

EXTENDED ABSTRACT

Predicting the Remaining Life of Offshore Structure Members with Random Forest Algorithm

Touraj Taghikhany*, Mohammad Nabi Nazari Ghalati

Faculty of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Received: 04 April 2023; **Reviewed:** 08 June 2023; **Accepted:** 26 June 2023

Keywords:

Remaining life, Health monitoring, Offshore structures, Random forest, Fatigue spectral analysis.

1. Introduction

Considering the importance and high cost of construction and maintenance of offshore platforms for the purpose of oil and gas extraction, and considering the fact that in case of failure, they can cause many environmental disasters, technical inspection of their structural condition is of serious importance. In addition to the high cost, this does not cover all aspects and it is very difficult to detect the failure in this case. Due to the repetitive nature of most of the environmental loads in the seas, these structures are constantly exposed to multiple and repetitive loadings. The phenomenon of fatigue is one of the effective factors in the health of these types of structures, so that during the past decades, the offshore industry has witnessed unfortunate events that often occurred due to the phenomenon of fatigue. One of the unpleasant cases can be mentioned the disaster of the Norwegian semi-submerged oil platform in the North Sea, named as the Kyland Alexandria, in which 123 people of the platform's crew lost their lives. One of the main braces connected to the base of the pontoon was completely broken and separated from the platform, causing the platform to completely overturn. The semi-submersible rig Sedo 135, which began operating in the Gulf of Mexico in 1965, suffered a fatigue failure in one of its rigs in 1967 after two years. One of the most widely used platforms in the Persian Gulf is the fixed platform of the stencil or jacket type, which is a steel structure that has braces and a deck, and foundations that are fixed on the sea floor by numerous piles. Fatigue cracks are the main failure factor in fixed jacket platforms.

Therefore, this research is looking for a smart and integrated solution to estimate the remaining life of structural members, which can estimate the remaining life of its members with appropriate speed and accuracy even if there is a large amount of information. Here, to predict the remaining life, different failure scenarios are formed and in each scenario, the structure is subjected to environmental loading based on the data recorded in the Persian Gulf. In the following, using fatigue analysis by spectral method in SACS software, the remaining life of each element is obtained. A data set including the characteristics of each failure scenario along with the shortest remaining life of the element in each level and type of element is formed and it is used to train the random forest algorithm. This algorithm, which is one of the well-known algorithms in machine learning theory for data classification, is used to predict the remaining life of members in other scenarios and its effectiveness is checked. Therefore, in order to get familiar with the basics of the method used, we will first explain the theories of fatigue and then proceed to model the intended platform along with the failure scenarios. Then, we will implement the method and estimate the remaining life of different scenarios from the data set and its training.

2. Methodology

2.1. Fatigue

Due to the periodic nature of some loads, such as the effect of waves on marine platforms, the phenomenon of fatigue and damage caused by it can be considered one of the main factors of failure in the structure and reducing its service life. The noteworthy point here is that due to the phenomenon of fatigue, capillary cracks have been created in the member, and the severity of these cracks increases due to secondary factors such as corrosion, which is very common in steel structures. Therefore, it can be concluded that the effect of fatigue on the calculations related to determining the remaining life of a structure directly (as a main failure factor) or indirectly (as a failure initiating or intensifying factor) plays a key role. To estimate the fatigue of the existing structures, we use the classical approach, in which the Palmgren-Miner curves, which are based on the law of cumulative damage, are used to calculate the fatigue life.

2.2. Platform modeling and data collection

The intended platform is a fixed platform with a jacket-type stool in the South Pars region and 100km southwest of Akhtar village in Bushehr province, which has a water intake depth of 61 meters. The structure of this platform was first modeled in SACS software under dead, live, environmental and operational loads. This platform consists of three height panels, each panel consists of three types of structural elements (bases, horizontal brace, vertical brace). The damage considered in this research is considered from the method of reducing the cross-section of structural members. This cross section reduction is applied in 4 general modes for 10%, 20%, 40% and 60% and defined in different simple and combined damage scenarios.

Fatigue analysis in the SACS program has been performed by the Fatigue subset in a spectral way. Then, after performing the fatigue analysis, the remaining life results of the structural members for 75 failure scenarios were collected as a dataset for the random forest algorithm.

3. Results and discussion

After considering the health status of the structure as the input of the algorithm and the remaining life of the most sensitive structural element as the output of the algorithm, and the data set was formed, the algorithm was analyzed.

It should be mentioned that the performance indicators of the algorithm in this section indicate good performance in predicting the life of sensitive members of the structure. According to Table 1, it can be seen that between the output. The lowest index value of R^2 is 0.91, which indicates the accuracy of 91% in determining the remaining life of this algorithm.

3.1. Sensitivity analysis

Using a program written in Python software on the data set to estimate the remaining life of the members, a sensitivity analysis was considered for two sensitive elements of the platform:

For the horizontal brace of the second panel, which is the most sensitive member to the phenomenon of fatigue and has the lowest remaining life, if its health percentage reaches less than 70% (equivalent to 30% failure), it means that the life of these members is less than ten years. Maintenance and repair work should be applied to increase the lifespan of these members.

Next, for the legs in the first panel, which is the second most sensitive member of the structure, if the percentage of health of the structure reaches less than 85% (equivalent to 15% failure), the remaining life of these members is reduced to less than 15 years, and its repair is inevitable.

The last two rows in Table 1 were removed from the analysis due to the high value of the average remaining life, and this means that these two members are the last members of the structure to give up.

4. Conclusions

In this research, the random forest algorithm was used to predict the remaining life of offshore platform members. The remaining life of the most sensitive element in each panel was considered as output. After performing the fatigue analysis, 75 failure scenarios were considered and using the random forest algorithm, the amount of intelligent detection of the remaining life of the structural members was investigated. The results show that this algorithm has a high ability to detect the remaining life of structural members based on the

health status of the structure and is able to predict the remaining life of structural members with high accuracy. Also, with the sensitivity analysis, it was found that if the failure percentage of the legs in the first panel reaches more than 15%, it means that the remaining life of these members has reached less than 15 years and the health of the platform is endangered.

