

پیش بینی عمر مفید اعضای سکوی فراساحل با الگوریتم جنگل تصادفی

تورج تقی خانی*^۱ و محمدنبی نظری قلاتی^۲

^۱ دانشیار گروه زلزله، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانشجو کارشناسی ارشد عمران- گرایش سازه های دریایی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

پایداری و سلامت سکو های دریایی بدلیل مسائل زیست محیطی، هزینه نصب زیاد و ارزشمندی این نوع سازه ها در وضعیت اقتصاد کشور، حائز اهمیت می باشد. مهم ترین خرابی های سازه های دریایی از نوع خستگی و خوردگی می باشند، پایش و بازرسی این سازه ها در دراز مدت برای تشخیص و شناسایی چنین خرابی هایی به همراه پیش بینی عمر مفید اعضای سازه برای مدیریت سکوها، امری لازم و ضروری می باشد. در این مقاله به بررسی روشی هوشمند برای پیش بینی عمر مفید اعضا در سکوه های دریایی به کمک روش یادگیری ماشین پرداخته می شود. به این منظور سکویی واقعی در محیط خلیج فارس در نرم افزار SACS مدل سازی شده و با ایجاد سناریو های مختلف خرابی در آن با استفاده از نتایج آنالیز خستگی طیفی در نرم افزار SACS، به پیش بینی عمر مفید اعضای سازه به کمک الگوریتم های یادگیری ماشین پرداخته می شود و رویکرد های مدیریتی با توجه به آنالیز های صورت گرفته ارائه می گردد. نتایج ارزیابی الگوریتم به کار گرفته شده بر روی ۲۰ درصد از نمونه هایی که آموزش داده نشده بودند نشان می دهد که دقت این الگوریتم در تخمین عمر مفید خستگی اعضای حساس معادل ۹۴ درصد می باشد.

کلیدواژه ها: عمر مفید، پایش سلامت، سازه های فراساحل، جنگل تصادفی، تحلیل طیفی خستگی

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت و هزینه بالای ساخت و نگهداری سکوه های دریایی با هدف استخراج نفت و گاز و توجه به این نکته که در صورت خرابی می توانند فجایع زیست محیطی بسیاری را بوجود آورند بازرسی فنی از وضعیت سازه ای آنها اهمیت جدی می یابد. این امر افزون بر هزینه بسیار تمامی جوانب را پوشش نمی دهد و امکان تشخیص خرابی در این حالت بسیار دشوار است. به دلیل ماهیت تکراری اغلب بارهای محیطی در دریاها، این سازه ها پیوسته در معرض بارگذاری های متعدد و تکراری قرار دارند. پدیده خستگی یکی از عوامل موثر در سلامت این نوع سازه ها می باشد به طوری که طی دهه های گذشته، صنعت فراساحل اتفاقات ناگواری را شاهد بوده است که اغلب بدلیل پدیده خستگی رخ داده اند. به عنوان یکی از موارد ناخوشایند می توان به فاجعه ای سکوی نفتی نیمه مستغرق نروژی در دریای شمال اشاره کرد که با نام کیلاند الکساندریا^۱ که در این حادثه ۱۲۳ نفر از خدمه ای سکو جان خود را از دست دادند. یکی از مهارندهای اصلی متصل

به پایه ی پانتونی به طور کامل گسیخته شده و از سکو جدا شد که موجب واژگونی کامل سکو گشت. سکوی حفاری نیمه مستغرق سدکو^۲ ۱۳۵ که در سال ۱۹۶۵ در خلیج مکزیک شروع به فعالیت کرد، پس از دو سال در سال ۱۹۶۷ دچار گسیختگی ناشی از خستگی در یکی از مهارهای خود شد. از سکوه های پر کاربرد در خلیج فارس، سکوی ثابت از نوع شابلونی یا جکت می باشد که بصورت یک سازه ی فولادی است که دارای مهاربندها و عرشه می باشد و پایه هایی که توسط شمع های متعدد، در کف دریا ثابت می شوند. ترک های خستگی، اصلی ترین عامل خرابی در سکوه های ثابت شابلونی می باشد. طبق گزارش مربوط به تعداد حوادث و خسارت های رسیده به انواع مختلف سکوه های دریایی واقع در فلات قاره نروژ در بازه ۴۰ ساله (از ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۳) بیشترین آسیب ها مربوط به سکوی شابلونی از نوع خستگی در اعضا می باشد (ایبرون و همکاران^۳، ۲۰۲۰).

پدیده ی خستگی در مواد از اواخر قرن ۱۹ میلادی مورد توجه محققان مختلف قرار گرفت که به طور ویژه تحقیقات ووهرل

³ Ibrion et al,2020

¹ Alexander Kielland

² sedco135

(۲۰۲۱) مشاهده می شود. در زمینه آنالیز خستگی به روش مکانیک شکست نیز عبدالحسین و کادیم^{۱۲} (۲۰۲۰)، امیرافشاری و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۱) و پتر و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۶) در تحقیقات خود از آن بهره برده اند. در سال های اخیر استفاده از روش های محاسبات نرم در عمر خستگی سازه های فراساحل افزایش یافته است. نمونه ای از این مطالعات در بوومیک^{۱۴} (۲۰۱۹) دیده می شود. اکثر مطالعات در زمینه توربین های فراساحل می باشد همانند کارهای آوندانو و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۱)، گان و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۲) و سانتوس و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۲).

مدلسازی آسیب های وارده بر سازه وابسته به نوع آسیب و شدت آسیب می باشد. از روش های متداول مدلسازی آسیب در سازه های دریایی، کاهش ضخامت مقطع در مطالعات لی و همکاران^{۱۷} (۲۰۱۶) رهگذار و بیطرف^{۱۸} (۲۰۲۲) و منصوری نژاد و همکاران^{۱۹} (۲۰۲۱) و کاهش مدول الاستیسیته در مطالعات وانگ و همکاران^{۲۰} (۲۰۱۴)، ژانگ و همکاران^{۲۱} (۲۰۲۱) و کیم و همکاران^{۲۲} (۲۰۲۱) می باشد.

با توجه به مرور ادبیات فنی ملاحظه می شود که اکثر روش ها برای پیش بینی عمر مفید اعضای سازه از روش های تحلیل خستگی که کاری زمانبر و همراه با عدم قطعیت می باشد استفاده نموده اند. لذا این پژوهش به دنبال راهکاری هوشمند و یکپارچه برای تخمین عمر مفید اعضای سازه می باشد که در صورت وجود حجم زیادی از اطلاعات با سرعت و دقت مناسب عمر مفید اعضای آن را برآورد نماید. با توجه به مطالعات محدود انجام گرفته در به کارگیری الگوریتم های یادگیری ماشین در برآورد عمر خستگی به خصوص در مورد سازه های فراساحل و در محیط خلیج فارس، در اینجا تلاش میگردد عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی مورد ارزیابی قرار گیرد. این انتخاب با توجه به دقت این الگوریتم در حل

(۱۸۵۸) منجر به منحنی های SN شد. این منحنی ها بصورت گسترده در تعیین عمر خستگی مورد استفاده قرار می گیرند. راماجاندرا مورس^۲ و همکاران (۱۹۹۴) و گاندی^۳ و همکاران (۲۰۰۰) مطالعاتی در زمینه ی خستگی اتصالات فولادی لوله ای شکل سخت شده انجام دادند، مارکو^۴ و رویز (۲۰۰۷) نیز یک روش دینامیکی غیرخطی کارآمد برای محاسبه ی خرابی خستگی ناشی از امواج برای سازه های فراساحلی و کاربردهای صنعتی آن برای افزایش طول عمر، ارائه دادند.

