

پیاده‌سازی الگوریتم تخمین عمر خستگی پوسته کامپوزیتی شناور تندرو تحت بار نوسانی فشار دریا

محمد نادریان^۱، عبدالرضا کبیری عطاآبادی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه مالک اشتر، mohammadnaderian88@gmail.com

^۲ استادیار مجتمع مکانیک، دانشگاه مالک اشتر، a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

چکیده

با توجه به استفاده روزافزون کامپوزیت‌ها در بدنه‌ی شناورها و قرارگرفتن مداوم در معرض بارهای نوسانی، در این تحقیق به پیاده‌سازی الگوریتم تخمین عمر خستگی پوسته کامپوزیتی شناور تندرو پرداخته می‌شود. در این راستا ابتدا الگوریتم مدل خستگی انتخاب شده که بر مبنای کاهش خواص مکانیکی و متغیر آسیب به تحلیل سازه موردنظر می‌پردازد، معرفی می‌گردد. این مدل با استفاده از زیربرنامه UMAT در نرم‌افزار آباکوس، اجرایی شده و مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. سپس با محاسبه بار اسلمینگ از استاندارد DNVGL و مشخصات شناور، ضخامت پوسته تعیین شده و بر اساس مدل خستگی موردنظر عمر خستگی پوسته‌ی بدنه شناور تندرو تحت فشار نوسانی دریا تحلیل می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد مدل خستگی مورد استفاده قابلیت مناسبی از لحاظ اجرا در نرم‌افزار برای تخمین عمر دارد. همچنین در صورت طراحی پوسته بر مبنای فشار اسلمینگ و با توجه به ضریب اطمینان پیشنهادی عمر خستگی پوسته در بارگذاری فشار دریا بسیار زیاد است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

کلمات کلیدی:

شناور تندرو

خستگی

تخمین عمر

کامپوزیت بافته‌شده

Implementation of Life Estimation Algorithm of Composite High Speed Craft Shell due to Cyclic Sea Pressure

Mohammad Naderian¹, Abdulreza Kabiri Ataabadi^{2*}

¹ M.Sc., Malek Ashtar University of Technology; mohammadnaderian88@gmail.com

² Assistant Professor of Malek Ashtar University of Technology-Mechanical Engineering, a.kabiri.at@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 24 Jun. 2020

Accepted: 07 Dec. 2020

Keywords:

High speed craft

Fatigue

Determine the fatigue life

Woven composite

ABSTRACT

According to increasing use of composites in high speed craft and exposing continuously to cyclic load, in this research, implementation of fatigue life estimation algorithm of composite shell of high speed craft has been done. The selected fatigue model which is based on reduction of mechanical properties and damage variable is introduced. This model has been implemented in finite element code (abaqus) with UMAT subroutine and validated with available results. Then, by using slamming load calculated from DNVGL standard and craft properties, the shell thickness is determined and fatigue life of the shell is analyzed with the faigue model due to the cyclic sea pressure. The results show that, the used faigue model has adequate ability for impelementation in the FEM software to fatigue life estimation and if the shell is designed with slamming pressure and assumed safety factor, the fatigue life due to cyclic sea pressure will be very high.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد مواد مرکب در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی (شناورهای تندرو)، صنایع هوافضا صنایع خودروسازی پیشرفت محسوسی داشته است. از ویژگی‌هایی که باعث کاربرد وسیع این مواد در صنایع شده است، می‌توان به نسبت حجم به وزن پایین (سبک بودن)، سفتی ویژه بالا، کارایی مناسب استحکام به چگالی (استحکام بالا)، خصوصیات خستگی بهتر نسبت به فلزات و قابلیت استفاده در درجه حرارت بالا اشاره کرد [۱]. بنابراین مطالعه در زمینه مواد مرکب از نیازهای اساسی صنایع مختلف به ویژه صنایع دریایی است. یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در خصوص رفتار مواد مرکب، بررسی مکانیک آسیب و ازهم‌گسیختگی این مواد می‌باشد. در بررسی آسیب مواد مرکب، بسته به نوع بارگذاری، تحلیل آسیب متفاوت است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آسیب سازه‌های کامپوزیتی ناشی از بارهای نوسانی کمتر از استحکام سازه (خستگی) اشاره کرد [۲]. بدنه خارجی شناورهای تندرو به سبب ماهیت رفتاری و حرکت سطحی بر روی آب همواره تحت تأثیر بارهای مختلف از جمله بارهای ناشی از ضربه موج، فشار نوسانی دریا، کشش شناور، فرود با سرعت و... قرار دارد. همچنین بدنه داخلی شناورهای تندرو نیز بارهای نوسانی مختلف از جمله لرزش موتور را تحمل می‌کند. به‌طور قطع این بارهای متغییر و نوسانی عامل بسیاری از صدمات اساسی به بدنه شناورهای تندرو است و باعث شکست در پوسته کامپوزیتی بدنه شناور در تنش‌هایی بسیار کمتر از تنش تسلیم می‌گردد. لذا همواره تحلیل و بررسی خستگی و تخمین عمر مفید خستگی، به عنوان یکی از ملاحظات مهم طراحی مورد توجه پژوهشگران می‌باشد. با وجود مطالعات و تحقیقات متعددی که در زمینه خستگی کامپوزیت‌ها انجام گرفته، اما هنوز این تحقیقات برای ارزیابی عمر خستگی و رفتار صحیح خستگی در تمام شرایط کافی نیست و به بررسی بیشتر فرایندها و عوامل مؤثر در آن‌ها نیازمند است. پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه خستگی کامپوزیت‌ها و همچنین تکامل روابط و تئوری‌های آنها شامل چندین مرحله و دارای بخش‌های متفاوتی می‌باشد. از جمله تحقیقات اولیه‌ای که در زمینه تحلیل و بررسی خستگی کامپوزیت‌های با الیاف تقویت شده ارائه شد مطالعات بولر^۱ [۳] در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی و به دنبال آن اوون^۲ و همکارانش [۴] می‌باشد. این محققین به‌طور کلی رفتار خستگی کامپوزیت‌های با الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج این محققین حاکی از این بود که ترک ایجاد شده در رزین، اولین چیزی است که باعث کاهش استحکام نمونه می‌شود. آن‌ها قانونی به نام آسیب خستگی تجمعی را ارائه کردند که مستقل از تنش و وابسته به نسبت تعداد چرخه زده شده به تعداد چرخه منجر به شکست بود. هاشین و روت^۳ [۵] نیز یکی از اولین معیارهای خستگی کامپوزیت بر پایه منحنی‌های S-N را ارائه دادند. این محققین مودهای خرابی

