک، صنایع و هوافضا، همدان، دبیرخانه دائمی همایش، ۱۳۹۷.
- آن در محیط هوا است و می توان تأثیر پارامتر جرم افزوده و دمپینگ آب را در فرکانس طبیعی مشاهده نمود.
- ### ۹- مراجع
- [1] Zanolli, S. M., and Giuseppe C., "Remotely Operated Vehicle Depth Control", Control Engineering Practice, Vol.11, pp.453-459, 2003.
- [2] Christ, D., and L. Wernli., "TheROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles." 2007.
- [3] Cooke, Nancy J. "Human Factors of Remotely Operated Vehicles." In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol.50, No.1, pp.166-169. Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications, 2006.
- [4] Wang, Wei., "Autonomous Control of a Differential Thrust Micro Rov", Master's Thesis, University of Waterloo, 2007.
- [5] Caccia, M., Giovanni Indiveri, and Gianmarco Veruggio. "Modeling and Identification of Open-Frame Variable Configuration Unmanned Underwater Vehicles", IEEE journal of Oceanic Engineering, Vol.25, No.2, pp.227-240, 2000.
- [6] Said, M. Farid Muhamad, I. S. Roslan, and SA Abu Bakar., "Conceptual Design of Remotely Operated Underwater Vehicle", Journal of Transport System Engineering, Vol.2, pp.15-19, 2015.
- [7] Svendby, E. "Robust Control of ROV/AUVs." Master's Thesis, Institutt for Teknisk Kybernetikk, 2007.
- [8] Gomes, Rui MF, A. Martins, Alexandre Sousa, J. B. Sousa, S. L. Fraga, and F. Lobo Pereira. "A New ROV Design: Issues on Low Drag and Mechanical Symmetry", In Oceans IEEE, Europe, Vol.2, pp.957-962, 2005.
- [9] Marzbanrad, A., Sharafi J., Eghtesad, M., and Kamali, R., "Design, Construction and Control of a Remotely Operated Vehicle (ROV)." In ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, pp.1295-1304, 2011.
- [۱۰] [غلامرضا وثوقی، آریا الستی و حسین برهان، مدل سازی، طراحی و ساخت یک خودرو کنترل از راه دور زیر سطحی (Underwater ROV) جهت انجام عملیات بازرسی زیر آب، ششمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، بندرعباس، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۳.
- [۱۱] [مکفایی، یزدخواستی و طهماسبی. "طراحی ROV لوله گذار". پایان نامه کارشناسی دانشگاه صنعتی مالک اشتر. ۱۳۸۹.
- [12] Zienkiewicz, O. Co. "Coupled Vibrations of a Structure Submerged in a Compressible Fluid." In Proc.of Symposium on Finite Element Techniques Held at the University of Stuttgart. 1969.

- [27] Azis, F.A., Aras, M.S.M., Rashid, M.Z.A., Othman, M.N. and Abdullah, S.S., "Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study", *Procedia Engineering*, Vol.41, pp.554-560, 2012.
- [28] Robinson, N.J., and Palmer S.C.. "A Modal Analysis of a Rectangular Plate Floating on an Incompressible Liquid." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.142, No.3, pp.453-460, 1990.
- [29] ABAQUS 6.14 Documentation, 2017.
- [۳۰] سیدساعده رضوانی و حمید فاضلی، "مقایسه حل عددی، تحلیلی و تجربی فرکانس طبیعی صفحه تقویت شده مغروق در سیال"، دوازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، زبکانار، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۹.
- [۳۱] سید ساعده رضوانی، مهدی سعید کیاست، "آنالیز ارتعاش آزاد ورق کامپوزیت ساندویچی با هسته فوم ویسکوالاستیک در تماس با محیط آب". فصلنامه علمی-پژوهشی دریا فنون. ص ۲۴-۳۰، ۱۳۹۶.
- [۳۲] قدیر احمدی جید، و محمد گندم کار، "تحلیل فرکانس طبیعی یک ورق تقویت شده در هوا و آب و بررسی اثرات جرم افزوده"، دومین همایش بین المللی مهندسی مکانیک، صنایع و هوافضا، همدان، دبیرخانه دائمی همایش، ۱۳۹۷.
- [۳۳] آرش شادلاقانی، شهریار منصورزاده، محمد علی بدری، "شبیه سازی عددی ضرایب میرایی و جرم افزوده یک شناور زیرسطحی در آب عمیق". روش های عددی در مهندسی. نسخه ۳۳، شماره ۲، ص. ۱۳۱-۱۴۵، ۱۳۹۳.
- [34] Birkhoff, G. "Hydrodynamics: A study in fact logic and similitude.", 1950.
- [35] Brennen, C. E. "A Review of Added Mass and Fluid Inertial Forces". BRENNEN (CE) SIERRA MADRE CA, 1982.
- [36] Khoury, Gabriel A., and David Gillett J., "Airship Technology (Cambridge Aerospace Series)", pp.39-71, 2004.
- [37] Liang, C.C., Liao C.C., Tai Y.S., and Lai, W.H. "The Free Vibration Analysis of Submerged Cantilever Plates." *Ocean Engineering*, Vol.28, No.9 1225-1245, 2001.