Table 1. Random forest function

Algorithm performance indicators						Hyper parameters of the algorithm			Output	
Test			Train			Number of decision trees	Random state	Percentage of trainig data		
MSE	MAE	R2	MSE	MAE	R2					
3292	36.63	0.96	799.82	18.38	0.98	180	1	80	Legs	First panel
164757	283.59	0.92	45818	117.68	0.97	180	1	80	Horizontal brace	
10.33	4.48	0.94	19.93	1.68	0.93	180	1	80	Vertical brace	
12263	93.98	0.91	4122	39.87	0.91	180	100	80	Legs	Second panel
1.94	0.91	0.97	1.43	0.68	0.92	180	1	80	Horizontal brace	
260.13	12.5	0.92	379.41	10.13	0.92	180	100	80	Vertical brace	
1024080	795	0.94	593739	455.23	0.97	180	100	80	Legs	Third panel
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Horizontal brace	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vertical brace	

پیش‌بینی عمر مفید اعضای سکوی فراساحل با الگوریتم جنگل تصادفی

تورج تقی‌خانی^{1*}، محمدنبی نظری قلاتی²

¹ دانشیار گروه زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
² دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- گرایش سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت: 1402/1/15، بازنگری: 1402/3/18، پذیرش: 1402/4/5، نشر آنلاین: 1402/4/5

چکیده

پایداری و سلامت سکوهای دریایی به دلایل مسائل زیست‌محیطی، هزینه نصب زیاد و ارزشمندی این نوع سازه‌ها در وضعیت اقتصاد کشور، حائز اهمیت می‌باشد. مهم‌ترین خرابی‌های سازه‌های دریایی از نوع خستگی و خوردگی می‌باشند، پایش و بازرسی این سازه‌ها در درازمدت برای تشخیص و شناسایی چنین خرابی‌هایی به‌همراه پیش‌بینی عمر مفید اعضای سازه برای مدیریت سکوها، امری لازم و ضروری می‌باشد. در این مقاله به بررسی روشی هوشمند برای پیش‌بینی عمر مفید اعضا در سکوهای دریایی به کمک روش یادگیری ماشین پرداخته می‌شود. به این منظور سکویی واقعی در محیط خلیج فارس در نرم‌افزار SACS مدل‌سازی شده و با ایجاد سناریوهای مختلف خرابی در آن با استفاده از نتایج آنالیز خستگی طیفی در نرم‌افزار SACS، به پیش‌بینی عمر مفید اعضای سازه به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداخته می‌شود و رویکردهای مدیریتی با توجه به آنالیزهای صورت گرفته ارائه می‌گردد. نتایج ارزیابی الگوریتم به کارگرفته شده بر روی 20 درصد از نمونه‌هایی که آموزش داده نشده بودند نشان می‌دهد که دقت این الگوریتم در تخمین عمر مفید خستگی اعضای حساس معادل 94 درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: عمر مفید، پایش سلامت، سازه‌های فراساحل، جنگل تصادفی، تحلیل طیفی خستگی.

1- مقدمه

کیلاند الکساندریا¹ که در این حادثه 123 نفر از خدمه سکو، جان خود را از دست دادند. یکی از مهاربندهای اصلی متصل به پایه پانتونی به‌طور کامل گسیخته شده و از سکو جدا شد که موجب واژگونی کامل سکو گشت. سکوی حفاری نیمه‌مستغرق سدکو² 135 که در سال 1965 در خلیج مکزیک شروع به فعالیت کرد، پس از دو سال در سال 1967 دچار گسیختگی ناشی از خستگی در یکی از مهارهای خود شد. از سکوها پرکاربرد در خلیج فارس، سکوی ثابت از نوع شابلونی یا جکت می‌باشد که به‌صورت یک سازه فولادی است که دارای مهاربندها و عرشه می‌باشد و پایه‌هایی که توسط شمع‌های متعدد، در کف دریا ثابت می‌شوند. ترک‌های خستگی، اصلی‌ترین عامل خرابی در سکوها ثابت شابلونی می‌باشد. طبق گزارش مربوط به تعداد حوادث و خسارت‌های رسیده به انواع مختلف سکوها دریایی واقع در فلات قاره نروژ در بازه 40 ساله (از 1972 تا 2013) بیشترین آسیب‌ها مربوط به

با توجه به اهمیت و هزینه بالای ساخت و نگهداری سکوها دریایی با هدف استخراج نفت و گاز و توجه به این نکته که در صورت خرابی می‌توانند فجایع زیست‌محیطی بسیاری را به‌وجود آورند بازرسی فنی از وضعیت سازه‌های آن‌ها اهمیتی جدی می‌یابد. این امر افزون بر هزینه بسیار تمامی جوانب را پوشش نمی‌دهد و امکان تشخیص خرابی در این حالت بسیار دشوار است. به‌دلیل ماهیت تکراری اغلب بارهای محیطی در دریاها، این سازه‌ها پیوسته در معرض بارگذاری‌های متعدد و تکراری قرار دارند. پدیده خستگی یکی از عوامل مؤثر در سلامت این نوع سازه‌ها می‌باشد به‌طوری که طی دهه‌های گذشته، صنعت فراساحل اتفاقات ناگواری را شاهد بوده است که اغلب به‌دلیل پدیده خستگی رخ داده‌اند. به‌عنوان یکی از موارد ناخوشایند می‌توان به فاجعه سکوی نفتی نیمه‌مستغرق نروژی در دریای شمال اشاره کرد که با نام

2. Sedco135

1. Alexander Kielland



فراساحل می‌باشد همانند کارهای Avendaño و همکاران، (2021)؛ Gan و همکاران، (2022)؛ Santos و همکاران، (2022). مدل‌سازی آسیب‌های وارده بر سازه وابسته به نوع آسیب و شدت آسیب می‌باشد. از روش‌های متداول مدل‌سازی آسیب در سازه‌های دریایی، کاهش ضخامت مقطع در مطالعات Li و همکاران، (2016)؛ Bitaraf و Rahgozar، (2022)؛ Mansouri و همکاران، (2021) و کاهش مدول الاستیسته در مطالعات Wang و همکاران، (2014)؛ Zhang و همکاران، (2021)؛ Kim و همکاران، (2021) می‌باشد.

