یادداشت فنی

اثرات بارهای ناشی از موج و باد بر ضرایب شدت تنش یک سازه فراساحلی ترکدار

مجیدرضا آیت اللهی[1] ، کارو صدیقیانی[2*]

۱- استاد، آزمایشگاه خستگی و شکست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، آزمایشگاه خستگی و شکست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

با توجه به هزینه بالای نگهداری و تعمیر توربین‌های بادی فراساحلی، دقت بیشتری برای تحلیل قابلیت اطمینان این سازه‌ها ضروری می‌باشد. ماهیت بارهای ناشی از باد و موج باضافه اثرات ناشی از خوردگی آب دریا عامل‌های مهمی برای ایجاد و رشد ترک‌ها در سازه‌های دریایی می‌باشد. این ترک‌ها می‌توانند سبب شکست‌های ناگهانی در سازه‌های دریایی گردند. سازه نگهدارنده سه‌پایه‌ای در توربین‌های بادی واقع در آب‌های عمیق مورد استفاده می‌باشد. در این مقاله یک ترک معمول در سازه نگهدارنده سه پایه‌ای فرض شده و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که تغییرات ضرایب شدت تنش با طول ترک بسیار قابل توجه بوده و ضریب شدت تنش مود II در مقایسه با ضریب شدت تنش مود I قابل صرفنظر نمی‌باشد. بنابراین برای آنالیز عمر خستگی و یا بدست آوردن بار شکست در سازه‌های فراساحلی مشابه لازم است که نمودارهای ضرایب شدت تنش بدست آمده در این تحقیق به همراه یکی از معیارهای مود ترکیبی بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: توربین بادی فراساحلی، سازه نگهدارنده سه‌پایه‌ای، ترک، ضرایب شدت تنش، خستگی

TECHNICAL NOTE

EFFECTS OF WIND AND WAVE LOADS ON STRESS INTENSITY FACTORS OF A CRACKED OFFSHORE STRUCTURE

M. R. Ayatollahi[1], K. Sedighiani[2]

1-Professor, Faculty of Mechanical Eng., Iran University of Science and Technology
2-M. Sc. Student Mechanical Eng., Iran University of Science and Technology

Abstract

Due to the much higher maintenance and replacement expenses of the offshore wind turbine structures, more attention should be paid for a reliable lifetime analysis of them. Meanwhile, the cyclic nature of wave and wind loads together with the corrosive effects from the sea water are major factors for the creation and growth of flaws and cracks in offshore structures. These cracks can be the cause of instantaneous failure in marine structures. The "Tripod" model is one of the favorite support structures which are used for offshore wind turbines particularly in deeper waters. In this paper, a crack is considered in a support structure that can be typically used in the offshore wind turbine constructions. The finite element code ABAQUS is employed

* نویسنده مسوول مقاله karosedighiani@gmail.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

to determine the related stress intensity factors for different types of loads. It is shown that the variations of stress intensity factors with crack length differ significantly for various loading types. Also the mode II stress intensity factor is not negligible compared to the mode I stress intensity factor. Therefore, for analyzing the fatigue life or the fracture load of similar cracked offshore structures, appropriate mixed mode crack growth criteria should be employed together with the curves derived in this research for stress intensity factors.
Keywords: Offshore wind turbine, Tripod support structure, Crack, Stress intensity factors, Fatigue

۱- مقدمه

انرژی بادی فراساحلی به طور گسترده‌ای در دو دهه اخیر رشد کرده، بطوریکه در بعضی از کشورها بیشتر از ۱۰٪ انرژی الکتریسیته توسط توربین‌های بادی فراساحلی تامین می‌گردد [۱]. از جمله مزایای توربین‌های بادی فراساحلی می‌توان به دسترسی به ناحیه‌های پیوسته و بزرگ، سرعت باد بیشتر -که معمولا با فاصله گرفتن از ساحل بیشتر می شود- و توربولانس کمتر -که سبب افزایش انرژی توربین و کاهش اثرات بارهای خستگی می‌گردد- اشاره کرد. اگر چه در مقابل ویژگی‌های مهم اشاره شده مشکلاتی مانند هزینه بالاتر شبکه الکتریکی، فونداسیون، نصب و نگهداری در این سازه‌ها قابل پیش‌بینی می‌باشد.