الیاف و رزین را با سه منحنی S-N از انجام آزمایش روی نمونه‌های شیشه/اپوکسی در جهات مختلف کامپوزیت و تحت بارگذاری تک‌محوری متناوب به‌دست‌آوردند. همچنین هالپین^۴ و همکاران [۶] نخستین مدل خستگی را بر پایه افت استحکام باقی‌مانده^۵ در دسته مدل افت تدریجی^۶، ارائه کردند، این مدل مشابهت زیادی به انباشت آسیب در فلزات داشت. آن‌ها فرض کردند که فرآیند انباشت آسیب در کامپوزیت‌ها می‌تواند مشابه با فلزات، به‌صورت رشد ترک‌های مویی و تشکیل یک ترک اصلی مدل شود. کورتیس و مور^۷ [۷] عملکرد خستگی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف بافته شده را با الیاف تک‌جهته مقایسه کردند. مطالعات آن‌ها بر روی کامپوزیت کربن/اپوکسی با لایه‌چینی مختلف تحت بارگذاری خستگی کشش-فشار انجام شد. ون و یزدانی^۸ [۸] مدل آسیب غیرهمسانگرد که بر پایه سفتی باقی‌مانده^۹ است را برای کامپوزیت‌های بافته شده شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خستگی کشش-کشش ارائه و با نتایج تجربی مقایسه کردند. این محققین تطابق خوبی بین نتایج تحلیلی خود و داده‌های آزمایشی مشاهده کردند. بینر و یوهاس^{۱۰} [۹] نیز به بررسی و پیش‌بینی رشد ترک خستگی در کامپوزیت‌های بافته شده در اطراف بریدگی پرداختند. همچنین نایک^{۱۱} [۱۰] مکانیسم تجمع آسیب را در کامپوزیت‌های حاوی الیاف بافته شده مورد مطالعه قرار داد. تحقیقات وی نشان داد که نرخ تجمع آسیب در مراحل اولیه خستگی به علت تمرکز تنش زیاد است. سپس با توجه به ماهیت بافته بودن کامپوزیت، نرخ تجمع آسیب در مراحل میانی کاهش می‌یابد. در مرحله نهایی به علت اینکه تمام مودهای آسیب رشد می‌کنند نرخ تجمع آسیب به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. ماو و مهادهوان^{۱۲} [۱۱] یک مدل ریاضی برای تعیین انباشت آسیب خستگی در مواد کامپوزیت توسعه دادند. در این تحقیق ویژگی‌های رشد آسیب در مواد کامپوزیت مطالعه شد و با رشد آسیب در مواد همگن مقایسه گردید. به علاوه، مفهوم مکانیک آسیب پیوسته برای ارزیابی تخریب مواد کامپوزیت تحت بارگذاری نوسانی توسط آن‌ها استفاده شده است. این مدل قادر به پیش‌بینی رفتار خستگی کامپوزیت‌های لایه‌ای متعامد و بافته شده است. هوچارد و تولون^{۱۳} [۱۱] مدل آسیب تجمعی غیرخطی تعمیم‌یافته^{۱۴} را برای رشد آسیب و کرنش غیر الاستیک در جهت برشی لایه‌های کامپوزیت بافته شده ارائه دادند. این مدل توانایی توصیف از مراحل اولیه تا زمانی که تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی منجر به شکست شود را دارد. ویکاکسونو و چای^{۱۵} [۱۲] نیز به توسعه مدل آسیب پیش‌رونده^{۱۶} برای تعیین خواص مواد کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که کاهش مدول نسبت به لگاریتم تعداد چرخه، خطی است. سپس از این پدیده برای تعمیم یک مدل ساده به منظور پیش‌بینی آسیب پیش‌رونده در سازه‌های ساخته شده از مواد کامپوزیت حاوی الیاف بافته شده استفاده کردند. همچنین در تحقیقی دیگر ویکاکسونو و چای [۱۳]

وزن شناور [ton]	Δ	۵
سرعت شناور [Knot]	V	۳۸/۸۷
آبخور طراحی شناور [m]	T	۰/۶۵
عرض آبخور در میانه شناور [m]	B_{WL2}	۱/۶
فاصله بین تقویت‌ها [m]	S	۰/۲۳
فاصله عمودی از خط آبخور تا نقطه بارگذاری [m]	h_0	۰/۱۵
طول کلی مسیر در لبه شناور [m]	L_{side}	۲۳/۷
زاویه انحراف کف در محل مرکز ثقل شناور [deg]	β_{cg}	۱۵
زاویه انحراف کف شناور [deg]	β_x	۱۷
ارتفاع موج [m]	H_{si}	۰/۲۵
تعداد بدنه شناور	N	۱
ضریب بلوکی	C_B	۰/۴۵

۲-۲- مشخصات پوسته‌ی سینه شناور مورد تحلیل

پوسته‌ی سینه شناوری که تحلیل خستگی آن بررسی می‌شود، دارای ابعاد ۴۳۵×۴۵۰ میلی‌متر و از جنس کامپوزیت بافته‌شده‌ی مقاله مرجع [۱۳] است که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ آورده شده است. انتخاب این ماده به خاطر وجود خواص لازم جهت تحلیل خستگی است و دقیقاً همان ماده مورد استفاده توسط وکاکسونو و چای می‌باشد. بدیهی است که در صورت استفاده از مواد دیگر مشخصات خستگی لازم برای تحلیل بایستی استخراج شود. همچنین در شکل ۲ پوسته‌ی سینه شناور مذکور که تحلیل خستگی آن بررسی می‌شود، با رنگ قرمز مشخص شده است. جهت بررسی قسمت‌های دیگر سازه نیز همین روند تحلیل قابل اجرا می‌باشد.

جدول ۲- خواص مکانیکی کامپوزیت بافته شده کربن/اپوکسی [۱۳]

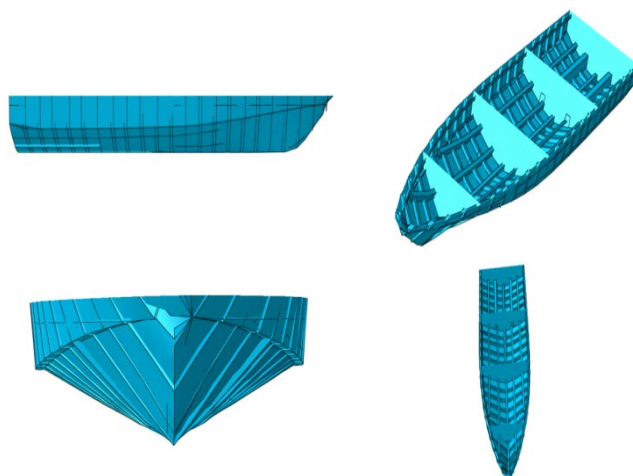
مقدار	نماد	مشخصه
۰/۳	ν_{12}	ضریب پواسون در جهت ۱۲
۰/۳	ν_{13}	ضریب پواسون در جهت ۱۳
۰/۳	ν_{23}	ضریب پواسون در جهت ۲۳
۶۶۰۰۰	E_1	مدول الاستیک در جهت ۱ [MPa]
۶۶۰۰۰	E_2	مدول الاستیک در جهت ۲ [MPa]
۸۸۷۰	E_3	مدول الاستیک در جهت ۳ [MPa]
۲۵۰۰۰	G_{12}	مدول الاستیک در جهت برش [MPa]
۱۲۰۰	X_T	استحکام کششی در جهت ۱ [MPa]
۱۲۰۰	X_C	استحکام فشاری در جهت ۱ [MPa]
۱۲۰۰	Y_T	استحکام کششی در جهت ۲ [MPa]
۱۲۰۰	Y_X	استحکام فشاری در جهت ۲ [MPa]
۹۳	SU	استحکام برشی [MPa]

تغییراتی در معادلات مورد استفاده در مدل پژوهش قبلی خود ایجاد کردند. آن‌ها مدلی به نام کاهش سفتی^{۱۷} ارائه دادند که از آن برای پیش‌بینی پاسخ‌های استاتیکی و خستگی کامپوزیت‌های بافته‌شده استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی آن‌ها برای پیش‌بینی شروع شکست و پیشرفت آن تا شکست نهایی اعمال شد. نتایج مدل آن‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. به‌علاوه، مدل پیشنهادی این محققین، حداکثر بار و سفتی خمشی قطعه کامپوزیتی و محل شکست را به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد. آن‌ها گزارش کردند که شکست سازه تحت بارگذاری خستگی شدیدتر از شکست سازه تحت بارگذاری استاتیکی است و انتشار شکست خستگی توسط مدل به خوبی پیش‌بینی می‌شود. در این تحقیق با بیشترین فشار اسلیمینگ وارد بر کف شناور به طراحی و تعیین ضخامت بدنه شناور با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب پرداخته می‌شود. سپس با استفاده از کد خستگی نوشته‌شده بر مبنای مدل ویکاکسونو و چای، تحلیل خستگی پوسته‌ی کامپوزیتی شناور تندرو با الیاف بافته شده تحت بارهای نوسانی ناشی حداکثر فشار دریا وارد بر پوسته‌ی کف شناور انجام می‌شود و قابلیت الگوریتم تخمین عمر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی سازه شناور تندرو کامپوزیتی مورد مطالعه