با توجه به مرور ادبیات فنی ملاحظه می‌شود که اکثر روش‌ها برای پیش‌بینی عمر مفید اعضای سازه از روش‌های تحلیل خستگی که کاری زمان‌بر و همراه با عدم قطعیت می‌باشد استفاده نموده‌اند. لذا این پژوهش به دنبال راهکاری هوشمند و یکپارچه برای تخمین عمر مفید اعضای سازه می‌باشد 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 الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برآورد عمر خستگی به خصوص در مورد سازه‌های 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 مسائل رگرسیون که کارایی آن مورد تأیید محققین مختلف قرار گرفته انجام گرفته است. در اکثر مطالعات گذشته، از روش کاهش مدول الاستیسته 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 پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده سناریوهای مختلف خرابی تشکیل شده و در هر سناریو، سازه تحت بارگذاری محیطی بر اساس داده‌های ثبت‌شده در خلیج فارس قرار می‌گیرد. در ادامه با استفاده از آنالیز خستگی به روش طیفی در نرم‌افزار SACS عمر مفید باقی‌مانده هر المان به دست می‌آید. مجموعه داده‌ای 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 دسته‌بندی داده‌ها می‌باشد برای پیش‌بینی 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 تئوری‌های خستگی پرداخته و در ادامه اقدام به مدل‌سازی سکو مدنظر به همراه سناریوهای خرابی

سکوی شابلونی از نوع خستگی در اعضا می‌باشد (Ibrion و همکاران، 2020). پدیده خستگی در مواد از اواخر قرن 19 میلادی مورد توجه محققان مختلف قرار گرفت که به‌طور ویژه تحقیقات Wohler (1858)، منجر به منحنی‌های SN شد. این منحنی‌ها به-صورت گسترده در تعیین عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. Ramachandra Murthy و همکاران (1994)؛ Gandhi و همکاران (2000)، مطالعاتی در زمینه خستگی اتصالات فولادی لوله‌ای شکل سخت‌شده انجام دادند.

Marco و Ruiz (2007) نیز یک روش دینامیکی غیرخطی کارآمد برای محاسبه خرابی خستگی ناشی از امواج برای سازه‌های فراساحلی و کاربردهای صنعتی آن برای افزایش طول عمر، ارائه دادند.

Asgarian و Koozegar (2011) طی مطالعات خود بر روی موضوع خستگی در اتصالات یک نمونه سکوی موجود در خلیج فارس (SPD10) نشان دادند که در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری موضعی اتصالات، باعث کاهش در خرابی پیش‌بینی شده ناشی از خستگی در اتصالات می‌شود که نتایج حاصل از تحقیق در بهینه سازی زمان‌های بازرسی در زیر آب، تأثیرات مفیدی دارد. تحقیق مذکور توسط نرم‌افزار المان محدود OpenSees و به روش تحلیل طیفی صورت گرفته است.

Taheri و Fotrati (1396) نیز مطالعه‌ای را بر روی پدیده خستگی یک سکوی جکت در خلیج فارس و به کارگیری رینگ‌های سخت‌کننده برای افزایش عمر اتصالات انجام دادند. در این مطالعه، برای تحلیل خستگی از روش طیفی در نرم‌افزار SACS انجام گرفت. در این مطالعه از رینگ‌های سخت‌کننده با ضخامت 3 سانتی‌متر استفاده شد. این مطالعه نشان داد استفاده از رینگ‌های سخت‌کننده در اتصالات بحرانی عمر خستگی آن اتصالات را به میزان حداقل دو برابر افزایش می‌دهد.

آنالیز خستگی به دو روش کلاسیک و مکانیک شکست صورت می‌گیرد. آنالیز خستگی به روش کلاسیک و استفاده از منحنی SN و قانون ماینر¹ در سازه‌های فراساحل در مطالعات Rezaei و همکاران، (2018)؛ Ali و همکاران، (2021)؛ Aeran و همکاران، (2017)؛ Correia و همکاران، (2018)؛ Shahbakhty و همکاران، (2021) مشاهده می‌شود. در زمینه آنالیز خستگی به-روش مکانیک شکست نیز Abd Alhusein و Kadim، (2020)؛ Amirafshari و همکاران، (2021)؛ Yeter و همکاران (2016) در تحقیقات خود از آن بهره برده‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های محاسبات نرم در عمر خستگی سازه‌های فراساحل افزایش یافته است. نمونه‌ای از این مطالعات در Bhowmik (2019) دیده می‌شود. اکثر مطالعات در زمینه توربین‌های

1. Miner's rule

منحنی به کمک آزمایشات شکست خستگی تحت سیکل‌های (N) با دامنه تنش ثابت (S) به دست می‌آید. در این پژوهش از منحنی-های S-N آیین‌نامه 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 (Barltrop و همکاران، 2013):

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

در این رابطه $N_F(s)$ تعداد سیکل‌های شکست در یک دامنه تنش S به دست آمده از منحنی S-N می‌باشد. با توجه به آنچه گفته شد، خرابی خستگی کلی یک نقطه در محیط اتصال برای همه بارگذاری‌های موج در طول عمر مفید سازه برابر مجموع خرابی خستگی برای هر یک از حالت دریا می‌باشد. عمر خستگی یک نقطه اتصال با تقسیم عمر مفید طراحی سازه به خرابی تجمعی حاصل خواهد شد (Khoshdel، 2011):

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

در رابطه فوق، SF بیانگر ضریب اطمینان می‌باشد.