در زمینه توربین های بادی فراساحلی به عنوان جایگزینی برای روشهای سنتی تولید انرژی، سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی صورت گرفته است. اگرچه، هنوز نگرانی هایی در مورد قابلیت اطمینان و ایمنی سازه‌های نگهدارنده توربین‌های بادی تحت بارهای ناشی از موج و باد در شرایط سخت محیطی وجود دارد. با توجه به هزینه نگهداری و تعمیر بالاتر توربین‌های بادی فراساحلی نسبت به سازه‌های روی زمین، تمرکز و دقت بیشتری برای تحلیل عمر قابل اطمینان آنها ضروری می‌باشد. خستگی یکی از عوامل اصلی فروپاشی سازه‌های دریایی می‌باشد، لذا این موضوع توسط محققین بسیاری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [۲، ۳، ۴]. ژیائو [۲] مروری بر روش‌های مختلف ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های فراساحلی در مقابل خستگی و شکست انجام داده است، سپس یک سازه دریایی معمول را با استفاده از این روش‌ها تحلیل کرده است. کام و بیرکینشاو [۳] رفتار خستگی اتصال های لوله‌ای شکل در نقاط جوش را برای انواع مختلف اتصال بررسی کرده اند. رامساموج و شوکار [۴] یک مدل جدید برای ارزیابی عمر خستگی سازه‌های فراساحلی ارائه کرده‌اند. در این مدل امکان در نظر گرفتن اثرات خوردگی نیز وجود دارد.

ماهیت تکرار شونده بارهای ناشی از باد و موج باضافه اثرات ناشی از خوردگی آب دریا عامل‌های مهمی برای ایجاد و رشد ترک ها در سازه‌های دریایی می‌باشند. از آنجاییکه وجود ترک سبب تمرکز تنش شدید می‌شود بنابراین ترک‌ها سبب کاهش استحکام سازه می‌گردند. این ترک ها می‌توانند سبب شکست‌های ناگهانی در سازه‌های دریایی گردد. بنابراین ترک‌هایی که در طول دوره سرویس دهی سازه‌های فراساحلی یافت می‌شوند باید به دقت بررسی و تحلیل گردند.

مدل سه‌پایه ای یکی از سازه‌های نگهدارنده می‌باشد که معمولا در توربین‌های بادی فراساحلی قرار گرفته در آب‌های عمیق استفاده می‌گردد [۵ و ۶]. استفاده از این نوع سازه نگهدارنده در آخرین دهه قرن بیستم آغاز گردیده و ساختار آن بسیار شبیه به برخی از سازه‌های مورد استفاده در سکوهای نفتی و گازی می‌باشد. در این سازه، تقویت‌کننده‌های جانبی به یک پایه مرکزی بزرگ جوش داده می‌شوند. به دلیل تمرکز تنش و اثرات جوش، ناحیه حرارت دیده واقع شده در نزدیکی منطقه جوش یکی از نقاط بسیار محتمل برای آغاز و رشد ترک‌های خستگی می‌باشد.

سازه نگهدارنده توربین‌های بادی فراساحلی بطور کلی در معرض شرایط بارگذاری پیچیده‌ای می‌باشد. بنابراین ترک‌هایی که در سازه نگهدارنده آنها ایجاد می‌گردد اغلب تحت بارگذاری ترکیبی از مود I و مود II خواهند بود. در این تحقیق ترکی در این نقطه بحرانی در نظر گرفته شده و ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} با استفاده از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

روش اجزا محدود برای طول ترک های مختلف محاسبه گردیده است. همانطور که در ادامه شرح داده می‌شود، سه نوع بارگذاری مختلف بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است: بار فشاری محوری P، نیروی برشی S و گشتاور خمشی M. بارگذاری خمشی و نیروی برشی اثرات باد و موج را نشان می‌دهد و بار فشاری متناظر با وزن توربین بادی و پایه می‌باشد.

۲ - سازه نگهدارنده سه پایه ای

بطور کلی یک سازه نگهدارنده سه پایه‌ای به طوری طراحی می‌گردد که بارهای مقطعی وارد بر پایه مرکزی به بارهای خمشی، کششی و فشاری در سه تقویت کننده جانبی تبدیل گردد. تقویت‌کننده‌های جانبی بالاتر از بستر دریا به گونه‌ای دو به دو به همدیگر وصل شده‌اند که به سازه نگهدارنده حالتی مثلثی شکل می‌دهد. در این مقاله از نمونه سازه نگهدارنده سه پایه‌ای ارائه شده توسط زایژر استفاده شده است [۷]. شکل و پارامترهای مهم سازه نگهدارنده سه پایه ای مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات و ابعاد سازه نگهدارنده و توربین بادی متناظر در جدول ۱ ارائه گردیده است. نمای سه‌بعدی سازه نگهدارنده در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- بارها و اثرات بارگذاری

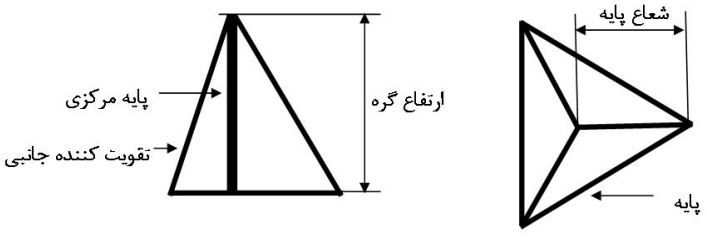
سازه‌های نگهدارنده توربین‌های بادی در معرض انواع مختلف بارگذاری می‌باشند. بطورکلی می‌توان گفت که توربین‌های بادی در معرض چهار دسته بار کلی قرار دارند: بارهای دایمی، بارهای کارکردی متغیر، بارهای محیطی و بارهای ناشی از تغییر شکل. جدول ۲ انواع بارهای مهم مربوط به سازه های نگهدارنده را دسته‌بندی کرده و مثال‌هایی از آن را ذکر می‌نماید [۸].