بهرورز عسگریان و پرویز کوزه گر (۱۳۹۰) طی مطالعات خود بر روی موضوع خستگی در اتصالات یک نمونه سکوی موجود در خلیج فارس (SPD10) نشان دادند که در نظر گرفتن انعطاف پذیری موضعی اتصالات، باعث کاهش در خرابی پیش بینی شده ی ناشی از خستگی در اتصالات می شود که نتایج حاصل از تحقیق در بهینه سازی زمان های بازرسی در زیر آب، تاثیرات مفیدی دارد. تحقیق مذکور توسط نرم افزار المان محدود OpenSees و به روش تحلیل طیفی صورت گرفته است. طاهری و فطرتی (۱۳۹۶) نیز مطالعه ای را بر روی پدیده خستگی یک سکوی جکت در خلیج فارس و به کارگیری رینگ های سخت کننده برای افزایش عمر اتصالات انجام دادند. در این مطالعه، برای تحلیل خستگی از روش طیفی در نرم افزار SACS انجام گرفت. در این مطالعه از رینگ های سخت کننده با ضخامت ۳ سانتی متر استفاده شد. این مطالعه نشان داد استفاده از رینگ های سخت کننده در اتصالات بحرانی عمر خستگی آن اتصالات را به میزان حداقل دو برابر افزایش می دهد.

آنالیز خستگی به دو روش کلاسیک و مکانیک شکست صورت می گیرد. آنالیز خستگی به روش کلاسیک و استفاده از منحنی SN و قانون ماینر در سازه های فراساحل در مطالعات رضایی و همکاران^۵ (۲۰۱۸)، علی و همکاران^۶ (۲۰۲۱)، اعران و همکاران^۷ (۲۰۱۷)، کورریا و همکاران^۸ (۲۰۱۸) و شاه بختی و همکاران^۹

¹² Yeter et al,2016

¹³ Bhowmik,2019

¹⁴ Avendaño et al, 2021

¹⁵ Gan et al,2022

¹⁶ Santos et al,2022

¹⁷ Li et al,2016

¹⁸ Rahgozar and Bitaraf,2022

¹⁹ Mansouri Nejad et al,2021

²⁰ Wang et al, 2014

²¹ Zhang et al,2021

²² Kim et al,2021

¹ wohler

² Ramachandra Murthy

³ Gandi

⁴ Marco and Ruiz

⁵ Rezaei et al,2018

⁶ Ali et al,2021

⁷ Aeran et al,2017

⁸ Correia et al,2018

⁹ Shahbakhty et al,2021

¹⁰ Abd Alhusein and Kadim,2020

¹¹ Amirafshari et al,2021

بر روی محاسبات مرتبط با تعیین عمر مفید باقیمانده یک سازه به صورت مستقیم (به عنوان یک عامل خرابی اصلی) یا غیرمستقیم (به عنوان عامل شروع کننده یا تشدید کننده خرابی)، نقش کلیدی دارد. برای تخمین خستگی سازه‌های موجود از رویکرد کلاسیک استفاده می‌شود که در آن با استفاده از منحنی-های پالمگرن-ماینر^۱ که مبتنی بر قانون آسیب تجمعی^۲، می‌باشند برای بر آورد عمر خستگی استفاده می‌شود.

بر اساس این تئوری خرابی تجمعی خستگی، پدیده‌ای خطی است و عمر کلی یک المان سازه ای که تحت تنش‌هایی با اندازه‌های مختلف قرار دارد برابر مجموع وزنی عمر متناظر با هر یک از تنش-ها با اندازه ثابت S می‌باشد. این قانون به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود که در آن S_i ، i امین دوره تنش است

$$D_n = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N(S_i)} \quad (1)$$

در این رابطه $N(S_i)$ ، تعداد دوره‌های تنش در سطح S_i تا شکست و n_i تعداد دوره‌های تنش مربوطه به سطح تنش در تاریخچه تنش بدست آمده از جزء سازه تحت بارگذاری نوسانی می‌باشد. در این مطالعه تعداد سیکل‌های مربوط به هر حالت دریا^۳ مطابق با دیاگرام پراکندگی امواج در طول عمر مفید سازه برابر است با (راهنمای نرم افزار، SACS 2010^۴):

$$n(s) = \frac{mL}{T_z} \quad (2)$$

L عمر مفید سازه (بر حسب سال) و m احتمال رخداد مربوط به هر حالت دریا مطابق با دیاگرام پراکندگی و T_z پیروید متوسط قطع صفر برای هریک از تنش‌ها می‌باشد.

پس از استخراج اندیس فوق از تحلیلهای تاریخچه زمانی، برای برآورد احتمال شکست مقدار آن با مقادیر بدست آمده از منحنی $S - N$ مقایسه می‌شود. این منحنی به کمک آزمایشات شکست خستگی تحت سیکل‌های (N) با دامنه تنش ثابت (S) بدست می‌آید. در این پژوهش از منحنی‌های S-N آیین نامه API استفاده شده است.

با توجه به معادلات بالا برای خرابی خستگی، میزان خرابی خستگی مربوط به یک حالت دریا در یک نقطه محیطی اتصال در طول عمر مفید سازه به شرح زیر می‌باشد (بارلتروپ و همکاران^۵):

مسائل رگرسیون که کارایی آن مورد تایید محققین مختلف قرار گرفته انجام گرفته است. در اکثر مطالعات گذشته، از روش کاهش مدول الاستیسیته برای مدلسازی آسیب استفاده شده است در این پژوهش با در نظر گرفتن بحث خوردگی در سازه‌های دریایی، اقدام به مدلسازی آسیب از روش کاهش ضخامت عضو استفاده شده است که هم بیانگر کاهش سختی و هم بیانگر کاهش جرم سازه می‌باشد.

در این پژوهش برای در اینجا برای پیش بینی عمر مفید باقی مانده سناریو های مختلف خرابی تشکیل شده و در هر سناریو، سازه تحت بارگذاری محیطی بر اساس داده های ثبت شده در خلیج فارس قرار می‌گیرد. در ادامه با استفاده از آنالیز خستگی به روش طیفی در نرم افزار SACS عمر مفید باقی مانده هر المان بدست می‌آید. مجموعه داده ای شامل مشخصات هر سناریو خرابی به همراه کوتاه‌ترین عمر مفید المان در هر تراز و نوع المان تشکیل گردیده و از آن برای آموزش الگوریتم جنگل تصادفی استفاده می‌گردد. این الگوریتم که یکی از الگوریتمهای شناخته شده در تئوری یادگیری ماشین برای دسته بندی داده ها می‌باشد برای پیش بینی عمر مفید اعضا در سناریوهای دیگر استفاده و کارایی آن بررسی می‌گردد. از این رو برای آشنایی با مبانی روش به کار گرفته شده ابتدا به تشریح تئوری های خستگی پرداخته و در ادامه اقدام به مدلسازی سکو مدنظر به همراه سناریوهای خرابی می‌گردد. سپس ضمن بیان تئوری روش جنگل تصادفی، از مجموعه داده تشکیل شده و آموزش آن اقدام به پیاده سازی روش و تخمین عمر مفید سناریوهای مختلف می‌نماییم.