3- مدل سازی سکوی مدنظر

سکوی مدنظر یک سکوی ثابت دارای چهارپایه از نوع جکت در منطقه پارس جنوبی و در فاصله 100 کیلومتری جنوب غربی روستا اختر در استان بوشهر می‌باشد که دارای عمق آب‌خور 61 متر می‌باشد. سازه این سکو ابتدا در نرم‌افزار SACS تحت بارهای مرده، زنده، محیطی و عملیاتی مدل‌سازی شده است. سکوی مدنظر به صورت یک سکوی واقعی در نرم‌افزار SACS مدل‌سازی شده است. راینرها، ضربه‌گیر کشتی، مادمت‌ها و بارهای تجهیزات پیش‌بینی شده در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. این سکو از سه پانل ارتفاعی تشکیل شده که در هر پانل سه نوع المان سازه‌ای (پایه‌ها، مهاربند افقی، مهاربند قائم) تشکیل شده است که در شکل (1) دیده می‌شود. جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار SACS به مقایسه حداکثر نیرو وارد بر پایه‌ها که جز خروجی‌های آنالیز دفترچه محاسبات سکوی (2011)⁵ می‌باشد، می‌پردازیم. این مقایسه در جدول (1) آورده شده است. یکی از روش‌های متداول شبیه‌سازی خرابی در سازه، ایجاد آسیب در اعضا به وسیله کاهش سطح مقطع آن می‌باشد. این روش در مطالعات مختلفی توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است که در این پژوهش نیز از این روش بهره گرفته شده است (Mansouri Nejad و همکاران، 2021).

می‌گردد. سپس ضمن بیان تئوری روش جنگل تصادفی، از مجموعه داده تشکیل شده و آموزش آن اقدام به پیاده‌سازی روش و تخمین عمر مفید سناریوهای مختلف می‌نماییم.

2- تحلیل خستگی در سازه سکو

به دلیل ماهیت تناوبی برخی از بارها نظیر اثر موج بر سکوهای 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 مویینی 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 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 منحنی‌های پالمگرن-ماینر¹ که مبتنی بر قانون آسیب تجمعی²، می‌باشند برای بر آورد عمر خستگی استفاده می‌شود.

بر اساس این تئوری خرابی تجمعی خستگی، پدیده‌ای خطی است و عمر کلی یک المان سازه‌ای که تحت تنش‌هایی با اندازه‌های مختلف قرار دارد برابر مجموع وزنی عمر متناظر با هر یک از تنش‌ها با اندازه ثابت S می‌باشد. این قانون به صورت رابطه (1) بیان می‌شود که در آن S_i دامین 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 به دست آمده از جزء سازه تحت بارگذاری نوسانی می‌باشد. در این مطالعه تعداد سیکل‌های مربوط به هر حالت دریا³ مطابق با دیاگرام پراکندگی امواج در طول عمر مفید سازه برابر است با (راهنمای نرم‌افزار SACS 2010)⁴.

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

L عمر مفید سازه (بر حسب سال) و m احتمال رخداد مربوط به هر حالت دریا مطابق با دیاگرام پراکندگی و T_z پریود 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 به دست آمده از منحنی S-N مقایسه می‌شود. این

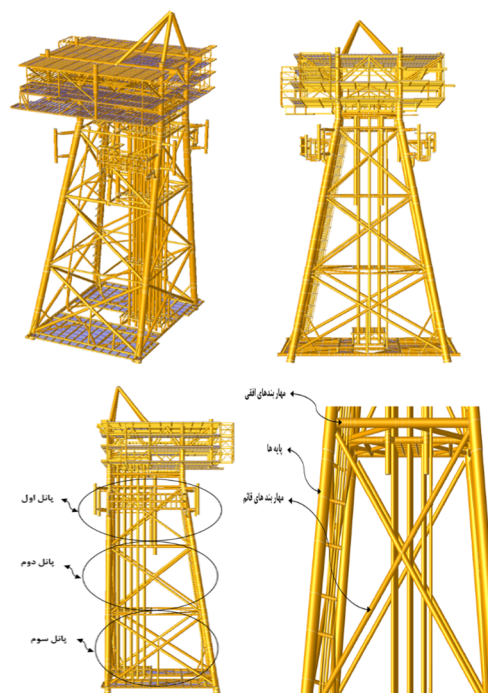
4. SACS user manual 2010
5. SPD design basis (2011)

1. Palmgren-Miner
2. Cumulative Damage Law
3. Sea state

این کاهش مقطع در چهار حالت کلی برای 10 درصد، 20 درصد، 40 درصد و 60 درصد اعمال شده و در سناریوهای آسیب مختلف ساده و ترکیبی تعریف شده است. در این پژوهش 74 سناریو خرابی برای حالات مختلف آسیب در هر پانل و هر نوع المان سازه‌ای در نظر گرفته شده که به همراه حالت سازه سالم در مجموع 75 سناریو می‌باشد. 74 سناریو در نظر گرفته شده در جدول (2) معرفی شده است. در ادامه در جدول (3)، 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 می‌شود.

4- تشکیل مجموعه داده برای تحلیل خستگی

تحلیل خستگی در برنامه SACS توسط زیرمجموعه تحلیل خستگی¹ به روش طیفی انجام گرفته است. لازم به ذکر می‌باشد، این آنالیز نیازمند دیاگرام پراکندگی امواج می‌باشد. در این پژوهش از دیاگرام پراکندگی موج در محیط خلیج فارس استفاده شده که در شکل (2) نشان داده شده است. دیاگرام پراکندگی امواج نوع داده برای بارگذاری آنالیز خستگی بوده که نشانگر احتمال رخداد هر موج در طی یک سال می‌باشد.