مروری بر بارهای فوق نشان می‌دهد که این بارها در نهایت روی پایه مرکزی به صورت سه بارگذاری اصلی محوری، برشی و خمشی ظاهر می‌شوند. برای مثال بارهای ناشی از وزن را با استفاده از بارگذاری محوری فشاری و نیروهای ناشی از باد و موج را با استفاده از بارهای برشی و خمشی می‌توان مدل نمود. لذا در این تحقیق اثر ناشی از سه دسته بار فوق بطور مجزا در نظر گرفته شده و نتایج برای هر کدام از آنها ارائه گردید. در نهایت با استفاده از اصل جمع آثار می‌توان برای ترکیبهای مختلف بارها رفتار سازه را بررسی کرد.

۴- مدل سازی اجزا محدود

آنالیز تنش مدل بدون ترک نشان می‌دهد که به دلیل تمرکز تنش و اثرات جوش در نقاط اتصال میان پایه مرکزی و تقویت‌کننده‌های جانبی احتمال ایجاد ترک بسیار بالا می‌باشد. شکل ۳ نمای نزدیک از ناحیه تمرکز تنش را نشان می‌دهد. بنابراین در این تحقیق فرض شده است که ترک در یکی از نقاط اتصال پایه مرکزی با تقویت‌کننده‌های جانبی ایجاد می‌گردد.

بطور کلی برای بررسی رفتار یک سازه ترکدار، پارامترهای اصلی ترک که میدان های تنش و کرنش اطراف نوک ترک را معین می کنند باید مشخص باشد. به این منظور پارامتری به نام ضریب شدت تنش تعریف می‌گردد. بسته به نوع حرکت وجه های ترک نسبت به همدیگر، بارگذاری می تواند از نوع مود I، مود II، مود III و یا ترکیبی از آنها باشد. اگر وجه‌های ترک بدون هیچگونه لغزشی نسبت به همدیگر باز شوند، بارگذاری مود I می‌باشد. در بارگذاری مود II و مود III وجه‌های ترک نسبت به همدیگر به ترتیب فقط لغزش در صفحه و لغزش خارج از صفحه دارند.

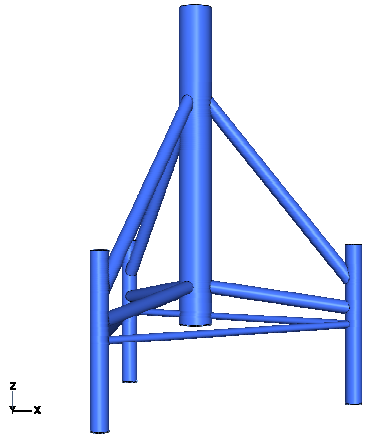


شکل ۱- توپولوژی سازه نگهدارنده سه پایه‌ای

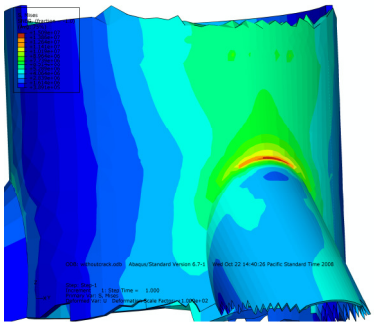
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

جدول ۱- مشخصات توربین بادی و سازه نگهدارنده مرجع [۷]

ابعاد سازه نگهدارنده مرجع	ابعاد بیرونی اصلی	(m) ارتفاع گره از سطح دریا	۳۰
		(m) شعاع پایه از پایه مرکزی تا پایه جانبی	۲۰
	تقویت کننده جانبی	(m) قطر خارجی	۱/۶
		(m) ضخامت دیواره	۰/۰۳
	پایه	(m) قطر خارجی	۰/۸
		(m) ضخامت دیواره	۰/۰۲
	پایه مرکزی	(m) قطر خارجی	۴
		(m) ضخامت دیواره	۰/۰۸
	پایه جانبی	(m) قطر خارجی	۲
		(m) ضخامت دیواره	۰/۰۳



شکل ۲- نمای سه بعدی سازه نگهدارنده مرجع



شکل ۳- نمای نزدیک از تمرکز تنش در محل اتصال پایه مرکزی و تقویت کننده جانبی

نسبت به همدیگر، بارگذاری می‌تواند از نوع مود I، مود II، مود III و یا ترکیبی از آنها باشد. اگر وجه‌های ترک بدون هیچگونه لغزشی نسبت به همدیگر باز شوند، بارگذاری مود I می‌باشد. در بارگذاری مود II و مود III وجه‌های ترک نسبت به همدیگر به ترتیب فقط لغزش در صفحه و لغزش خارج از صفحه دارند. بسیاری از نمونه‌ها در واقعیت تحت بارگذاری ترکیبی از مودهای I و II می‌باشند. ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} مهمترین پارامترهای نوک ترک بوده که میزان سینگولاریتی نوک ترک را تعیین می‌کنند [۹ و ۱۰].