۲- تحلیل خستگی در سازه سکو

به دلیل ماهیت تناوبی برخی از بارها نظیر اثر موج بر سکوه‌های دریایی، پدیده خستگی و خرابی ناشی از آن می‌تواند یکی از عوامل اصلی شکست در سازه و کاهش دوره عمر بهره‌برداری آن به حساب آید. نکته قابل توجه در اینجا این است که در اثر پدیده خستگی، ترک‌های مویی در عضو ایجاد شده که شدت این ترک‌ها در اثر عوامل ثانویه‌ای نظیر خوردگی که در سازه‌های فولادی بسیار رایج است، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اثر خستگی

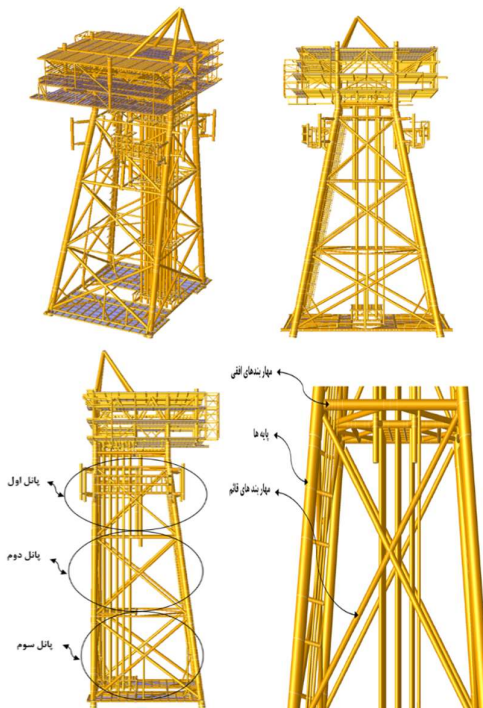
⁴ SACS user manual 2010

⁵ Barltrop et al, 2013

¹ Palmgren-Miner

² Cumulative Damage Law

³ Sea state



شکل ۱- نمای سه بعدی دکل به همراه نامگذاری پانل های ارتفاعی

جدول ۱- صحت سنجی مدل سازی انجام شده

پایه	فشار (مگانیوتون)			کشش (مگانیوتون)		
	مقدار دفترچه	مقدار محاسبه شده	درصد اختلاف	مقدار دفترچه	مقدار محاسبه شده	درصد اختلاف
A1	۳۲/۸۷	۳۲/۸۳	۰/۰۰۱	۸/۷۱	۸/۷۵	۰/۰۰۴
A2	۳۸/۰۵	۳۸/۰۹	۰/۰۰۱	۲/۸۳	۲/۸۶	۰/۰۰۱
B1	۳۱/۴۹	۳۱/۴۸	۰/۰۰۰۳	۵/۵۶	۵/۵	۰/۰۰۱
B2	۴۱/۴۷	۴۱/۵۱	۰/۰۰۱	۵/۸۴	۵/۸۷	۰/۰۰۵

جدول ۲- معرفی سناریوهای خرابی

شماره سناریو	پانل اول			پانل دوم			پانل سوم		
	پایه	مهار قائم	مهار افقی	پایه	مهار قائم	مهار افقی	پایه	مهار قائم	مهار افقی
۱	۱۰٪								
۲		۱۰٪							
۳			۱۰٪						
۴		۱۰٪	۱۰٪						
.....
۷۲	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪
۷۳	۶۰٪	۶۰٪	۶۰٪	۴۰٪	۴۰٪	۴۰٪	۴۰٪	۴۰٪	۴۰٪
۷۴	۴۰٪	۴۰٪	۴۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪

$$D = \frac{N}{\sigma_{RMS}^2} \int_0^{\infty} \frac{s}{N_F(s)} \exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma_{RMS}^2}\right\} ds \quad (3)$$

در این رابطه $N_F(s)$ تعداد سیکل های شکست در یک دامنه تنش S بدست آمده از منحنی $S-N$ می باشد. با توجه به آنچه گفته شد، خرابی خستگی کلی یک نقطه در محیط اتصال برای همه بارگذاری های موج در طول عمر مفید سازه برابر مجموع خرابی خستگی برای هر یک از حالت دریا می باشد. عمر خستگی یک نقطه اتصال با تقسیم عمر مفید طراحی سازه به خرابی تجمعی حاصل خواهد شد (خوشدل، ۱۳۹۶):

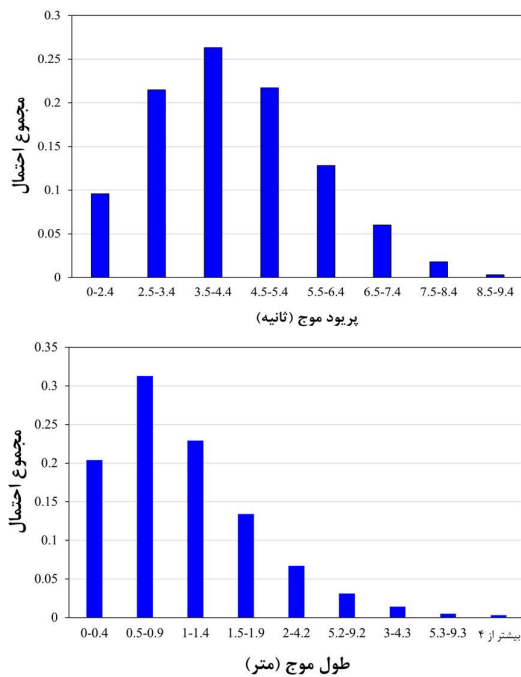
$$fatigue\ life = \frac{1}{D_{cumulative}} \times design\ life \times SF \quad (4)$$

در رابطه فوق SF بیانگر ضریب اطمینان می باشد.

۳- مدل سازی سکو مدنظر

سکو مدنظر یک سکوی ثابت دارای چهارپایه از نوع جکت در منطقه پارس جنوبی و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی روستا اختر در استان بوشهر می باشد که دارای عمق آبخور ۶۱ متر می باشد. سازه این سکو ابتدا در نرم افزار SACS تحت بارهای مرده، زنده، محیطی و عملیاتی مدل سازی شده است. سکو مدنظر به صورت یک سکو واقعی در نرم افزار SACS مدل سازی شده است. رایزر ها، ضربه گیر کشتی، ماد مت ها و بارهای تجهیزات پیش بینی شده در مدل سازی در نظر گرفته شده است. این سکو از سه پانل ارتفاعی تشکیل شده که در هر پانل سه نوع المان سازه ای (پایه ها، مهاربند افقی، مهاربند قائم) تشکیل شده است که در شکل ۱ دیده می شود.