شکل 1- نمای سه بعدی دکل به همراه نامگذاری پانل‌های ارتفاعی

جدول 1- صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده

فشار (مگانیوتون)			کشش (مگانیوتون)		
پایه	مقدار دفترچه	مقدار محاسبه شده	درصد اختلاف	مقدار دفترچه	مقدار محاسبه شده
A1	32/87	32/83	0/001	8/71	8/75
A2	38/05	38/09	0/001	2/83	2/86
B1	31/49	31/48	0/0003	5/56	5/5
B2	41/47	41/51	0/001	5/84	5/87

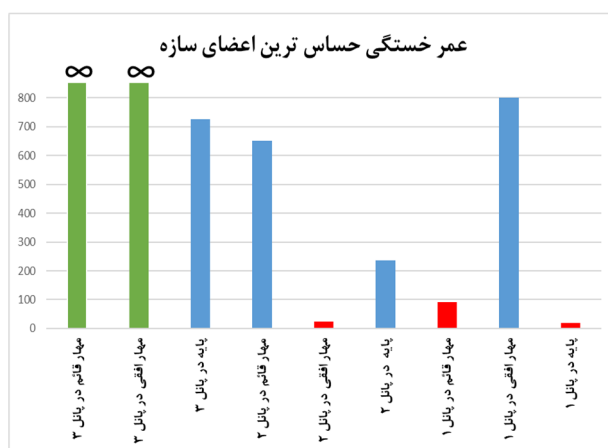
جدول 2- معرفی سناریوهای خرابی

ردیف	درصد	پانل اول			پانل دوم			پانل سوم		
		درصد	مقدار	درصد	درصد	مقدار	درصد	درصد	مقدار	درصد
1	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
2	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
3	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
4	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
72	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
73	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
74	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%

جدول 3- نحوه اعمال سناریوهای خرابی

شماره	پایه	مهاربند قائم	مهاربند افقی
شماره 5	پایه ها	مهاربند قائم	مهاربند افقی
شماره 7	پایه ها	مهاربند قائم	مهاربند افقی
شماره 10	پایه ها	مهاربند قائم	مهاربند افقی

بایستی شامل ویژگی‌های هر سناریو به‌همراه برچسب باشد که در این پژوهش وضعیت سلامت سازه را به‌عنوان ویژگی این مجموعه داده در نظر می‌گیریم. جدول (1) نشان‌دهنده درصد کاهش مقطع می‌باشد چند سناریوی نمونه را نشان می‌دهد که بیانگر درصد آسیب (خرابی) در سازه می‌باشد اما ویژگی‌های این مجموعه داده درصد سلامت سازه می‌باشد (تفاضل صددرصد و درصد آسیب). برچسب‌های این مجموعه داده نیز خروجی‌های شکل (3) می‌باشد که نتایج حاصل از آنالیز خستگی می‌باشد. همان‌طور که گفته شده این برچسب‌ها بیانگر عمر حساس‌ترین المان در هر پانل ارتفاعی و نوع المان سازه‌ای طبق شکل (3) می‌باشد.

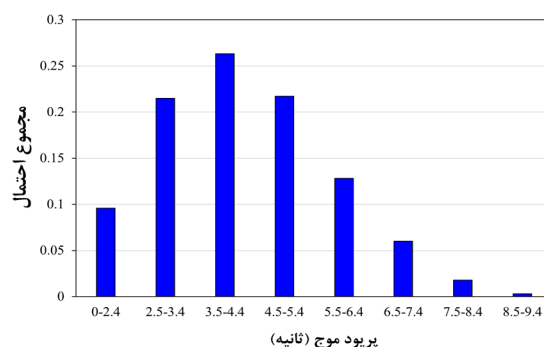
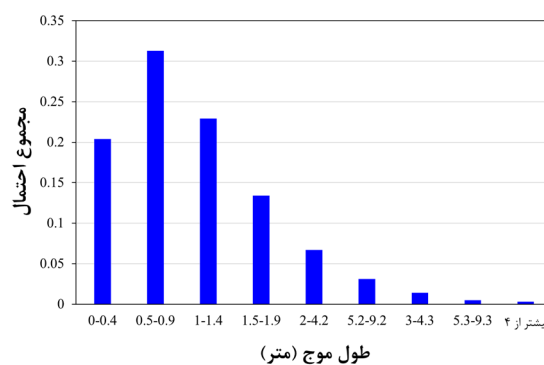


شکل 3- نتایج برداشت شده از تحلیل خستگی

طبق جدول (2) و شکل (1) سازه مدنظر به سه پانل ارتفاعی و سه نوع المان سازه‌ای که در مجموع 9 حالت می‌باشد، تقسیم‌بندی شده است که در شکل (3) نیز نتایج به‌صورت 9 خروجی قابل مشاهده می‌باشد. نمونه‌ای از مجموعه داده تشکیل شده در جدول (4) نیز آورده شده است.

در ادامه به‌دلیل حجم بالای نمایش خروجی‌های آنالیز خستگی برای 75 سناریو، ویژگی‌های آماری این مجموعه داده در جدول (5) به نمایش گذاشته شده است که با استفاده از این ویژگی‌های می‌توان مقادیر کمی آماری هر خروجی را مشاهده کرد. به‌طور مثال طبق جدول (5) می‌توان مشاهده کرد که پایه‌ها در پانل اول دارای میانگین عمر مفید کمتری نسبت به سایر المان‌ها هستند و در خروجی 75 سناریو می‌توان دریافت که پایه‌ها در پانل اول در مقادیر کمینه نیز مقدار کمتری نسبت به سایر المان‌ها را دارا هستند.