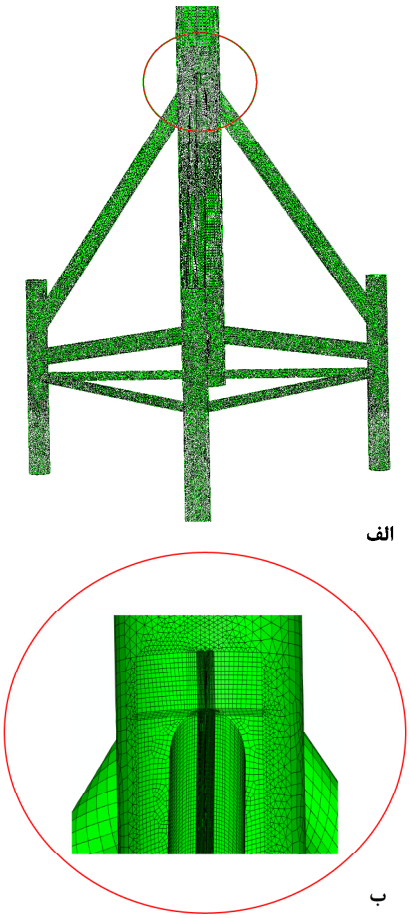
در این مقاله از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS جهت شبیه‌سازی سه بعدی سازه نگهدارنده مرجع استفاده شد. برای شبکه‌بندی نمونه از المان مکعبی ۲۰ گرهی استفاده گردید و افزایش چگالی گره‌ها به سمت نوک ترک در نظر گرفته شد. در نوک ترک از المان‌های سینگولار که گره میانی آن به ¼ انتقال داده شده است استفاده گردید. در شکل ۴- الف شبکه‌بندی سازه نگهدارنده و در شکل ۴- ب شبکه‌بندی اطراف اتصال ترک‌دار نشان داده شده است.

ترک به صورت بخشی از یک بیضی در محل اتصال پایه مرکزی و تقویت کننده جانبی در نظر گرفته شد (شکل ۵- الف). a_{max} ماکزیمم عمق ترک بوده و از آنجاییکه ضرایب شدت تنش در این نقطه ماکزیمم می‌باشد، در این تحقیق ضرایب شدت تنش در این نقطه استخراج گردید. t_α ضخامت قسمت اتصال پایه جانبی به پایه مرکزی و برابر با $t_\alpha = t_{brace}/\cos\alpha$ می‌باشد. α زاویه میان پایه مرکزی و پایه های جانبی است. در شکل ۵- ب شبکه بندی ترک دیده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

جدول ۲- انواع بارگذاری اعمالی به سازه نگهدارنده

نوع بار	تعریف	مثال
بارهای دائمی	بارهای دائمی به بارهایی گفته می شود که مقدار، موقعیت و جهت آنها در طول دوره سرویس دهی سازه تغییر نمی کند و ثابت باقی می ماند.	جرم سازه و تجهیزات دائمی
		فشار هیدرواستاتیک داخلی و خارجی
		نیروی ناشی از عکس العمل
بارهای کارکردی متغیر	بارهای کارکردی متغیر به بارهایی گفته می شود که ممکن است مقدار، موقعیت و جهت آنها در طول دوره سرویس دهی سازه تغییر می کند و وابسته به عملکرد متداول تاسیسات می باشد.	پرسنل
		بارهای ناشی از بلند کردن با جرثقیل
		اصابت کشتی
		بارهای وابسته به عملیات نصب
بارهای محیطی	بارهای محیطی به بارهایی گفته می شود که ممکن است مقدار، موقعیت و جهت آنها در طول دوره سرویس دهی سازه تغییر می کند ولی وابسته به شرایط محیطی حاکم بر سازه می باشد.	بارهای ناشی از باد، برف و یخ
		بارهای هیدرودینامیک ناشی از موج و جریان آب
		بارهای ناشی از زلزله
		اثرات جزر و مد و پیشروی دریا
بارهای تغییر شکل	بار ناشی از تغییر شکل به باری گفته می‌شود که از تغییر شکل‌های تحمیلی به سازه ایجاد می‌گردد.	بارهای ناشی از تغییرات دما
		تغییر شکل های حبس شده در سازه
		تغییر شکل‌های تحمیلی از طرف فونداسیون