جهت صحت سنجی مدل سازی صورت گرفته در نرم افزار SACS به مقایسه حداکثر نیرو وارد بر پایه ها که جز خروجی های آنالیز دفترچه محاسبات سکو^۱ (2011) می باشد، می پردازیم. این مقایسه در جدول ۱ آورده شده است. یکی از روش های متداول شبیه سازی خرابی در سازه، ایجاد آسیب در اعضا به وسیله کاهش سطح مقطع آن می باشد. این روش در مطالعات مختلفی توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است که در این پژوهش نیز از این روش بهره گرفته شده است. (منصوری نژاد و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۲- دیاگرام پراکندگی امواج

طبق نتایج استخراج شده از آنالیزهای خستگی انجام شده مشاهده شد، المان های پایه ها در پانل اول به همراه مهاربندهای افقی در پانل دوم دارای عمر خستگی کمتری نسبت به سایر المان های سازه می باشند. نتایج تحلیل عمر خستگی برای سناریو سالم و بدون آسیب برای کمترین اتصال برابر با ۵۴ سال می باشد که برای اتصال های المان مهار افقی در پانل دوم می باشد. از این نتایج برای برآورد عمر خستگی استفاده می گردد که نمونه ای از آن در شکل ۳ برای سناریو شماره ۳۸ نشان داده شده است نتایج به صورت عمر حساس ترین المان در پانل ارتفاعی و نوع المان سازه ای ذخیره می شود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل برای استفاده در الگوریتم جنگل تصادفی نیازمند تشکیل یک مجموعه داده هستیم که به صورت هوشمند با دریافت وضعیت سازه بتواند عمر مفید اعضای آن را پیش بینی کند. مجموعه داده بایستی شامل ویژگی های هر سناریو به همراه برچسب باشد که در این پژوهش وضعیت سلامت سازه را به عنوان ویژگی این مجموعه داده در نظر می گیریم. جدول ۱ نشان دهنده درصد کاهش مقطع می باشد چند سناریوی نمونه را نشان می دهد که بیانگر درصد آسیب (خرابی) در سازه می باشد اما ویژگی های این مجموعه داده درصد سلامت سازه می باشد (تفاضل صددرصد و درصد آسیب).

برچسب های این مجموعه داده نیز خروجی های شکل ۳ می باشد که نتایج حاصل از آنالیز خستگی می باشد. همانطور که گفته شده این برچسب ها بیانگر عمر حساس ترین المان در هر پانل ارتفاعی و نوع المان سازه ای طبق شکل ۳ می باشد.

این کاهش مقطع در ۴ حالت کلی برای ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۴۰ درصد و ۶۰ درصد اعمال شده و در سناریوهای آسیب مختلف ساده و ترکیبی تعریف شده است. در این پژوهش ۷۴ سناریو خرابی برای حالات مختلف آسیب در هر پانل و هر نوع المان سازه ای در نظر گرفته شده که به همراه حالت سازه سالم در مجموع ۷۵ سناریو می باشد. ۷۴ سناریو در نظر گرفته شده در جدول ۲ معرفی شده است. در ادامه در جدول ۳، نحوه تعریف سه سناریوی آسیب به شکل شماتیک آورده شده که در آن تعریف هر سناریو علاوه بر میزان خرابی، محل پانل وقوع و نوع المان در هر پانل را نیز شامل می شود.

جدول ۳- نحوه اعمال سناریوهای خرابی

			سناریو خرابی
شماره ۱۰	شماره ۷	شماره ۵	
مهاربند افقی	مهاربند قائم	پایه ها	نوع المان آسیب
شماره ۳	شماره ۲	شماره ۲	شماره
۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	درصد

۴- تشکیل مجموعه داده برای تحلیل خستگی

تحلیل خستگی در برنامه SACS توسط زیر مجموعه تحلیل خستگی 1 به روش طیفی انجام گرفته است. لازم به ذکر می باشد، این آنالیز نیازمند دیاگرام پراکندگی امواج می باشد. در این پژوهش از دیاگرام پراکندگی موج در محیط خلیج فارس استفاده شده که در شکل ۲ نشان داده شده است. دیاگرام پراکندگی امواج نوع داده برای بارگذاری آنالیز خستگی بوده که نشانگر احتمال رخداد هر موج در طی یک سال می باشد.

در ادامه پس از آنالیزهای خستگی صورت گرفته، نتایج تحلیل برای تمام سناریو ها برداشت می شود. طبق آیین نامه API² عمر خستگی اعضا نباید کمتر از دو برابر عمر مفید سازه باشد. با توجه به مشخصات سکو مدنظر، عمر مفید سکو ۲۵ سال و ضریب اطمینان ۲ در نظر گرفته شده. فایل خروجی تحلیل خستگی در نرم افزار SACS مقادیر خرابی خستگی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان محاسبه شده و عمر مفید گزارش شده باید با عمر مفید مینا (۲۵ سال) مقایسه شود.

² API-Recommended practice, (2000)

¹ Fatigue

جدول ۵- ویژگی های آماری مجموعه داده

ویژگی	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
پایه در پانل اول	۳۲۷	۲۵۳	۰/۱۲۵۰	۱۰۴۶
مهار افقی در پانل اول	۳۲۹۴	۱۳۳۲	۰/۶۷۴۱	۵۳۸۵
مهار قائم در پانل اول	۱۰۰	۱۶/۲۱	۶۲	۱۶۲
پایه در پانل دوم	۶۹۶	۶۹۹	۰/۴۸۷۴	۵۸۵۰
مهار افقی در پانل دوم	۲۲/۴۴	۸/۵۸	۲	۳۲/۴۴
مهار قائم در پانل دوم	۶۸۴	۶۶	۴۷۳	۹۶۷
پایه در پانل سوم	۷۱۲۵	۴۱۵۹	۱۲/۶۷	بیشتر از ۱۰۰۰۰
مهار افقی در پانل سوم	بیشتر از ۱۰۰۰۰	بیشتر از ۱۰۰۰۰	بیشتر از ۱۰۰۰۰	بیشتر از ۱۰۰۰۰
مهار قائم در پانل سوم	۳۱۵۲	۹۶۴	۲۴۶۹	بیشتر از ۱۰۰۰۰

۵- الگوریتم جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک الگوریتم محبوب و کارآمد است که با هدف حل مسائل دسته‌بندی و رگرسیون توسط بریمن^۱ در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است. این الگوریتم از تعداد زیادی درخت تصمیم تشکیل شده است. درخت تصمیم یک روش یادگیری نظارت شده غیرپارامتری است که می‌تواند روی مجموعه داده‌ها تصمیم‌گیری انجام داده و از ساختار درخت برای حل مساله طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده کند (احسانی و همکاران^{۲،۳}، ۲۰۲۲).