در ادامه پس از آنالیزهای خستگی صورت گرفته، نتایج تحلیل برای تمام سناریوها برداشت می‌شود. طبق آیین‌نامه API¹ عمر خستگی اعضا نباید کمتر از دو برابر عمر مفید سازه باشد. با توجه به مشخصات سکو مدنظر، عمر مفید سکو 25 سال و ضریب اطمینان 2 در نظر گرفته شده. فایل خروجی تحلیل خستگی در نرم‌افزار SACS مقادیر خرابی خستگی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان محاسبه شده و عمر مفید گزارش شده باید با عمر مفید مبنا (25 سال) مقایسه شود.



شکل 2- دیاگرام پراکندگی امواج

طبق نتایج استخراج شده از آنالیزهای خستگی انجام شده مشاهده شد، المان‌های پایه‌ها در پانل اول به‌همراه مهاربندهای افقی در پانل دوم دارای عمر خستگی کمتری نسبت به سایر المان‌های سازه می‌باشند. نتایج تحلیل عمر خستگی برای سناریو سالم و بدون آسیب برای کمترین اتصال برابر با 54 سال می‌باشد که برای اتصال‌های المان مهار افقی در پانل دوم می‌باشد. از این نتایج برای برآورد عمر خستگی استفاده می‌گردد که نمونه‌ای از آن در شکل (3) برای سناریو شماره 38 نشان داده شده است. نتایج به‌صورت عمر حساس‌ترین المان در پانل ارتفاعی و نوع المان سازه‌ای ذخیره می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل برای استفاده در الگوریتم جنگل تصادفی نیازمند تشکیل یک مجموعه داده هستیم که به‌صورت هوشمند با دریافت وضعیت سازه بتواند عمر مفید اعضای آن را پیش‌بینی کند. مجموعه داده

1. API-Recommended practice (2000)

الگوریتم‌های درخت‌محور یادگیری ماشین در حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون⁴ به دلیل سهولت در فهم درخت تصمیم، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند. شاخص‌های آماری مختلفی برای ارزیابی دقت مدل‌های جنگل تصادفی وجود دارد. میانگین مربعات خطا (MSE)⁵، ضریب تعیین (R^2)⁶، میانگین خطای مطلق (MAE)⁷ و دقت مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. روابط (7) تا (9)، معادلات مورد نظر برای به دست آوردن این شاخص‌ها را نشان می‌دهد (He و همکاران، 2014).

جدول 5- ویژگی‌های آماری مجموعه داده

ویژگی	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
پایه در پانل اول	327	253	0/1250	1046
مهار افقی در پانل اول	3294	1332	0/6741	5385
مهار قائم در پانل اول	100	16/21	62	162
پایه در پانل دوم	696	699	0/4874	5850
مهار افقی در پانل دوم	23/44	8/58	2	32/44
مهار قائم در پانل دوم	684	66	473	967
پایه در پانل سوم	7125	4159	13/67	بیشتر از 10000
مهار افقی در پانل سوم	بیشتر از 10000			
مهار قائم در پانل سوم	3153	964	2469	بیشتر از 10000

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

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

جدول 4- مجموعه داده الگوریتم جنگل تصادفی

شماره سازه سازه‌های	ویژگی								
	پانل اول			پانل دوم			پانل سوم		
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
4	90	90	90	0	0	0	0	0	0
21	80	80	80	0	0	0	0	0	0
38	60	60	60	0	0	0	0	0	0
برچسب									
4	453	4088	123	772	29/3	691	∞	∞	3108
21	43	4517	114	539	27/7	677	6633	∞	3110
38	3/8	1324	91	237	23/5	652	727	∞	∞

5- الگوریتم جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک الگوریتم محبوب و کارآمد است که با هدف حل مسائل دسته‌بندی و رگرسیون توسط بریمن¹ در سال 2001 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 مسأله طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده کند (Ehsani و همکاران، 2022).

به عبارت بهتر، جنگل تصادفی، مجموعه‌ای از درختان تصادفی رگرسیون شده است. درخت، یک گراف ساده بدون جهت است، که این درختان برای تخمین مقدار رگرسیون باهم جمع شده‌اند. ساده‌ترین الگوریتم، درخت تصمیم، ID3² نام دارد که اولین بار در سال 1896 توسط Quinlan مطرح شد. این الگوریتم به جستجوی داده‌های حد بالا و پایین پرداخته و در داده‌های ورودی، بهترین و نزدیک‌ترین را به هدف برمی‌گزیند:

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

در رابطه (5)، پارامترهای $\theta_1 \theta_2 \dots \theta_m$ خروجی‌های مستقل با توزیع یکسان (IDD)³ در متغیر تصادفی هستند. ورودی D_n (داده-های ورودی جنگل تصادفی) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

متغیر θ به X و D_n وابسته نمی‌باشند. هدف کلی جنگل تصادفی، تخمین مقدار r_n است؛ هر درخت به تعداد $2^{\log_2^{km}}$ نقطه انتهایی دارد که آن را به صورت تقریبی K_m در نظر می‌گیرند (Habibzadeh و Ghafarzadeh، 2017).

5. Mean Squared Error
6. R-squared correlation
7. Mean Absolute Error

1. Breiman
2. Iterative Dichotomizer
3. Independent and Identically Distributed
4. Regression

نتایج برای این دو خروجی محاسبه نمی‌شود. در بررسی بین گزارش خروجی نرم‌افزار ایسن دو خروجی جز بزرگ‌ترین عمر مفیدهای سازه می‌باشند، لذا بررسی این دو خروجی مفاهیم اضافی به روند این پژوهش اضافه نمی‌کند. دقت و خروجی‌های الگوریتم جنگل تصادفی در ادامه تشریح می‌شود. همچنین در شکل (4) روند طی شده در این پژوهش برای الگوریتم جنگل تصادفی در تشخیص عمر مفید اعضای سازه تشریح شده است.