الف

ب

شکل ٤- الف) شبکه بندی سازه نگهدارنده، ب) شبکه بندی اتصال ترکدار

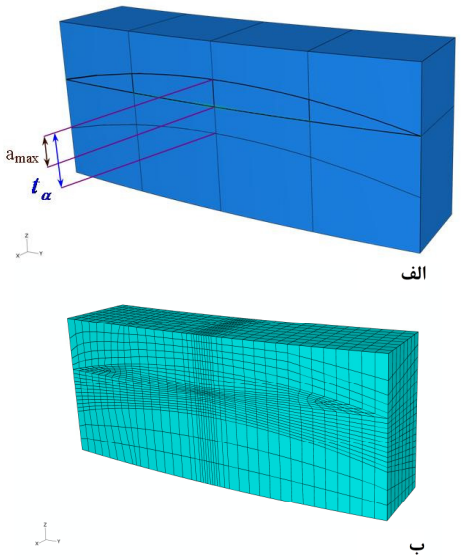
همانطور که قبلا توضیح داده شد، سازه و پایه مرکزی برای سه حالت بارگذاری اعمالی مختلف یعنی بارگذاری فشاری (P)، بارگذاری برشی (S) و بارگذاری خمشی (M) مدلسازی و تحلیل گردید (شکل ۶). بارها به یک مقطع صلب متصل به انتهای برش خورده پایه مرکزی وارد شد. این مقطع صلب به اندازه کافی دور از ترک انتخاب گردید تا از اثرات شرایط مرزی بر تنش های اطراف ترک جلوگیری گردد. از مدل سه‌بعدی اجزا محدود برای بررسی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I و II برای طول‌های مختلف ترک $a/t_\alpha = 0.2,\ 0.3,\ 0.4,\ 0.5$ استفاده گردید.

۵- تحلیل نتایج

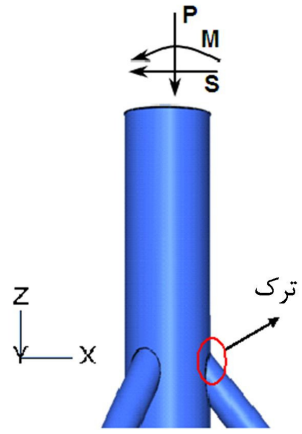
نتایج بدست آمده نشان داد که ضریب شدت تنش مود III در مقایسه با ضرایب شدت تنش مود I و مود II قابل صرفنظر می باشد، بنابراین در این تحقیق فقط به بررسی ضرایب شدت تنش مود I و II پرداخته شده است. توابع شکل $f_I\,(a/t_\alpha)$ و $f_{II}\,(a/t_\alpha)$ به ترتیب برای مود I و II و برای هر سه حالت مختلف بارگذاری P، S و M تعریف گردید که جزئیات آن در جدول ۳ آمده است. تعریف این توابع بی‌بعد این امکان را خواهد داد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

که برای بارگذاری‌های مختلف و هندسه‌های مشابه بتوان به سادگی ضرایب شدت تنش را محاسبه نمود.



شکل ۵- الف) ترک و مشخصات هندسی آن، ب) شبکه‌بندی ترک



شکل ٦- بارگذاری‌های اعمالی به سازه نگهدارنده

شکل‌های ۷- الف، پ و ث به ترتیب تغییرات تابع شکل $f_I(a/t_\alpha)$ را با a/t_α برای بارگذاری های فشاری، برشی و خمشی نشان می‌دهد. بطور مشابه نتایج برای بارگذاری مود II در شکل های ۷- ب، ت و ج نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع شکل شدیداً به عمق ترک وابسته‌اند. همانطورکه دیده می‌شود K_{II} در مقایسه با K_I قابل توجه بوده و صرفنظر کردن از آن می‌تواند سبب خطاهای قابل ملاحظه‌ای گردد. بنابراین برای محاسبه استحکام شکست سازه باید از روش‌های ارائه شده برای تحلیل بارگذاری مود ترکیبی استفاده نمود.

نتایج ارائه شده در شکل ۷ می‌تواند جهت تعیین میزان بارپذیری سازه ترکدار تحت ترکیب‌های مختلف بارهای خارجی P، S و M مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور ضروری است که از تئوری‌های موجود در مکانیک شکست استفاده نمود. تذکر این نکته ضروری است که اگر چه ضرایب بدون بعد $f_I(a/t_\alpha)$ و $f_{II}(a/t_\alpha)$ با افزایش عمق ترک کاهش می‌یابند ولی ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} یک روند فزاینده دارند.