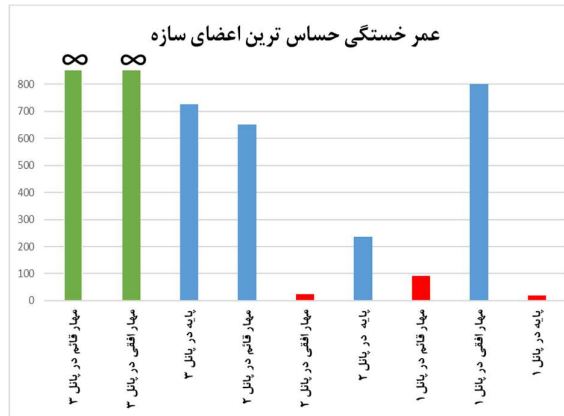
به عبارت بهتر، جنگل تصادفی، مجموعه ای از درختان تصادفی رگرسیون شده است. درخت، یک گراف ساده بدون جهت است، که این درختان برای تخمین مقدار رگرسیون باهم جمع شده اند. ساده‌ترین الگوریتم، درخت تصمیم، $ID3^3$ نام دارد که اولین بار در سال ۱۸۹۶ توسط قینلان^۴ مطرح شد. این الگوریتم به جستجوی داده های حد بالا و پایین پرداخته و در داده های ورودی، بهترین و نزدیک‌ترین را به هدف بر می‌گزیند:

$$RF = \{r_n(X, \theta_m, D_n)\} \quad (5)$$

در رابطه ۵، پارامترهای $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ خروجی های مستقل با توزیع یکسان (IDD^5) در متغیر تصادفی هستند. ورودی D_n (داده های ورودی جنگل تصادفی) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$D_n = \{(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)\} \quad (6)$$

متغیر θ به X و D_n وابسته نمی باشند. هدف کلی جنگل تصادفی، تخمین مقدار r_n است؛ هر درخت به تعداد $2 \log_2^m$ نقطه انتهایی دارد که آن را به صورت تقریبی K_m در نظر می‌گیرند (حبیب زاده و غفار زاده، ۱۳۹۶).



شکل ۳- نتایج برداشت شده از تحلیل خستگی

جدول ۴- مجموعه داده الگوریتم جنگل تصادفی

شماره سناریو	ویژگی					
	پانل اول		پانل دوم		پانل سوم	
	پایه	مهار افقی	مهار قائم	پایه	مهار افقی	مهار قائم
۴	۹۰	۹۰	۹۰	۰	۰	۰
۲۱	۸۰	۸۰	۸۰	۰	۰	۰
۳۸	۶۰	۶۰	۶۰	۰	۰	۰
برچسب						
۴	۴۵۳	۴۰۸۸	۱۲۳	۷۷۲	۲۹/۳	۶۹۱
۲۱	۴۲	۴۵۱۷	۱۱۴	۵۳۹	۲۷/۷	۶۷۷
۳۸	۲/۸	۱۲۲۴	۹۱	۲۲۷	۲۳/۵	۶۵۲

طبق جدول ۲ و شکل ۱ سازه مدنظر به سه پانل ارتفاعی و سه نوع المان سازه ای که در مجموع ۹ حالت می‌باشد، تقسیم بندی شده است که در شکل ۳ نیز نتایج به صورت ۹ خروجی قابل مشاهده می‌باشد. نمونه ای از مجموعه داده تشکیل شده در جدول ۴ نیز آورده شده است.

در ادامه بدلیل حجم بالای نمایش خروجی های آنالیز خستگی برای ۷۵ سناریو، ویژگی های آماری این مجموعه داده در جدول ۵ به نمایش گذاشته شده است که با استفاده از این ویژگی های می‌توان مقادیر کمی آماری هر خروجی را مشاهده کرد. به طور مثال طبق جدول ۵ می‌توان مشاهده کرد که پایه ها در پانل اول دارای میانگین عمر مفید کمتری نسبت به سایر المان ها هستند و در خروجی ۷۵ سناریو می‌توان دریافت که پایه ها در پانل اول در مقادیر کمینه نیز مقدار کمتری نسبت به سایر المان ها را دارا هستند.

⁴ Quinlan

⁵ Independent and Identically Distributed

¹ Breiman

² Ehsani et al, 2022

³ Iterative Dichotomizer

که در آنها T مقدار هدف (اندازه گیری شده)، P مقدار پیش بینی شده، \bar{T} مقدار میانگین داده های هدف، \bar{P} میانگین داده های پیش بینی شده توسط مدل و n تعداد داده های مورد بررسی می باشد.

۶- نتایج و بحث

در این مطالعه کارایی الگوریتم جنگل تصادفی در تشخیص عمر مفید اعضای سازه بررسی شده است. برای هر برجسب مجموعه داده یک مدل الگوریتم تخمین عمر مفید اعضای سازه تشکیل داده می شود. طبق جدول ۵ با توجه به عمر مفید بالای ۱۰۰۰ سال برای تمام سناریوها در مهارقی در پانل سوم و میانگین عمر مفید ۳۱۵۳ سال درمهاربند قائم در پانل سوم (پایین ترین تراز پانل) از روند خروجی های الگوریتم حذف شده و نتایج برای این دو خروجی محاسبه نمی شود. در بررسی بین گزارش خروجی نرم افزار این دو خروجی جز بزرگترین عمر مفید های سازه می باشند، لذا بررسی این دو خروجی مفاهیم اضافی به روند این پژوهش اضافه نمی کند.

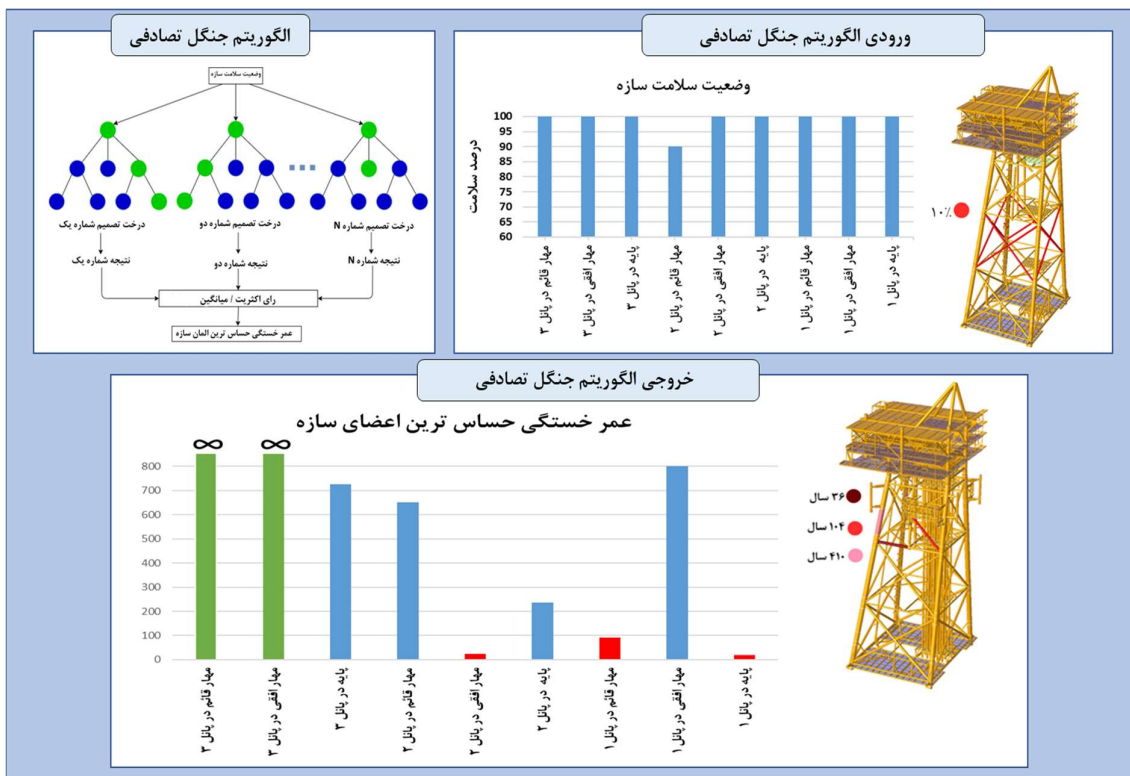
الگوریتم های درخت محور یادگیری ماشین در حل مسائل طبقه بندی و رگرسیون^۱ به دلیل سهولت در فهم درخت تصمیم، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده اند.