۲-۱- مشخصات عمومی شناور

در شکل ۱ بدنه شناور تندرو کامپوزیتی تک بدنه مورد مطالعه از نماهای مختلف و در جدول ۱ مشخصات عمومی شناور تندرو کامپوزیتی مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۱- بدنه شناور تندرو کامپوزیتی مورد مطالعه از نماهای مختلف

جدول ۱- مشخصات عمومی شناور کامپوزیتی مورد مطالعه

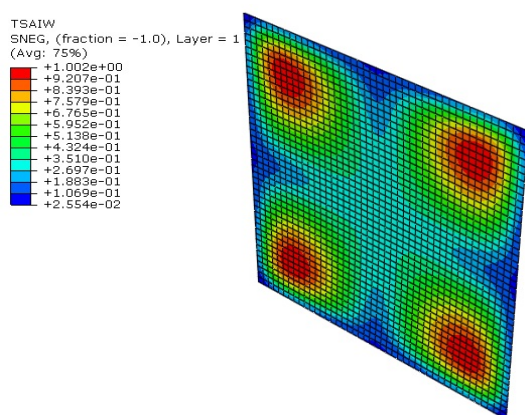
مقدار	نماد	مشخصه
$\lambda/5$	$L_{over all}$	طول سرتاسری شناور [m]
۲	B	عرض شناور [m]

مکانیکی فوم مورد استفاده در وسط پوسته شناور در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی هسته فومی مورد استفاده در پوسته شناور

مقدار	نماد	مشخصه
۱۳۰	ρ	چگالی [Kg/m^3]
۱۷۰	E	مدول الاستیک [MPa]
۰/۳۲	ν	ضریب پواسون

مقدار معیار سای-وو در ضخامت کلی پوسته‌ی ساندویچی سینه شناور، برابر با ۱/۰۰۲ (تقریباً یک) می‌باشد. در شکل ۴ کانتور معیار آسیب سای-وو قابل مشاهده است.



شکل ۴- کانتور معیار آسیب سای-وو

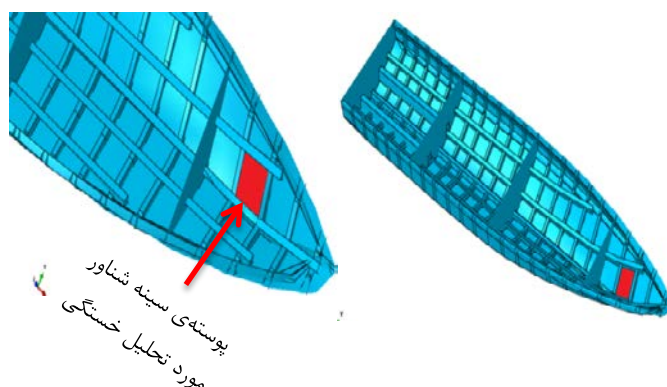
۳- بارگذاری‌های وارد بر کف سازه شناور مورد نظر

در محاسبه فشارها و نیروهای وارد بر شناور جهت طراحی آن باید موارد ذیل در استحکام سازه‌ی شناور در نظر گرفته شوند [۱۵]:

- فشارهای دینامیکی و استاتیکی دریا
- فشارهای دینامیکی و استاتیکی ناشی از مایعات درون مخازن
- نیروهای دینامیکی و استاتیکی ناشی از کالاهای خشک و تجهیزات
- در این بخش به محاسبه فشارها و نیروهای وارد بر شناور تندرو کامپوزیتی مدنظر پرداخته می‌شود.

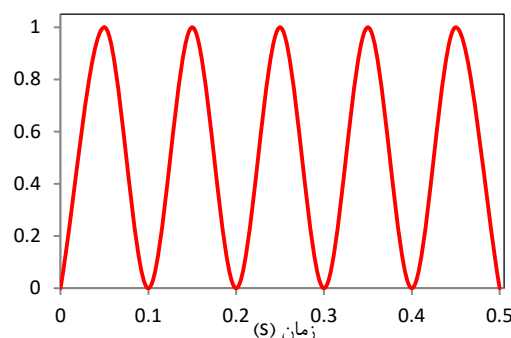
۳-۱- فشار اسلیمینگ^{۱۸} وارد بر کف شناور

وقتی بدنه شناور با سرعت زیاد وارد سطح آب می‌شود، یک فشار اضافی در طول سازه شناور بوجود می‌آید، این پدیده را اسلیمینگ می‌نامند. زمانی که موج ضربه می‌زند در قسمت جلویی و کف آن پدیده اسلیمینگ اتفاق می‌افتد [۱۶]. برای بدست آوردن فشار اسلیمینگ وارد بر پوسته‌ی کف شناور، زمانی که نسبت $V/\sqrt{L} \geq 3$ در شناور تندرو کامپوزیتی مورد مطالعه برقرار باشد از رابطه (۱) مطابق استاندارد DNVGL [۱۵] استفاده می‌شود.



شکل ۲- پوسته‌ی سینه شناور مورد تحلیل خستگی

جهت شرایط مرزی، در چهار طرف پوسته‌ی سینه شناور از تکیه‌گاه ساده استفاده شده است و بارگذاری به صورت فشاری بر روی سطح پوسته‌ی سینه شناور اعمال می‌شود. لازم است ذکر شود با توجه به وجود تقویت‌های طولی و عرضی در اطراف پوسته مورد نظر شرایط مرزی واقعی بین دو حالت تکیه‌گاه ساده و تکیه‌گاه گیردار می‌باشد. نتایج تحلیل‌های سازه‌ای نشان می‌دهد که پوسته با تکیه‌گاه ساده از لحاظ تنش بحرانی‌تر است لذا در این تحقیق این شرط مرزی مد نظر قرار گرفته است. در شکل ۳ شماتیک بارگذاری نوسانی روی پوسته‌ی سینه شناور تندرو قابل مشاهده است که مقدار حداکثر آن از روابط مربوط به تعیین فشار دریا مشخص می‌گردد.



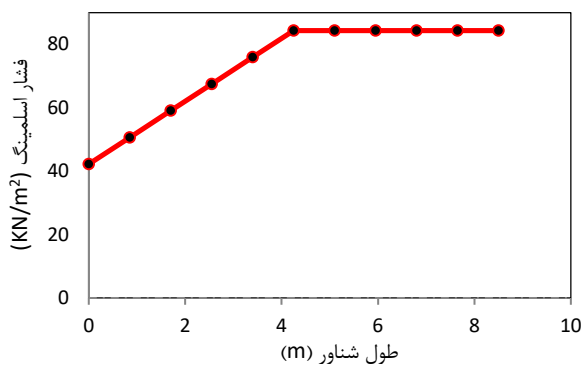
شکل ۳- شماتیک بارگذاری نوسانی اعمال شده در نرم‌افزار

جهت تعیین ضخامت بدنه شناور از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده می‌شود. با حداکثر فشار اسلیمینگ وارد بر کف شناور و ضریب اطمینان ۳/۳ با توجه استاندارد DNV [۱۴] و مبنا قرار دادن معیار سای-وو به تحلیل استاتیکی پوسته‌ی سینه شناور انجام می‌شود. پوسته‌ی شناور به فرم ساندویچی با هسته‌ی فومی در ۵ لایه طراحی گردید. ضخامت کلی پوسته‌ی ساندویچی بدست آمده با این روش برابر ۳۰/۶۸ میلی‌متر است که ۳۰ میلی‌متر آن هسته‌ی فومی و ۰/۶۸ میلی‌متر مابقی، ۴ لایه ۰/۱۷ میلی‌متری از جنس کامپوزیت بافته شده‌ی مقاله مرجع [۱۳] است. مشخصات