برای استفاده از روابط موجود در مکانیک شکست، الزامیست که داده‌های مربوط به خواص ماده، نوع و مقدار بار وارده و هندسه ترک موجود در سازه مشخص گردد. برای شرایط کرنش صفحه‌ای چقرمگی شکست ذاتی ماده می‌تواند به عنوان ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC} بیان شود. معیارهای مختلفی برای تحلیل و بررسی قطعات ترکدار در حالت بارگذاری ترکیبی ارائه گردیده است [۹ و ۱۰]. یکی از معیارهای پرکاربرد معیار ماکزیمم تنش محیطی MTS می باشد [۹]. بر اساس این معیار، ترک به صورت شعاعی و در راستای ماکزیمم تنش محیطی از نوک ترک رشد می کند، که به صورت زیر می‌توان آن را بیان کرد.

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta}=0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \theta^2}<0 \qquad (۱)$$

σ_θ تنش محیطی و θ جهت محیطی مختصات قطبی می‌باشد. با استفاده از تنش های اطراف نوک ترک و معیار MTS، رابطه بالا را می توان به صورت زیر ساده نموده و زاویه رشد ترک را محاسبه کرد.

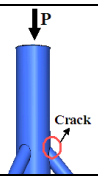
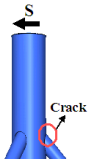
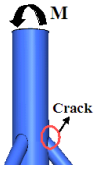
$$\tan^2\frac{\theta_0}{2}-\frac{K_I}{2K_{II}}\tan\frac{\theta_0}{2}-\frac{1}{2}=0 \qquad (۲)$$

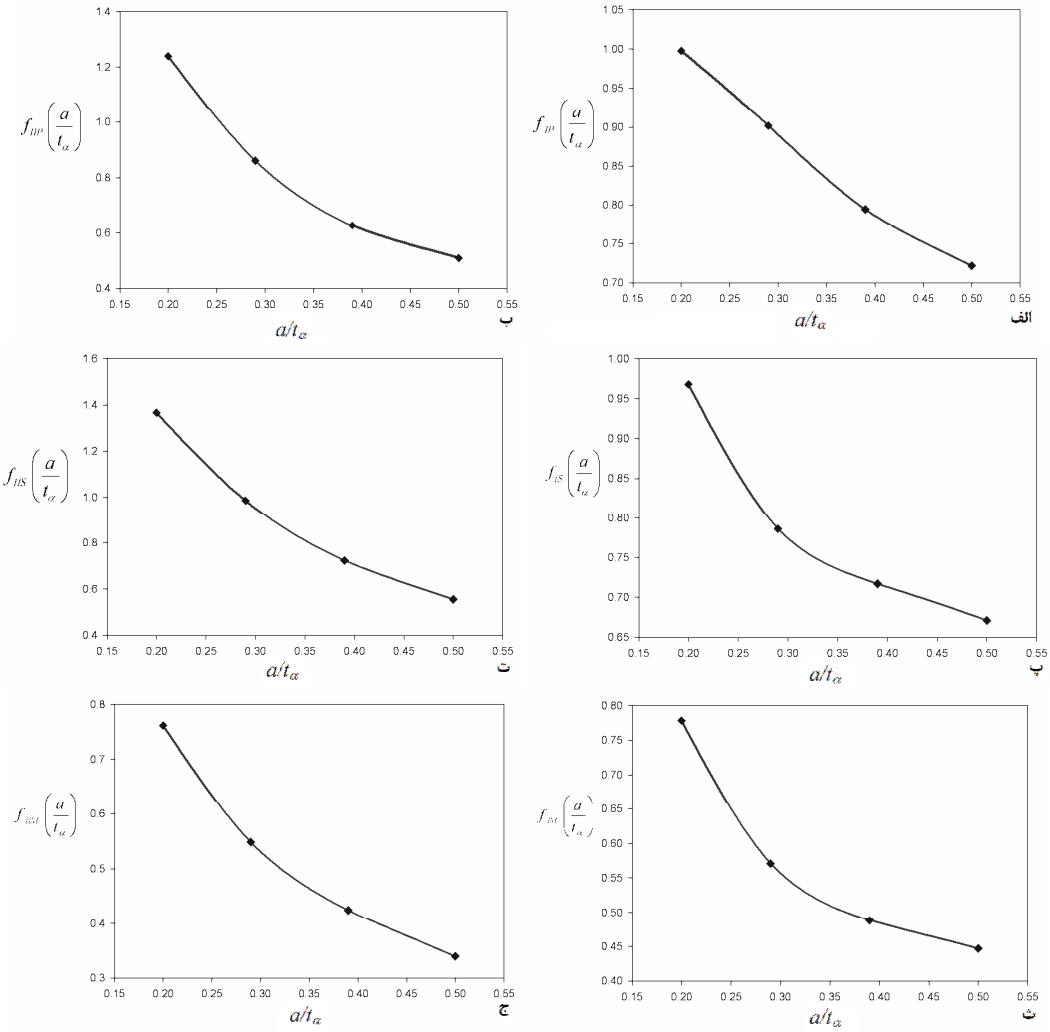
در رابطه بالا θ_0 زاویه رشد ترک می باشد. با بدست آمدن θ_0، بار شکست از رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$K_{Ic}=\cos\frac{\theta_0}{2}\left[K_I\cos^2\frac{\theta_0}{2}-\frac{3}{2}K_{II}\sin\theta_0\right] \qquad (۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