شاخص های آماری مختلفی برای ارزیابی دقت مدل های جنگل تصادفی وجود دارد. میانگین مربعات خطا^۲ (MSE)، ضریب تعیین^۳ (R^2)، میانگین خطای مطلق^۴ (MAE) و دقت مدل ها مورد بررسی قرار گرفتند. روابط (۷ تا ۹)، معادلات مورد نظر برای به دست آوردن این شاخص ها را نشان می دهد (هی و همکاران^۵، ۲۰۱۴).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (7)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - P_i)^2}{n} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|T_i - \bar{T}_i|) \quad (9)$$



شکل ۴- روند طی شده در این پژوهش

⁴ Mean Absolute Error

⁵ He et al,2014

¹ Regression

² Mean Squared Error

³ R-squared correlation

جدول ۶- عملکرد جنگل تصادفی

شاخص های عملکرد الگوریتم						تنظیم پارامترهای الگوریتم			خروجی	
آزمایش			آموزش			تعداد درخت تصمصیم	حالت تصادفی	درصد داده یادگیری		
MSE	MAE	R2	MSE	MAE	R2					
۳۲۹۲/۵۵	۳۶/۶۲	۰/۹۶	۷۹۹/۸۲	۱۵/۳۸	۰/۹۸	۱۸۰	۱	۸۰	پایه ها	پایل اول
۱۶۴۷۵۷/۱۹	۲۸۳/۵۹	۰/۹۲	۴۵۸۱۸/۷۴	۱۱۷/۶۸	۰/۹۷	۱۸۰	۱	۸۰	مهاربند افقی	
۱۰/۳۳	۴/۴۸	۰/۹۴	۱۹/۹۳	۱/۶۸	۰/۹۳	۱۸۰	۱	۸۰	مهاربند قائم	
۱۲۲۶۳/۳۸	۹۳/۹۸	۰/۹۱	۴۱۲۲/۹۳	۳۹/۸۷	۰/۹۱	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	پایه ها	پایل دوم
۱/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۷	۱/۴۳	۰/۶۸	۰/۹۸	۱۰۰	۱	۸۰	مهاربند افقی	
۲۶۰/۱۳	۱۲/۵	۰/۹۲	۳۷۹/۴۱	۱۰/۱۳	۰/۹۲	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	مهاربند قائم	
۱۰۲۴۰۸۰	۷۹۵	۰/۹۴	۵۹۳۷۳۹/۰۲	۴۵۵/۲۳	۰/۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	پایه ها	پایل سوم
-	-	-	-	-	-	-	-	-	مهاربند افقی	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	مهاربند قائم	

داده‌های آموزشی و تست تقسیم می‌شوند. تعداد درخت تصمصیم یعنی تعداد درختانی است که الگوریتم پیش از دریافت آرای بیشینه یا دریافت میانگین پیش‌بینی‌ها می‌سازد. به طور کلی، تعداد بیشتر درخت‌ها، کارایی را افزایش می‌دهند و پیش‌بینی‌ها را پایدارتر می‌سازند، اما محاسبات را کندتر می‌کنند. در مورد شاخص‌های عملکرد نیز به طور کامل در بخش قبل توضیحات داده شده است. همچنین قابل ذکر می‌باشد که شاخص‌های عملکرد الگوریتم در این بخش حاکی از عملکرد خوب در پیش‌بینی عمر اعضای حساس سازه می‌باشد. طبق جدول ۶ مشاهده می‌شود که بین خروجی‌های مختلف کمترین عدد شاخص R^2 عدد ۰/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده دقت ۹۱ درصدی در تشخیص عمر مفید این الگوریتم می‌باشد.

۶-۱- ارزیابی مدل‌ها

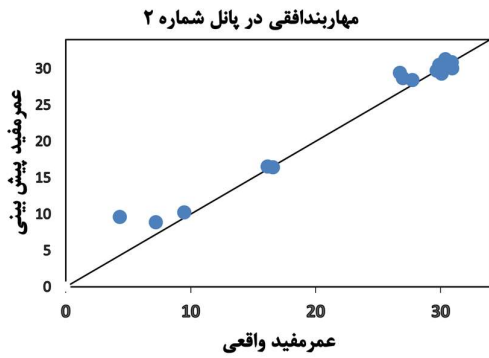
گراف‌های شکل ۵ نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی برای چند خروجی به شرح زیر می‌باشد: راستای افقی این نمودار بیانگر مقدار عمر مفید واقعی و راستای عمود بیانگر

دقت و خروجی‌های الگوریتم جنگل تصادفی در ادامه تشریح می‌شود. همچنین در شکل ۴ روند طی شده در این پژوهش برای الگوریتم جنگل تصادفی در تشخیص عمر مفید اعضای سازه تشریح شده است.