در رابطه فوق، V_i سرعت بر حسب $Knots$ (گره دریایی) است. همان طور که در جدول ۱ اشاره شد، برای شناور مورد نظر حداکثر سرعت برابر $38/87$ گره دریایی و معادل $20 m/s$ است. H_{si} ارتفاع موج بر حسب متر است که مقدار آن با توجه به مشخصات شناور و جدول موجود در استاندارد DNVGL [۱۵] برابر 0.25 متر است. همچنین شتاب گرانش (g_0) برابر با $9.81 m/s^2$ می باشد و بیشترین عرض بدنه در آبخور است که در میانه شناور ($L/2$) اندازه گیری می شود. برای شناور مورد نظر مقدار آن در جدول ۱ مشخص شده است. مقادیر ضرایب k_τ و F_{Nv} با استفاده از روابط موجود در استاندارد DNVGL [۱۵] به ترتیب برابر 0.88 و $4/8$ می باشند. حال با جایگذاری پارامترها لازم در رابطه (۲) شتاب عمودی طراحی در سینه شناور محاسبه می شود که مقدار آن برابر با $32.17 m/s^2$ است. سپس با جایگذاری مقادیر ضریب توزیع طولی برای نقاط مختلف شناور و همچنین بقیه پارامترهای محاسبه شده در رابطه (۱) فشار اسلیمینگ وارد بر کف شناور بدست می آید، نتایج و نمودار حاصل از آن به ترتیب در جدول ۵ و شکل ۶ آورده شده است.

جدول ۵- فشار اسلیمینگ وارد بر کف شناور

فشار اسلیمینگ [KN/m ²]	ضریب توزیع طولی (K _i)	ناحیه شناور
۴۲/۱۹	۰/۵	پاشنه شناور
۵۰/۶۳	۰/۶	۰/۱ طول شناور
۵۹/۰۶	۰/۷	۰/۲ طول شناور
۶۷/۵	۰/۸	۰/۳ طول شناور
۷۵/۹۴	۰/۹	۰/۴ طول شناور
۸۴/۳۸	۱	سینه - ۰/۵ طول شناور



شکل ۶- نمودار توزیع فشار اسلیمینگ روی کف شناور

۳-۲- بارگذاری فشار دریا^{۱۹} بر سازه کف شناور مورد نظر

فشار هیدرودینامیکی وارد بر شناور از طرف دریا مطابق استاندارد DNVGL [۱۵] به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

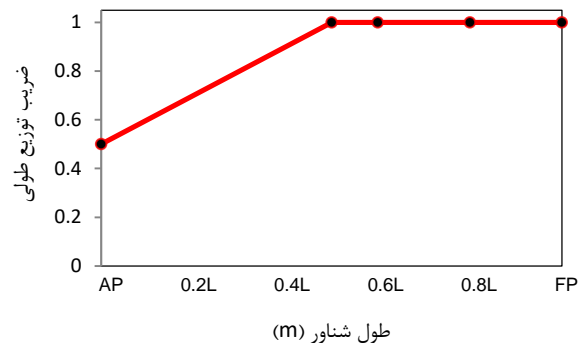
$$p_{sl} = \frac{a_{CG} \cdot \Delta}{0.14A_{ref}} \cdot K_{red} \cdot K_l \cdot K_\beta \quad (1)$$

در رابطه (۱)، a_{CG} شتاب عمودی طراحی در مرکز ثقل شناور است که در قسمت بعد محاسبه خواهد شد. همچنین بقیه پارامترهای رابطه فوق با توجه به استاندارد DNVGL [۱۵] پس از محاسبه در جدول ۴ آورده شده است:

جدول ۴- پارامترهای لازم جهت محاسبه فشار اسلیمینگ

مقدار	نماد	مشخصه
۵/۳۸	A_{ref}	مساحت مرجع برای بارهای ضربه ای [m ²]
۰/۴۱۹	K_{red}	ضریب کاهش ناحیه بارگذاری طراحی [m ²]
۰/۹۴۳	K_β	ضریب تصحیح زاویه شیب عرضی یا زاویه انحراف کف شناور

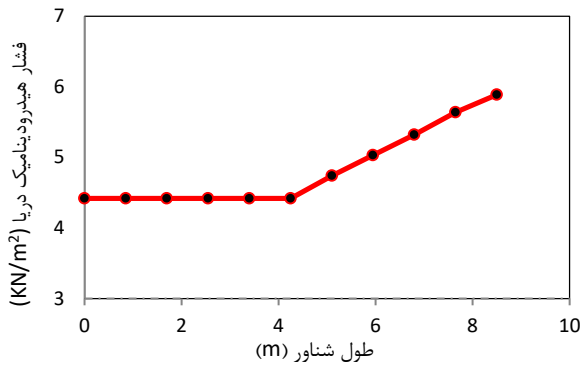
ضریب توزیع طولی $K_l()$ با استفاده از شکل ۵ تعیین می شود، که مقدار آن برای نقاط مختلف شناور در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۵- ضریب توزیع طولی فشار اسلیمینگ برای مود سرعت بالا [۱۶]

همان طور که اشاره شد، برای محاسبه فشار اسلیمینگ، تعیین شتابهای وارد بر شناور لازم است. لذا در این قسمت به محاسبه شتاب عمودی شناور پرداخته می شود. شتابهای عمودی طراحی (a_{cg}) برای سرعت V_i و ارتفاع موج H_{si} طبق استاندارد DNVGL [۱۵] با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود. شتاب عمودی طراحی، شتاب عمودی در مرکز ثقل شناور می باشد.

$$a_{cgi} = \frac{8.38 g_0 k_\tau}{\left(L/\Delta^{1/3}\right)^{0.35}} \left(\frac{H_{si}}{B_{WL2}} + 0.084 \right) \times (50 - \beta_{cg}) (Ln(F_{Nv})) V_i \sqrt{L} (B_{WL2}^2 / 1000 \Delta) \quad (2)$$



شکل ۸- نمودار فشارهای هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور

۴- مدل تحلیل خستگی سازه کامپوزیتی با الیاف بافته شده

در این تحقیق مدل خستگی ارائه شده توسط ویکاکسونو و چای [۱۳] جهت تخمین عمر پوسته‌ی کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل بر پایه مدل آسیب پیش‌رونده بوده و برای پیش‌بینی شروع شکست و پیشرفت آن تا شکست نهایی استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی ایشان هم در بارگذاری استاتیکی و هم در بارگذاری خستگی تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. کاهش مدول الاستیک به صورت تابعی از تعداد سیکل بارگذاری مطابق با روابط (۴) و (۵) می‌باشد.

$$\frac{\Delta E}{E^{initial}} = \left(\frac{d \left(\frac{E}{E^{initial}} \right)}{d(\log N)} \right) \Delta(\log N) \quad (4)$$

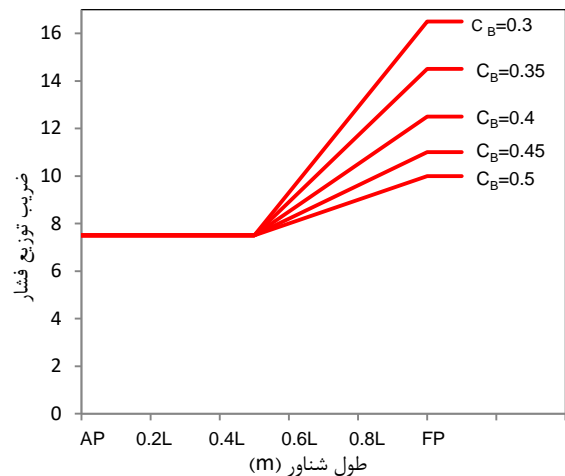
$$E^{new} = E^{old} + \Delta E \quad (5)$$