جدول ۳- ضرایب شدت تنش و ضرایب شکل برای حالت های مختلف بارگذاری

نوع بار	نوع بار	شرایط بارگذاری	ضریب شدت تنش	ضریب شکل
بار فشاری		مود I	$K_{IP}=\frac{-2P\sin\alpha}{(r_o^2-r_i^2)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IP}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IP}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=1.25-1.34\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+.44\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2+.44\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3-0.32\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$
		مود II	$K_{IIP}=\frac{-P\cos\alpha}{(r_o^2-r_i^2)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IIP}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IIP}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=2.81-11.49\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+21.6\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2-18.82\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3+6.3\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$
بار برشی		مود I	$K_{IS}=\frac{8S\cos\alpha}{(r_o^2-r_i^2)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IS}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IS}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=1.75-6.02\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+12.7\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2-12.1\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3+4.29\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$
		مود II	$K_{IIS}=\frac{4S\sin\alpha}{(r_o^2-r_i^2)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IIS}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IIS}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=2.84-10.52\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+18.86\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2-16.7\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3+5.64\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$
بار خمشی		مود I	$K_{IM}=\frac{M\left(r_0/\cos\alpha\right)}{4\left(r_o^4-r_i^4\right)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IM}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IM}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=1.72-7.37\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+16.05\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2-15.7\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3+5.67\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$
		مود II	$K_{IIM}=\frac{M\left(r_0/\cos\alpha\right)}{4\left(r_o^4-r_i^4\right)}\sqrt{\frac{a}{t_\alpha}}f_{IIM}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)\sqrt{a}$	$f_{IIM}\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)=1.45-4.78\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)+7.77\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^2-6.57\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^3+2.26\left(\frac{a}{t_\alpha}\right)^4$



شکل ۷- ضرایب شکل برای الف) بارگذاری فشاری P (مود I)، ب) بارگذاری فشاری P (مود II)، پ) بارگذاری برشی S (مود I)، ت) بارگذاری برشی S (مود II)، ث) بارگذاری خمشی M (مود I)، ج) بارگذاری خمشی M (مود II)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

در اینجا می‌توان از اصل برهم نهی استفاده نموده و ضرایب شدت تنش مود I و مود II را به صورت زیر تلفیق نموده و در رابطه (۳) جایگذاری کرد.

$$K_I = K_{IP} + K_{IS} + K_{IM} \qquad (۴)$$
$$K_{II} = K_{IIP} + K_{IIS} + K_{IIM}$$

بر مبنای معیار MTS چنانچه تحت یک بار معلوم عبارت سمت راست رابطه (۳) بزرگتر از چقرمگی شکست ماده K_{IC} باشد شکست سازه اتفاق می افتد.

ترک موجود در سازه همچنین می‌تواند به علت بارهای خستگی وارد بر آن دچار رشد تدریجی شده و نهایتا دچار شکست ناگهانی گردد. برای ارزیابی امکان شروع رشد ترک و رسیدن آن به اندازه بحرانی در سازه نگهدارنده، لازم است که اطلاعات مربوط به خواص رشد ترک خستگی و ماده موجود باشد. همانند پارامتر K_{IC} خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده می تواند روی نرخ رشد ترک تاثیرگذار باشند. برای یک ΔK معین، مواد مختلف می توانند رفتارهای متفاوتی در نرخ رشد ترک نشان دهند. ΔK برابر با K_{max}-K_{min} است. رابطه پاریس به خوبی ارتباط میان رشد ترک خستگی، خواص ماده و بارگذاری را نشان می‌دهد [۱۱].

$$\frac{da}{dN} = A\left(\Delta K\right)^n \qquad (۵)$$

در اینجا N تعداد سیکل های وارده، A یک پارامتر ثابت و n شیب نمودار $\log da/dN$ در مقابل ΔK می باشد. برای بارگذاری های مود I و مود II خالص ΔK مستقیما از تفاضل ضرایب شدت تنش ماکزیمم و مینیمم محاسبه می‌گردد. در بارگذاری مود ترکیبی برای استفاده از رابطه تجربی پاریس لازم است که یک ضریب شدت تنش موثر ΔK_e تعریف گردد. بر مبنای مطالعات تئوری و آزمایشگاهی، ضرایب شدت تنش موثر مختلفی پیشنهاد شده است، برای مثال [۱۲].

$$\Delta K_e = \left(\Delta K_I{}^4 + 8\Delta K_{II}{}^4\right)^{0.25} \qquad (۶)$$