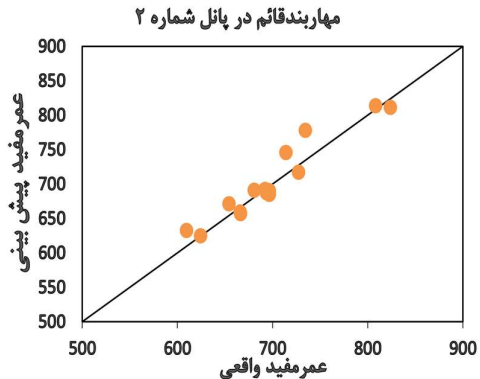
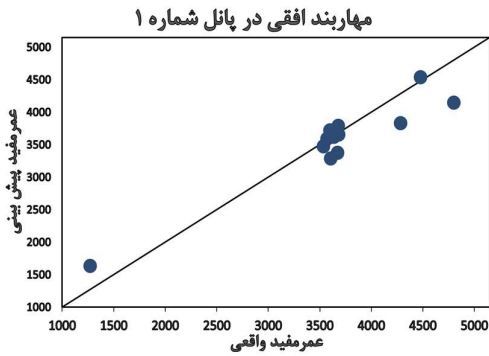
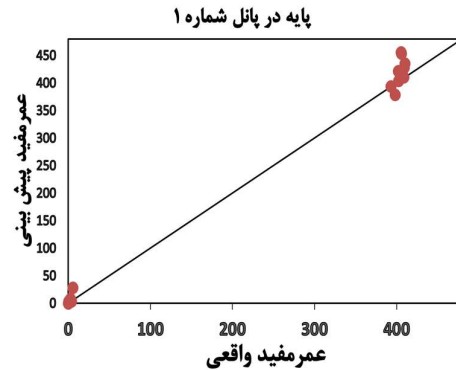
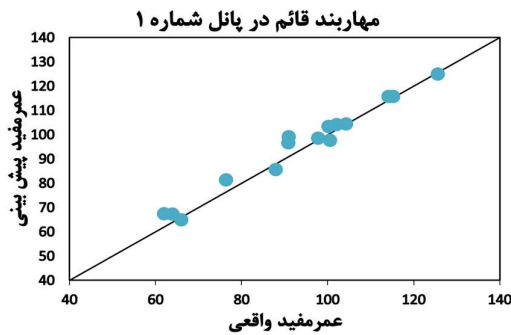
طبق جدول ۶ در ستون تنظیم پارامترهای الگوریتم، درصد داده‌های تفکیک شده برای آموزش (train) نمایش داده شده است. برای کنترل دقت مدل استخراج‌شده، می‌توان مجموعه داده را به دو قسمت تقسیم کرد: مجموعه‌ی آموزشی (training set) و مجموعه‌ی آزمایشی یا تست (testing set). از داده‌ی آموزشی برای آموزش روش یادگیری ماشینی و استخراج مدل آموزشی استفاده می‌شود. مدل استخراجی حاصل روی مجموعه‌ی تست اعمال می‌شود تا دقت مدل بررسی شود.

در ستون بعدی حالت تصادفی^۱ به این معنا می‌باشد که اگر مقدار این پارامتر را برابر هر عددی صحیحی در نظر گرفته شود، در آن صورت در هر مرحله‌ای که الگوریتم برای تولید مدل تکرار می‌شود، داده‌ها به نسبت مساوی با مرحله‌ی قبل به

¹ Random State



مقدار عمر مفید پیش بینی شده می‌باشند و خط رسم شده خط $X=Y$ می‌باشد در نتیجه هر چه این نقاط به خط نزدیک باشند عملکرد الگوریتم بهتر می‌باشد. طبق شکل ۵ تخمین عمر حساس‌ترین مهاربند قائم در پانل شماره یک بهترین عملکرد نسبت به سایر خروجی‌ها را دارد.

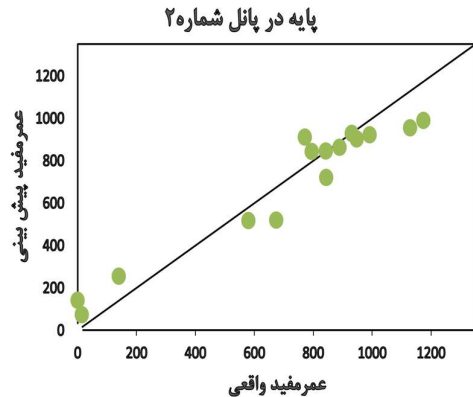


شکل ۵- ارزیابی خروجی‌های جنگل تصادفی

۲-۶- آنالیز حساسیت

با استفاده از برنامه‌ای که در نرم افزار پایتون بر روی مجموعه داده تشکیل شده برای تخمین عمر مفید اعضا نوشته شده، آنالیز حساسیت برای دو المان حساس سکو مدنظر صورت گرفت که مطابق شکل ۶ نتایج به صورت زیر می‌باشد:

برای مهاربند افقی پانل دوم که حساس‌ترین عضو به پدیده خستگی است و دارای کمترین عمر مفید می‌باشد اگر درصد سلامت آن به کمتر از ۷۰ درصد برسد (معادل خرابی ۳۰ درصد) به معنای این است که عمر این اعضا به کمتر از ده سال می‌رسد و کارهای تعمیراتی برای افزایش طول عمر این اعضا باید اعمال شود.



۸- مراجع

حبیب زاده، ا. و غفارزاده، ح.، (۱۳۹۶)، "تشخیص خرابی سازه با استفاده از بسته موجک و الگوریتم جنگل تصادفی در سازه آزمایش شده در مرکز تحقیقات لرزه ای دانشگاه بریتیش"، فصلنامه پژوهش های زیر ساخت های عمرانی، دوره ۳، شماره ۲.

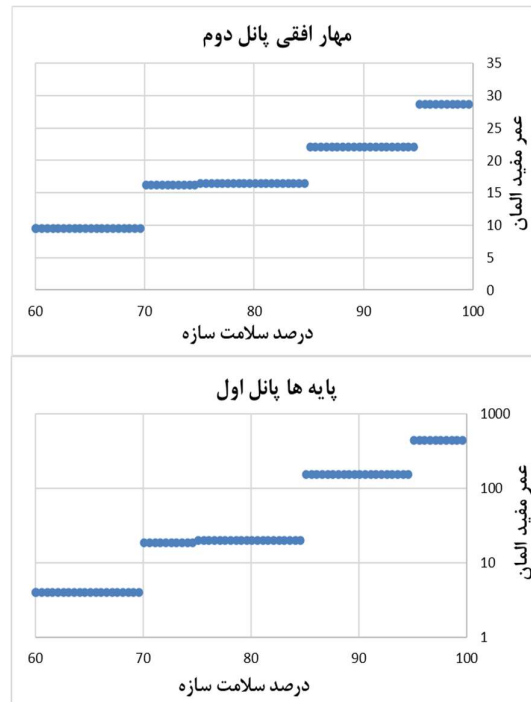
خوشدل، س.، (۱۳۹۰)، "آموزش کاربردی نرم افزار SACS و آنالیز و طراحی سکوهای دریایی"، چاپ اول، انتشارات الیاس.

طاهری، ع. و فطرتی، ع. (۱۳۹۶)، "تحلیل خستگی قطعی یک سکوی پایه ثابت جکت موجود در خلیج فارس و استفاده از رینگ های سخت کننده برای افزایش عمر اتصالات"، درهفتمین همایش بین المللی صنایع فراساحل.

عسگریان، ب. و کوزه گر، پ. (۱۳۹۰)، "بررسی اثر انعطاف پذیری اتصال در ارزیابی خستگی در سکوهای ثابت فلزی دریایی"، نشریه سازه و فولاد، سال پنجم شماره ۱۰.