در رابطه (۴)، $\Delta(\log N)$ تفاوت بین لگاریتم تعداد چرخه در نمو^۲ حاضر و لگاریتم تعداد چرخه در نمو قبلی است؛ $E^{initial}$ و E^{old} مدول استاتیک و مدول نهایی قبل از افزایش، ΔE تفاوت بین مدول نمو حاضر و نمو قبلی و $d(E/E^{initial})/d(\log N)$ نرخ کاهش مدول نسبت به تنش می‌باشد. برای تعیین نقاط شکست، در این مدل، از معیار شکست ماکزیمم تنش و یا معیار شکست اصلاح‌شده هاشین استفاده می‌شود. شکل ۹ روند محاسبه آسیب خستگی تا تعیین نقاط شکست را با استفاده از معیار شکست ماکزیمم تنش نشان می‌دهد که در آن D^{old} پارامتر آسیب قبل از افزایش تعداد چرخه، D^{new} پارامتر آسیب بعد از افزایش تعداد چرخه است که از رابطه (۶) بدست می‌آید؛ σ_s تنش استاتیکی، σ تنش اعمالی و $\log N_f$ لگاریتم تعداد چرخه منجر به شکست است که از نمودار $S-N$ بدست می‌آید و ΔN تفاوت بین تعداد چرخه فعلی و تعداد چرخه در نمو قبلی می‌باشد.

$$D^{new} = \log(10^{[D^{old} \times \log(N_f)]} + \Delta N) / \log(N_f) \quad (6)$$

$$P = a \left(10h_0 + \left(k_s - 1.5 \frac{h_0}{T} \right) C_W \right) \quad (3)$$

برای تعیین فشار هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور در ابتدا باید ضریب شدت بارگذاری (d) را از جدول مربوطه در استاندارد DNVGL [۱۵] استخراج کرد که با توجه به مشخصات شناور برابر ۱۱ است. h_0 فاصله عمودی از خط آبخور تا نقطه بارگذاری (مرکز فشار) می‌باشد که طبق جدول مشخصات عمومی شناور (جدول ۱) برابر ۰/۱۵ متر است و همچنین ضریب توزیع فشار (k_s) را می‌توان از شکل ۷، با داشتن ضریب بلوکی که جزء مشخصات عمومی شناور است ($C_B = 0.45$)، محاسبه کرد. همچنین C_W ضریب موج است که مطابق با استاندارد DNVGL [۱۵] و مشخصات شناور مورد نظر مقدار آن برابر با ۰/۴۰۸ است. سپس با جایگذاری ضریب توزیع فشار (k_s) برای نقاط مختلف شناور در رابطه (۳) و همچنین جایگذاری بقیه پارامترها، فشار هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور بدست می‌آید، نتایج و نمودار حاصل از آن به ترتیب در جدول ۶ و شکل ۸ آورده شده است.

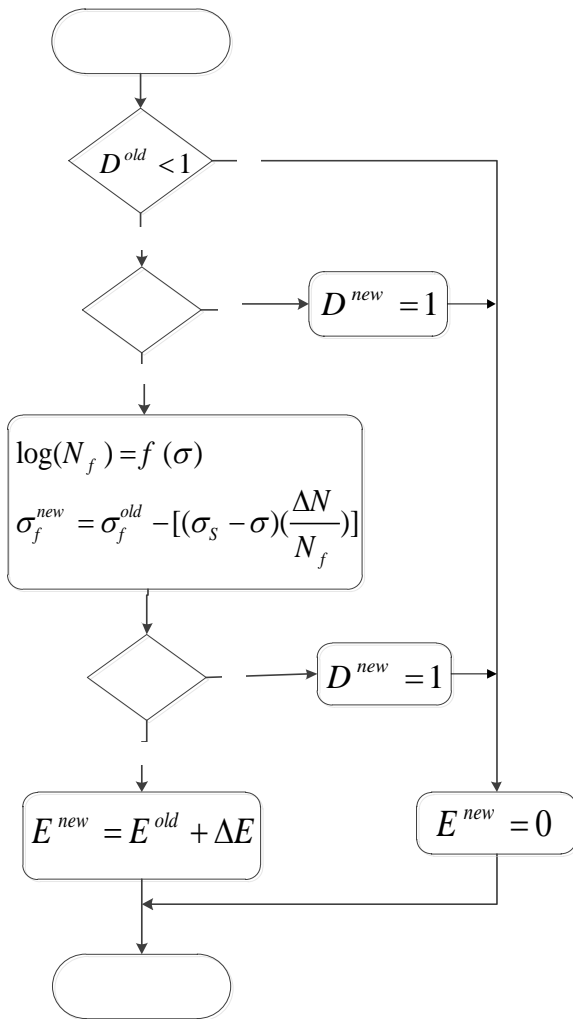


شکل ۷- نمودار ضریب توزیع فشار [۱۶]

جدول ۶- فشارهای هیدرودینامیک دریا وارد بر کف شناور

فشار هیدرودینامیک دریا [KN/m²]	ضریب توزیع فشار (k_s)	ناحیه شناور
۴/۴۲	۷/۵	پاشنه - ۰/۵ طول شناور
۴/۷۴	۸/۳	۰/۶ طول شناور
۵/۰۳	۹	۰/۷ طول شناور
۵/۳۲	۹/۷	۰/۸ طول شناور
۵/۶۴	۱۰/۵	۰/۹ طول شناور
۵/۸۹	۱۱/۱	سینه شناور

افزایش تعداد چرخه است. به منظور تعیین نقاط شکست، بعد از هر نمو، σ_f^{new} جایگزین σ_u در روابط (۷) تا (۱۰) می‌شود.



شکل ۱۰- مدل آسیب خستگی با معیار اصلاح شده هاشین [۱۳]

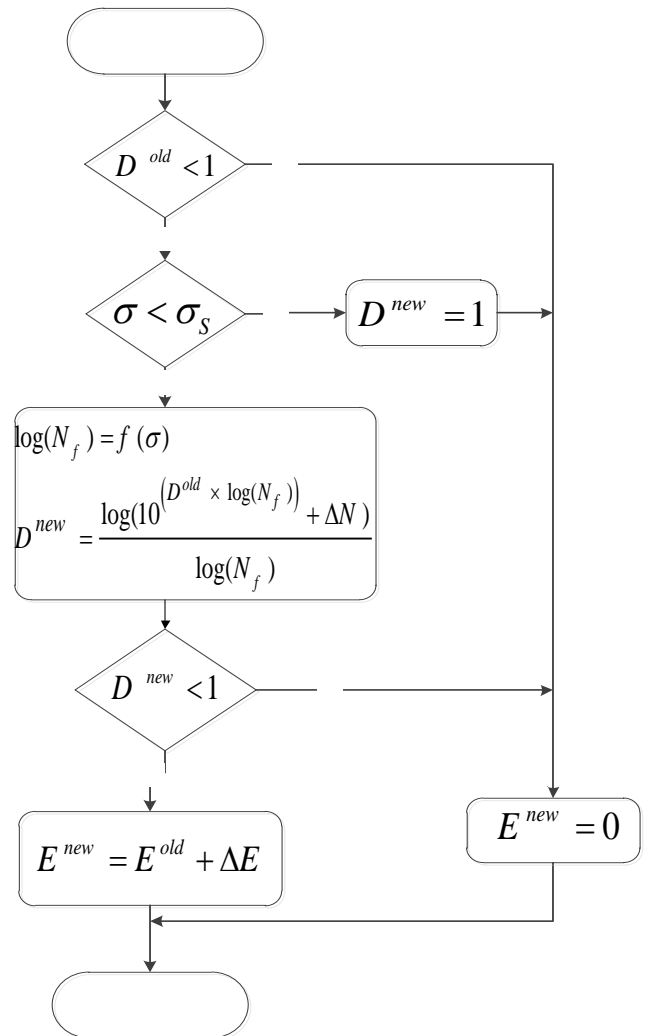
۵- تحلیل خستگی پوسته کامپوزیتی با الیاف بافته شده

در این بخش پس از تهیه زیربرنامه UMAT جهت اجرایی نمودن مدل تحلیل خستگی در نرم افزار آباکوس در بخش اول نتایج صحت سنجی کد ارائه می‌شود و در بخش دوم با توجه به فشار نوسانی دریا به تخمین عمر پوسته کف شناور پرداخته می‌شود.