معادله پاریس برای حالت بارگذاری مود ترکیبی به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$\frac{da}{dN} = A\left(\frac{\Delta K_e(a)}{1-R}\right)^n \qquad (۷)$$

که در آن R نسبت K_{max}/K_{min} می‌باشد. گام اول برای آنالیز رشد ترک خستگی تعریف مناسب ضرایب شدت تنش برای طول و بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. در جدول ۳ برای سازه نگهدارنده توربین فراساحلی مرجع، ضرایب شدت تنش ارائه گردید. با استفاده از روابط ارائه شده در این جدول، می‌توان ضرایب شدت تنش را برای هر طول ترک و بارگذاری مشخص در طول دوره رشد ترک تعیین نمود. گام بعدی تعیین شرایط شکست می‌باشد. پایان عمر قطعه زمانی اتفاق می افتد که طول ترک به طول ترک بحرانی a_c برسد. همانطورکه اشاره گردید برای محاسبه طول ترک می‌توان از معیار MTS استفاده نمود (معادله (۳)).

بعد از آنکه a_c تعیین گردید گام بعدی بررسی رشد ترک بر اثر بارهای سیکلی وارده می باشد. با مشخص بودن طول اولیه و نهایی ترک بعلاوه ضرایب شدت تنش می توان طول عمر سازه را با استفاده از رابطه زیر که از رابطه ۷ بدست آمده است محاسبه نمود.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_c} \frac{(1-R)^n da}{A\left(a\Delta K_e\right)^n} \qquad (۸)$$

در اینجا N_f تعداد سیکل‌های بارگذاری لازم برای رسیدن به طول ترک بحرانی، a_i طول اولیه می باشد.

۶- نتیجه گیری

سازه نگهدارنده سه پایه ای به عنوان یکی از نگهدارنده‌های پرکاربرد در توربین‌های بادی فراساحلی، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ترک هایی با طول‌های مختلف در ناحیه بحرانی اتصال پایه مرکزی و تقویت‌کننده جانبی مدل‌سازی گردید و ضرایب شدت تنش با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای حالت‌های مختلف بارگذاری فشاری، برشی و خمشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]

محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار ضریب شدت تنش مود II بسیار قابل توجه بوده و صرفنظر کردن از آن در مقابل ضریب شدت تنش مود I می تواند همراه با خطاهای قابل ملاحظه ای باشد. دیده شد که ضرایب شدت تنش به اندازه طول ترک در قطعه وابسته می‌باشد، بنابراین ضرایب شکل بی بعدی تعریف گردید که با استفاده از آنها می توان ضرایب شدت تنش را برای ترک با عمق‌های مختلف به سادگی تعیین نمود. با استفاده از این فرمول‌بندی‌ها به همراه یکی از معیارهای شکست و یا خستگی می توان مستقیما بار شکست قطعه و عمر خستگی را محاسبه نمود. از نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان برای پیش‌بینی ضرایب شدت تنش در ترک های موجود در سازه‌های مشابه نیز استفاده نمود.

۸- مراجع

1-Schaumann, P. and Wilke, F., (2005), Current developments of support structures for wind turbines in offshore environment, Advances in Steel Structures, Vol. II, P. 1107-1114.
2-Jiao, G., (1992), Reliability-based fatigue and fracture design criteria for welded offshore structures, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 41, P. 271-282.
3-Kam, J.C.P. and Birkinshaw, M., (1994), Reliability-based fatigue and fracture mechanics assessment methodology for offshore structural components, International Journal of Fatigue, Vol. 16, P. 183-192.
4-Ramsamooj, D.V. and Shugar, T.A., (2002), Reliability analysis of fatigue life of the connectors-the US Mobile Offshore Base, Marine Structures, Vol. 15, P. 233–250.
5-Schaumann, P. and Kleineidam, P., (2002), Support structures and foundation concepts for OWECS, World wind energy conference and exhibition, Berlin, 4-8 July.
6-Schaumann, P., Kleineidam, P. and Wilke, F., (2004), Fatigue design of offshore wind energy conversion systems, Stahlbau Vol. 73, P. 716-726.
7-Zaaijer, M.B., (2002), Tripod support structure Pre-design and natural frequency assessment for the 6 MW DOWEC, Dutch Offshore Wind Energy Converter project, DOWEC-F1W2-MZ-02-063.
8-DET NORSKE VERITAS, (2007), Design of offshore wind turbine structures, DNV-OS-J101.
9-Erdogan, F. and Sih, G.C., (1963), On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, Journal of Basic Engineering, ASME, Vol. 85, P. 519-525.
10-Sih, G.C., (1974), Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems, International of Journal of Fracture, Vol. 10, P. 305-321.
11-Paris, P.C. and Erdogan, F.A., (1963), A critical analysis of crack propagation laws. ASME, Vol. 85, P. 528-34.
12-Tanaka, K., (1974), Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis, Engineering Fracture Mechanics Vol. 6, P. 493-507.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.8.8]