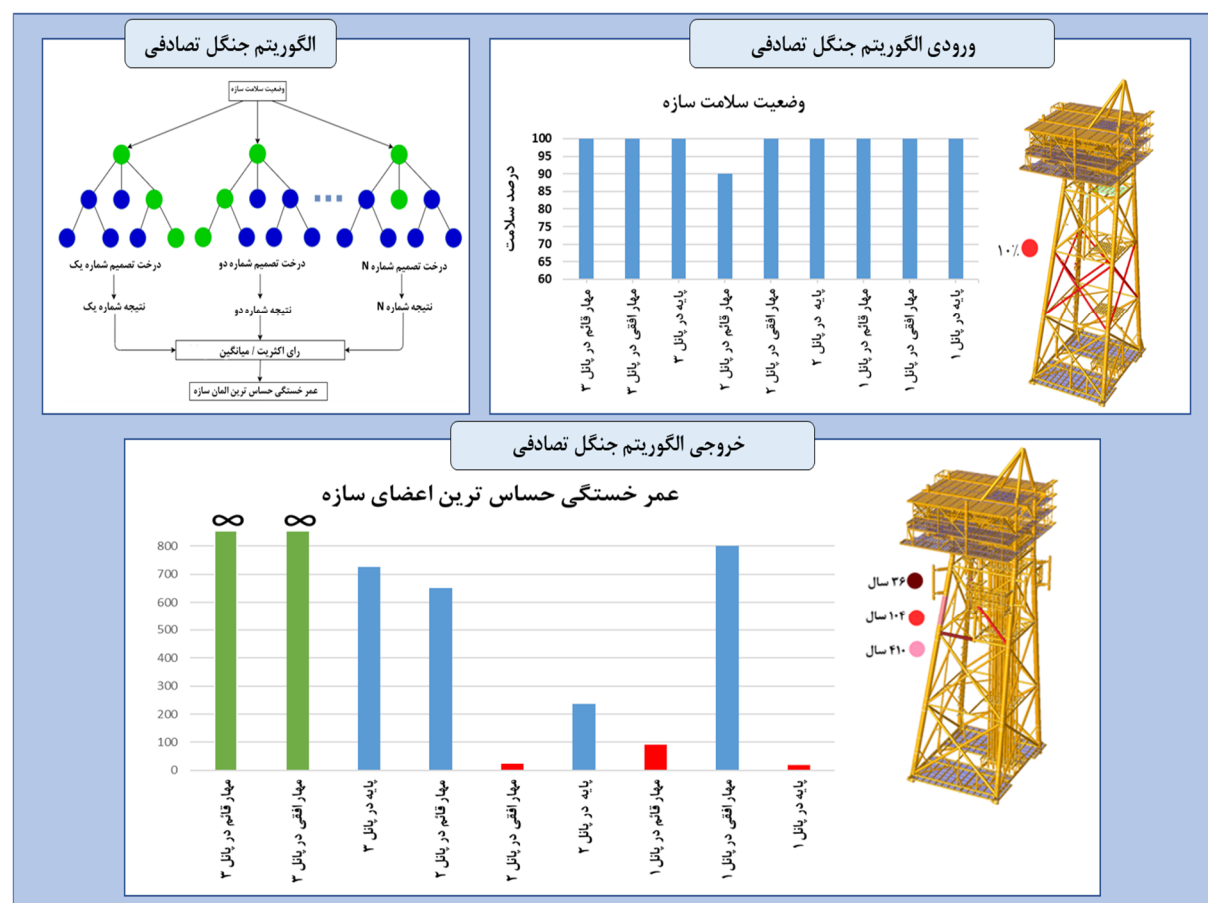
طبق جدول (6) در ستون تنظیم پارامترهای الگوریتم، درصد داده‌های تفکیک شده برای آموزش (train) نمایش داده شده است. برای کنترل دقت مدل استخراج شده، می‌توان مجموعه داده را به دو قسمت تقسیم کرد: مجموعه آموزشی (training set) و مجموعه آزمایشی یا تست (testing set). از داده‌ی آموزشی برای آموزش روش یادگیری ماشین و استخراج مدل آموزشی استفاده می‌شود. مدل استخراجی حاصل روی مجموعه‌ی تست اعمال می‌شود تا دقت مدل بررسی شود.

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

که در آن‌ها T مقدار هدف (اندازه‌گیری شده)، P مقدار پیش‌بینی شده، $\bar{T}$ مقدار میانگین داده‌های هدف، $\bar{P}$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و n تعداد داده‌های مورد بررسی می‌باشد.

6- 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 می‌شود. طبق جدول (5) با توجه به عمر مفید بالای 10000 سال برای تمام سناریوها در مهارافقی در پانل سوم و میانگین عمر مفید 3153 سال درمهاربند قائم در پانل سوم (پایین‌ترین تراز پانل) از روند خروجی‌های الگوریتم حذف شده و



شکل 4- روند طی شده در این پژوهش

جدول 6- عملکرد جنگل تصادفی

خروجی	تنظیم پارامترهای الگوریتم			شاخص‌های عملکرد الگوریتم					
	درصد داده یادگیری	حالت تصادفی	تعداد درخت تصمیم	آموزش			آزمایش		
				R2	MAE	MSE	R2	MAE	MSE
پایه‌ها	80	1	180	0/98	15/38	799/82	0/96	36/63	3292/55
مهاربند افقی	80	1	180	0/97	117/68	45818/74	0/92	283/59	164757/19
مهاربند قائم	80	1	180	0/93	1/68	19/93	0/94	4/48	10/33
پایه‌ها	80	100	100	0/91	39/87	4122/93	0/91	93/98	12263/38
مهاربند افقی	80	1	100	0/98	0/68	1/43	0/97	0/91	1/94
مهاربند قائم	80	100	100	0/92	10/13	379/41	0/92	12/5	260/13
پایه‌ها	80	100	100	0/97	455/23	593739/02	0/94	795	1024080
مهاربند افقی	-	-	-	-	-	-	-	-	-
مهاربند قائم	-	-	-	-	-	-	-	-	-