۵-۱- صحت سنجی کد تحلیل خستگی

در این قسمت به صحت سنجی نتایج حاصل از کد نوشته شده با زیربرنامه UMAT به کمک مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده با نتایج مقاله مرجع [۱۳] پرداخته می‌شود.

شکل ۱۱ و جدول ۷ مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده و مقاله مرجع [۱۳] در شکست اولیه است که در ۳ نیروی ۲۰۴۰، ۱۹۳۸ و ۱۸۳۶ نیوتن انجام شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۹- مدل آسیب خستگی با معیار حداکثر تنش [۱۳]

شکل ۱۰ روند محاسبه آسیب خستگی تا تعیین نقاط شکست را با استفاده از معیار شکست اصلاح شده هاشین نشان می‌دهد که در آن H برابر با سمت چپ روابط (۷) تا (۱۰) است.

$$\text{Fibre tension } (\sigma_{11} \geq 0) \quad (7)$$

$$(\sigma_{11}/\sigma_{11tu})^2 + (\tau_{12}/\tau_{12u})^2 \leq 1$$

$$\text{Fibre tension } (\sigma_{11} \leq 0) \quad (8)$$

$$(\sigma_{11}/\sigma_{11cu})^2 \leq 1$$

$$\text{Fibre tension } (\sigma_{22} \geq 0) \quad (9)$$

$$(\sigma_{22}/\sigma_{22tu})^2 + (\tau_{12}/\tau_{12u})^2 \leq 1$$

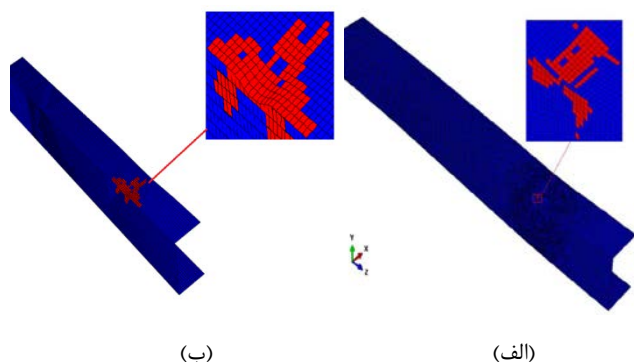
$$\text{Fibre tension } (\sigma_{22} \leq 0) \quad (10)$$

$$(\sigma_{22}/\sigma_{22cu})^2 \leq 1$$

$$\sigma_f^{new} = \sigma_f^{old} - [(\sigma_s - \sigma)(\Delta N / N_f)] \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، σ_f^{old} تنش نهایی قبل از افزایش تعداد چرخه، σ_s تنش استاتیکی، σ تنش ماکزیمم و σ_f^{new} تنش نهایی بعد از

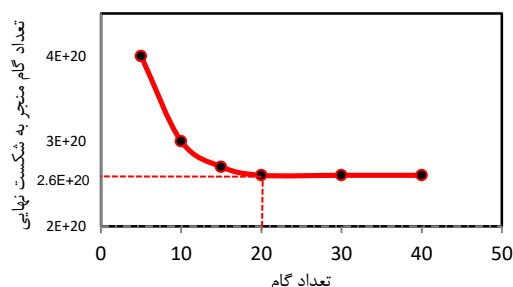
در شکل ۱۳ کانتور المان‌های آسیب دیده حاصل از شبیه سازی حاضر و نتایج موجود در مرجع [۱۳] جهت مقایسه آورده شده است.



شکل ۱۳- المان‌های آسیب دیده تحت بارگذاری خستگی
(الف): مقاله مرجع [۱۳]، (ب): شبیه سازی انجام شده

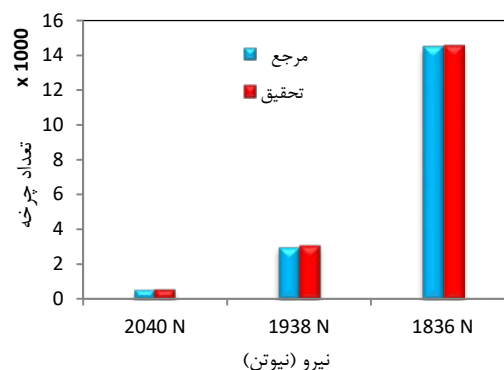
۵-۲- تحلیل خستگی پوسته‌ی سینه شناور تندرو

در این قسمت با بیشترین فشار اسلیمینگ وارد بر کف شناور به طراحی و تعیین ضخامت بدنه شناور با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب پرداخته می شود. مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. سپس با ضخامت بدست آمده و با استفاده از کد خستگی نوشته شده، پوسته‌ی سینه شناور تحت بار فشار دریا مورد تحلیل خستگی قرار می گیرد. با توجه به این که در روش مورد استفاده در تحلیل خستگی هر گام تحلیل معرف تعداد چرخه مشخصی است، لذا در ابتدا لازم است همگرایی تعداد گام بررسی شود. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود از تعداد ۲۰ گام به بعد، شکست ناشی از خستگی در قطعه، به $10^{20} \times 2/6$ چرخه همگرا می شود.



شکل ۱۴- نمودار همگرایی تعداد گام

برای این مسئله ۲۰ گام $10^{19} \times 1/44$ چرخه‌ای تعریف می گردد. همان طور که انتظار می رود با تأثیر چرخه‌های بارگذاری در هر گام، پارامترهای آسیب روندی صعودی دارند و مقدار آن‌ها در هر گام

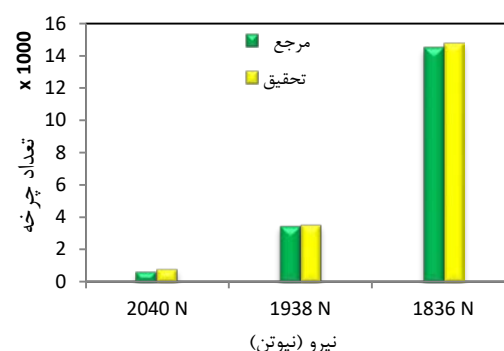


شکل ۱۱- مقایسه تعداد چرخه در شروع آسیب حاصل از شبیه سازی با نتایج موجود در مرجع [۱۳]

جدول ۷- درصد خطای تعداد سیکل در شروع آسیب

درصد خطا	شکست اولیه (تعداد چرخه)		نیرو (نیوتن)
	مرجع	تحقیق	
۱/۸	۵۶۰	۵۷۰	۲۰۴۰
۳/۳	۳۰۰۰	۳۱۰۰	۱۹۳۸
۰/۳	۱۴۵۰۰	۱۴۵۴۵	۱۸۳۶

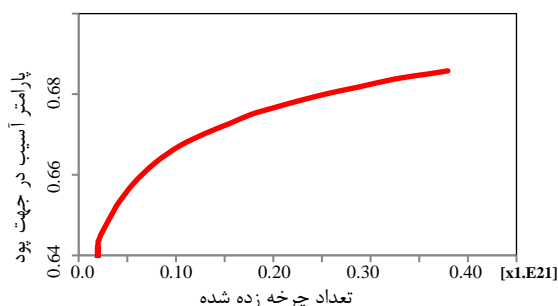
شکل ۱۲ و جدول ۸ نیز مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده و مقاله مرجع [۱۳] در شکست نهایی مربوط به نیروهای فوق است. همان گونه که مشاهده می شود در شکست نهایی میزان خطا در مقایسه با شروع آسیب بیشتر است ولی تطابق نتایج قابل پذیرش است.