- Abd Alhusein, T. A., & Kadim, J. A. (2020). "Fatigue Analysis of fixed jacket platform using FEM". Inter. J. Scie. Eng. Res, 11, 2229-5518.
- Aeran, A., Siriwardane, S. C., Mikkelsen, O., & Langen, I. (2017). " A new nonlinear fatigue damage model based only on SN curve parameters". International Journal of Fatigue, 103, 327-341.
- Ali, L., Khan, S., Bashmal, S., Iqbal, N., Dai, W., & Bai, Y. (2021). " Fatigue crack monitoring of T-type joints in steel offshore oil and gas jacket platform". Sensors, 21(9), 3294.
- Amirafshari, Peyman & Brennan, Feargal & Kolios, Athanasios. (2020). " A fracture mechanics framework for optimising design and inspection of offshore Wind Turbine support structures against fatigue failure". 10.5194/wes-2020-65.
- API-recommended Practice 2A-WSD, twenty-first ed., 2000. RP 2A-WSD.
- Avendano-Valencia, L.D. & Abdallah, Imad & Chatzi, Eleni. (2021). "Virtual fatigue diagnostics of wake-affected wind turbine via Gaussian Process Regression". Renewable Energy. 170. 10.1016/j.renene.2021.02.003.
- Bartrop, N. D., & Adams, A. J. (2013). "Dynamics of fixed marine structures" (Vol. 91). Butterworth-Heinemann.
- Bhowmik, S. (2019, October). "Life extension of offshore structure using machine learning". In Offshore Technology Conference Brasil. OnePetro.
- Correia, J. A., Correia, M., Holm, M., Ekeborg, J., Lesiuk, G., Castro, J. M., ... & Calçada, R. (2018, July). "Evaluation of fatigue design curves for a double-side welded connection used in offshore applications". In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 51678, p. V06AT06A028). American Society of Mechanical Engineers.
- Ehsani, M., Moghadas Nejad, F. and Hajikarimi, P. (2022) "Developing an optimized faulting prediction model in Jointed Plain Concrete Pavement using artificial neural networks and random forest methods," International journal of pavement engineering, pp. 1-16.
- Gan, L., Wu, H., & Zhong, Z. (2022). " Fatigue life prediction considering mean stress effect based on

در ادامه برای پایه ها در پانل اول که دومین عضو حساس سازه می باشد نیز اگر درصد سلامت سازه به کمتر از ۸۵ درصد برسد (معادل ۱۵ درصد خرابی) عمر مفید این اعضا به کمتر از ۱۵ سال کاهش یافته و تعمیر آن اجتناب ناپذیر است.



شکل ۶- آنالیز حساسیت

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش بینی عمر مفید اعضای سکوهای فراساحل استفاده شده است. عمر مفید حساس ترین المان در هر پانل به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. پس از انجام تحلیل خستگی بر روی ۷۵ سناریو خرابی در نظر گرفته شده و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی به بررسی میزان تشخیص هوشمند عمر مفید اعضای سازه پرداخته شد. نتایج نشان می دهد این الگوریتم توانایی بالایی در تشخیص عمر مفید اعضای سازه بر اساس وضعیت سلامت سازه را دارد و با دقت بالا قادر به پیش بینی عمر مفید اعضای سازه می باشد. همچنین با آنالیز حساسیت انجام شده مشخص شد که اگر درصد خرابی پایه ها در پانل اول به بیشتر از ۱۵ درصد برسد به این معناست که عمر مفید این اعضا به کمتر از ۱۵ سال رسیده و سلامت سکو به خطر می افتد.

- offshore platform using simulated and measured data". *Journal of Ocean University of China*, 13, 397-406.
- Wöhler, A. (1858). "Bericht über die Versuche, welche auf der Königl. Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn mit Apparaten zum Messen der Biegung und Verdrehung von Eisenbahnwagen-Achsen während der Fahrt", angestellt wurden. *Zeitschrift für Bauwesen*, 8, 642-652.
- Yeter, B., Garbatov, Y., & Soares, C. G. (2016). "Evaluation of fatigue damage model predictions for fixed offshore wind turbine support structures". *International Journal of Fatigue*, 87, 71-80.
- Zhang, Z., Sun, C., & Jahangiri, V. (2022). "Structural damage identification of offshore wind turbines: A two - step strategy via FE model updating". *Structural Control and Health Monitoring*, 29(2), e2872.
- random forests and kernel extreme learning machine". *International Journal of Fatigue*, 158, 106761.
- Gandhi, P., Murthy, D. R., Raghava, G., & Rao, A. M. (2000). "Fatigue crack growth in stiffened steel tubular joints in seawater environment". *Engineering Structures*, 22(10), 1390-1401.
- He, Z., Wen, X., Liu, H. and Du, J. (2014). "A comparative study of artificial neural network, adaptive neuro fuzzy inference system and support vector machine for forecasting river flow in the semiarid mountain region". *Journal of Hydrology*, 509, pp. 79-386.
- Ibrion, Michaela & Paltrinieri, Nicola & R. Nejad, Amir. (2020). "Learning from Failures: Accidents of Marine Structures on Norwegian Continental Shelf over 40 Years Time Period." *Engineering Failure Analysis*.111.104487.10.1016/j.engfailanal.2020.104487.
- Kim, B., Kim, C., & Ha, S. H. (2021). " Multiple Damage Detection of an Offshore Helideck through the Two-Step Artificial Neural Network Based on the Limited Mode Shape Data". *Sensors*, 21(21), 7357.
- Li, Y., Wang, S., Zhang, M., & Zheng, C. (2016). " An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures". *Journal of Marine Science and Application*, 15(2), 182-192.
- Mansouri Nejad, Nakisa, et al. (2021). "A damage detection procedure using two major signal processing techniques with the artificial neural network on a scaled jacket offshore platform." *Advances in Structural Engineering* 24.8: 1655-1667
- Rahgozar, R., & Bitaraf, M. (2022). " A summary evaluation of output-only damage-sensitive features for structural health monitoring of offshore platforms subjected to ambient loads". *Ocean Engineering*, 266, 112892.
- Ramachandra Murthy, D. S., Madhava Rao, A. G., & Santhakumar, A. R. (1994). " Corrosion fatigue of stiffened offshore steel tubular joints". *Journal of Structural Engineering*, 120(7), 1991-2010.
- Rezaei, R., Fromme, P., & Duffour, P. (2018). " Fatigue life sensitivity of monopile-supported offshore wind turbines to damping". *Renewable energy*, 123, 450-459.
- Santos, F., Noppe, N., Weijtjens, W., & Devriendt, C. (2022). "Data-driven farm-wide fatigue estimation on jacket-foundation OWTs for multiple SHM setups". *Wind Energy Science*, 7(1), 299-321.
- Shabakhty, N., Haselibozechaloe, D., & Correia, J. A. (2021, September). "Investigation on fatigue damage calibration factors in offshore structures". In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 174, No. 3, pp. 65-80). Thomas Telford Ltd.
- SPD13 Structural Design Basis, Pars Oil and Gas Company, 2011. South Pars Gas Field Development (Phase 13).
- Torres, M. A., & Ruiz, S. E. (2007). "Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time". *Engineering Structures*, 29(9), 2183-2192.
- Wang, S., Liu, F., & Zhang, M. (2014). " Modal strain energy based structural damage localization for