شکل ۱۲- مقایسه تعداد چرخه در شکست نهایی حاصل از شبیه سازی با نتایج موجود در مرجع [۱۳]

جدول ۸- درصد خطای تعداد چرخه در شکست نهایی

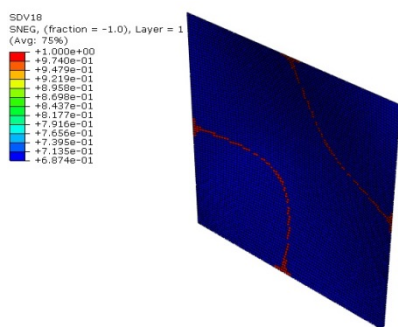
درصد خطا	شکست نهایی (تعداد چرخه)		نیرو (نیوتن)
	مرجع	تحقیق	
۱۸	۶۹۹	۸۲۵	۲۰۴۰
۲/۴	۳۴۷۶	۳۵۶۰	۱۹۳۸
۲/۰۵	۱۴۵۱۲	۱۴۸۱۰	۱۸۳۶



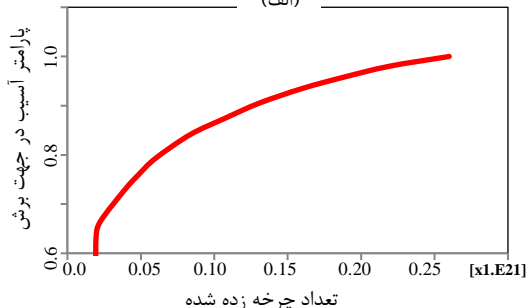
(ب)

شکل ۱۵- پارامتر آسیب در جهت پود (الف): کانتور پارامتر آسیب (ب): نمودار پارامتر آسیب نسبت به تعداد چرخه زده شده

شکل‌های ۱۷- الف و ب کانتور و نمودار پارامتر آسیب در جهت برش نسبت به تعداد چرخه زده شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱۷- ب عامل شروع شکست که افزایش پارامتر آسیب در جهت برش است را می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که اشاره شد در این تحلیل در گام ۱۸ بعد از $2/6 \times 10^{20}$ چرخه پارامتر آسیب برشی به ۱ رسیده و باعث شکست در پوسته شناور می‌شود.



(الف)

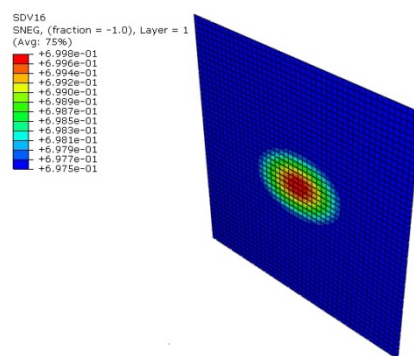


(ب)

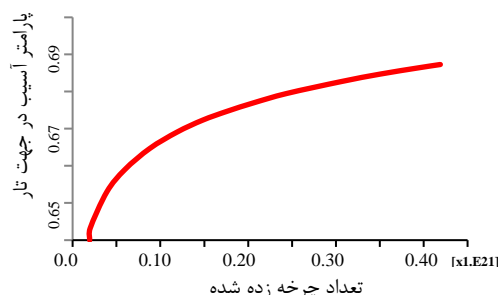
شکل ۱۷- پارامتر آسیب در جهت برش (الف): کانتور پارامتر آسیب (ب): نمودار پارامتر آسیب نسبت به تعداد چرخه زده شده

شکل‌های ۱۸- الف و ب کانتور و نمودار مدول الاستیک در جهت تار نسبت به تعداد چرخه زده شده است. همچنین در شکل ۱۸- ب مطابق انتظار با افزایش تعداد چرخه، مدول الاستیک در جهت تار روند نزولی دارد.

افزایش می‌یابد. در این تحلیل نیز عامل شروع شکست، افزایش پارامتر آسیب در راستای برش می‌باشد که در گام ۱۸ بعد از چرخه $2/6 \times 10^{20}$ با رسیدن پارامتر آسیب برشی به ۱ شکست قطعه شروع می‌شود. شکل ۱۵- الف کانتور پارامتر آسیب و شکل ۱۵- ب نمودار پارامتر آسیب در جهت تار نسبت به تعداد چرخه زده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵- ب مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چرخه، پارامتر آسیب در جهت تار افزایش می‌یابد.



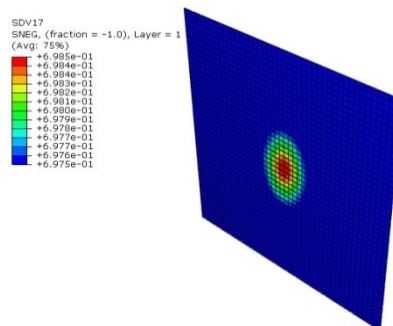
(الف)



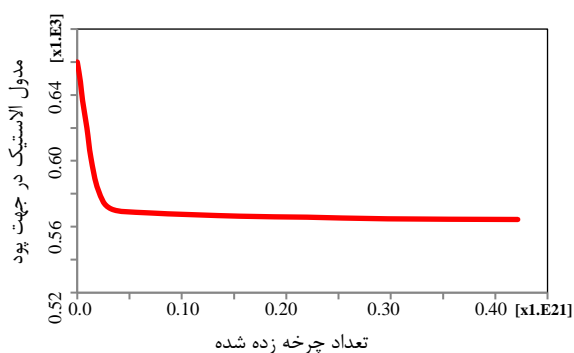
(ب)

شکل ۱۵- پارامتر آسیب در جهت تار (الف): کانتور پارامتر آسیب (ب): نمودار پارامتر آسیب نسبت به تعداد چرخه زده شده

در شکل‌های ۱۶- الف و ب کانتور و نمودار پارامتر آسیب در جهت پود نسبت به تعداد چرخه زده شده آورده شده است. همچنین در شکل ۱۶- ب روند صعودی پارامتر آسیب در جهت پود با افزایش تعداد چرخه به وضوح قابل مشاهده است.



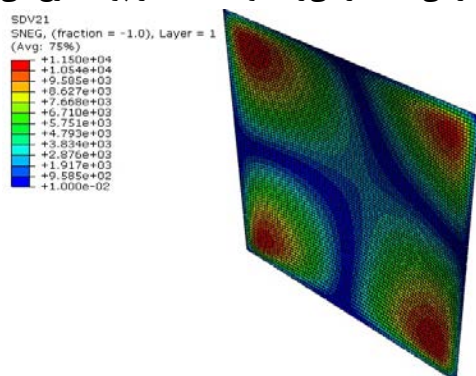
(الف)



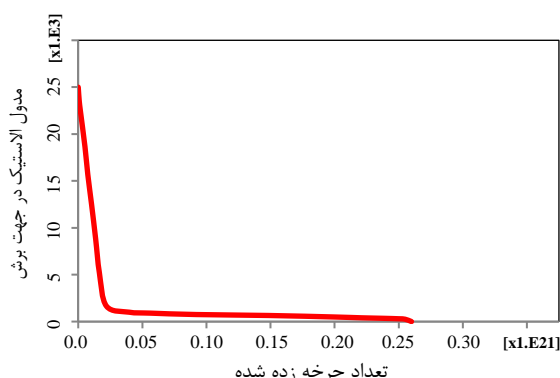
(ب)

شکل ۱۹- مدول الاستیک در جهت پود (الف): کانتور مدول الاستیک (ب): کاهش مدول الاستیک نسبت به تعداد چرخه زده شده

در شکل های ۲۰- الف و ب کانتور و نمودار مدول الاستیک در جهت برش نسبت به تعداد چرخه زده شده قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۲۰- ب همان طور که انتظار می رود با افزایش تعداد چرخه، مدول الاستیک در جهت برش روند نزولی دارد. بعد از طی $2/6 \times 10^{20}$ چرخه و رسیدن پارامتر آسیب برشی به یک، مدول الاستیک برشی به صفر می رسد و شکست در پوسته رخ می دهد.

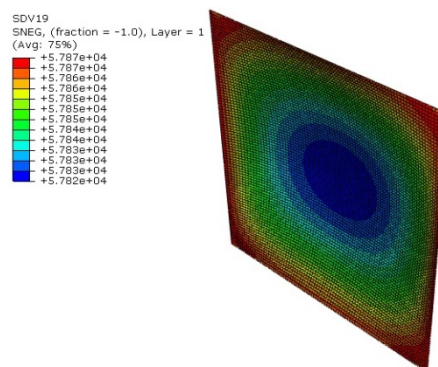


(الف)

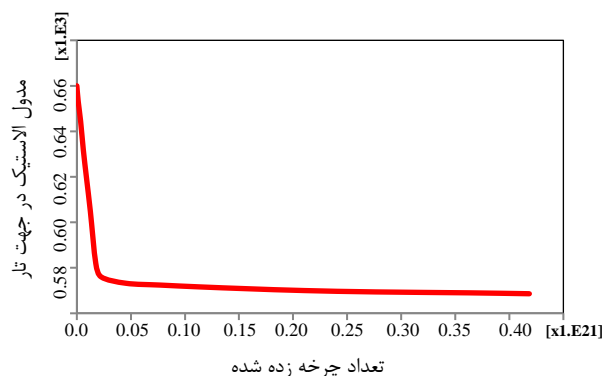


(ب)

شکل ۲۰- مدول الاستیک در جهت برش (الف): کانتور مدول الاستیک (ب): کاهش مدول الاستیک نسبت به تعداد چرخه زده شده



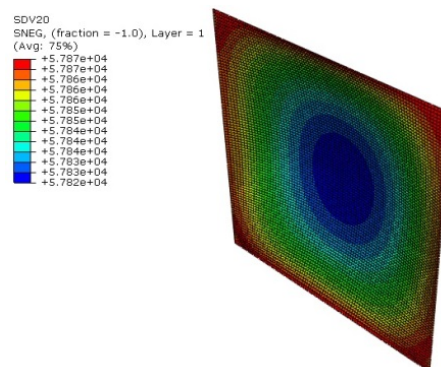
(الف)



(ب)

شکل ۱۸- مدول الاستیک در جهت تار (الف): کانتور مدول الاستیک (ب): کاهش مدول الاستیک نسبت به تعداد چرخه زده شده

در شکل ۱۹- الف کانتور مدول الاستیک در جهت پود نشان داده شده است و در شکل ۱۹- ب نمودار مدول الاستیک در جهت پود نسبت به تعداد چرخه زده شده، آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود افزایش تعداد چرخه در هر گام روی پوسته شناور تاثیر گذاشته و باعث کاهش مدول الاستیک در جهت پود می شود.



(الف)

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف بررسی و پیاده سازی الگوریتم تخمین عمر خستگی در پوسته کامپوزیتی شناور است. در این راستا مدل خستگی ارائه شده توسط ویکاکسونو با استفاده از زیربرنامه UMAT در نرم افزار اجرایی و صحت سنجی گردید و پوسته سینه یک شناور کامپوزیتی مورد تحلیل قرار گرفت. پس از انجام این تحقیق و بررسی تحلیل های عددی به نتایج زیر می توان اشاره نمود:

- مدل تحلیل خستگی انتخاب شده دارای پارامترهای متنوعی است که برای یک ماده کامپوزیتی بایستی استخراج گردد که بعضاً بسیار هزینه بر است با این حال پس از اجرایی شدن در نرم افزار به خوبی قابلیت تخمین عمر خستگی دارد و می توان آن را برای پوسته های کامپوزیتی مورد استفاده قرار داد.

- نتایج تحلیل پوسته بدنه شناور نشان می دهد در صورتی که پوسته با ضریب اطمینان مناسب (مطابق این تحقیق ۳/۳) طراحی شود خستگی ناشی از فشار دریا بر پوسته اهمیت نخواهد داشت.

- در تحلیل پوسته کامپوزیتی سینه شناور با خواص مکانیکی مورد استفاده با توجه به نوع بارگذاری خواص برشی نقش تعیین کننده در میزان عمر خستگی سازه دارد.

- با شروع بارگذاری خستگی پارامتر آسیب به سرعت افزایش می یابد و در ادامه شیب تغییرات آن کاهش نشان می دهد. این به این معنا است که بارها نوسانی ابتدایی بیشترین تاثیر را در ایجاد آسیب دارند.

کلید واژگان

- 1- Boller
- 2- Owen
- 3- Hashin and Rotem
- 4- Halpin
- 5- Residual strength model
- 6- Wear-out model
- 7- Curtis and Moore
- 8- Wen and Yazdani
- 9- Residual stiffness model
- 10- Biner and Yuhas
- 11- Naik
- 12- Mao and Mahadevan
- 13- Hochard and Thollon
- 14- Generalized non-linear cumulative damage model
- 15- Wicaksono and Chai
- 16- Progressive damage models
- 17- Stiffness decay
- 18- Slamming pressure
- 19- Sea pressure
- 20- Increment

۷- مراجع

- 1- H. Mao, S. Mahadevan, (2002), *Fatigue damage behavior of composite materials*, Journal of Composite Structures 58: 405–410.
- 2- Lee Chi-seung, et al., (2015), *Initial and progressive failure analyses for composite laminates using puck failure criterion and damage-coupled finite element method*, Journal of Composite Structures 121: 406–419.
- 3- Boller KH., (1970), *Some fatigue characteristics of glass-reinforced composite laminates*. ASME Paper.
- 4- Owen MJ., Howe RJ., (1972), *Accumulation of damage in a glass-reinforced plastic under tensile and fatigue loading*. Journal of Phys D: 5(9): 1637–1649.
- 5- Hashin Z., Rotem A., (1973), *Fatigue failure criterion for fiber reinforced materials*. Journal of Composite Material, 7: 448–464.
- 6- Halpin JC., Jerina KL., and Johnson, TA., (1973), *Characterization of composites for the purpose of reliability evaluation, in analysis of the test methods for high modulus fibers and composites*, ASTM STP 521, pp. 5–64.
- 7- Curtis PT., Moore BB., (1987), *A comparison of the fatigue performance of woven and non-woven CFRP laminates in reversed axial loading*. Journal of Fatigue; 9:67–78.
- 8- Wen, Yazdani, (2008), *Anisotropic damage model for woven fabric composites during tension-tension fatigue*, Journal of Composite Struct. 82:127–31.
- 9- Biner SB., Yuhas VC., (1989), *Growth of short fatigue cracks at notches in woven fiber glass-reinforced polymeric composites*. Journal of Eng Mater Tech Trans ASME; 111:363–7.
- 10- Naik NK., (2003), *Woven-fibre thermoset composites*, Journal of Fatigue; 19:58–67
- 11- Ch. Hochard, Y. Thollon., (2010), *A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions*. Journal of Fatigue; 32: 158–165.
- 12- Wicaksono S., Chai GB., (2013), *The response of woven CFRP under static and fatigue loading*. Journal of Adv Mater Res; 651:221–6.
- 13- Wicaksono S, Chai GB, (2015), *Life prediction of woven CFRP structure subject to static and fatigue loading*, Journal of Composite Structures Vol. 119, pp. 185–194.
- 14- DNV standard; (2013), Part 3, Chapter 4, Section C, Table C1, Pages 10.
- 15- DNVGL standard; (2018), Part 3, Chapter 1.
- 16- Gelyerdi, F. and Shakeri, M., (2015), *Design of Sandwich panel layers in a composite high speed craft according to DNV standard and FEM*, M.Sc. Thesis, Mechanical Department, Babol University of Technology. (In Persian)