پانل اول

پانل دوم

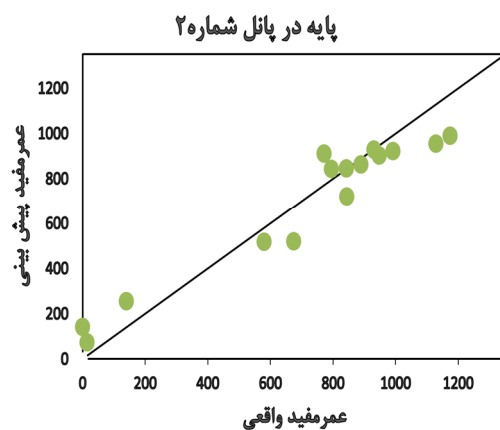
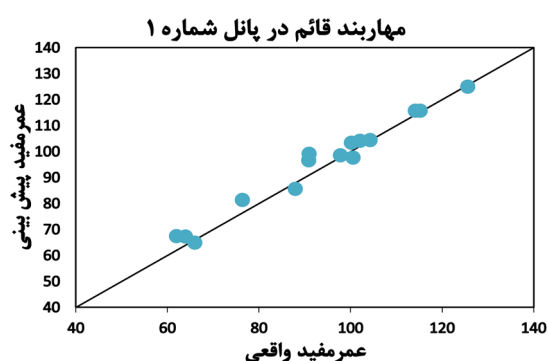
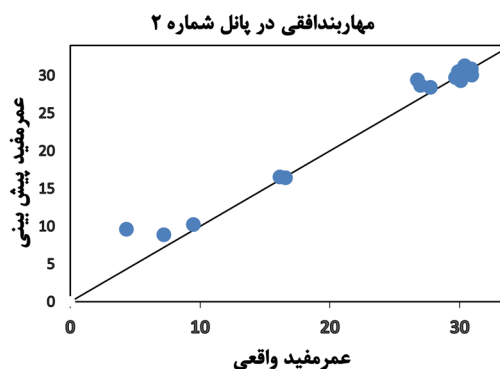
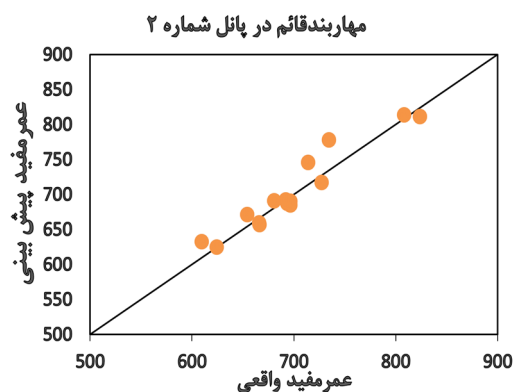
پانل سوم

6-1- ارزیابی مدل‌ها

گراف‌های شکل (5) 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 مقدار عمر مفید پیش‌بینی 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 (5) تخمین عمر حساس‌ترین مهاربند قائم در پانل شماره یک بهترین عملکرد نسبت به سایر خروجی‌ها را دارد.

در ستون بعدی حالت تصادفی¹ 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 مرحله قبل به داده‌های آموزشی و تست تقسیم می‌شوند.

تعداد درخت تصمیم یعنی تعداد درختانی است که الگوریتم پیش از دریافت آرای بیشینه یا دریافت میانگین پیش‌بینی‌ها می‌سازد. به‌طور کلی، تعداد بیشتر درخت‌ها، کارایی را افزایش می‌دهند و پیش‌بینی‌ها را پایدارتر می‌سازند، اما محاسبات را کندتر می‌کنند. در مورد شاخص‌های عملکرد نیز به‌طور 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 (6) مشاهده می‌شود که بین خروجی‌های مختلف کمترین عدد شاخص R^2 عدد 0/91 می‌باشد که نشان‌دهنده دقت 91 درصدی در تشخیص عمر مفید این الگوریتم می‌باشد.



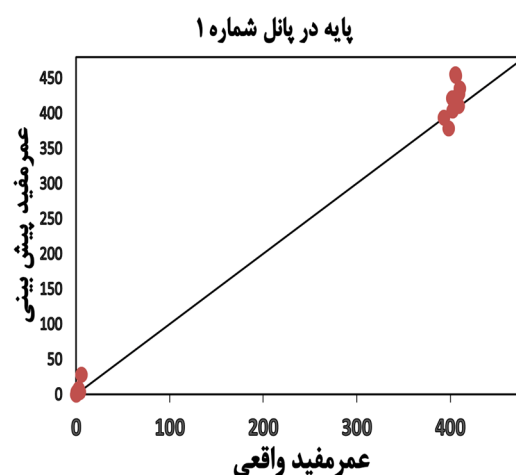
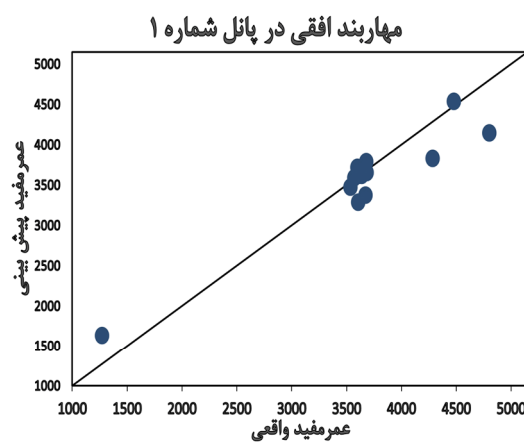
شکل 5- ارزیابی خروجی های جنگل تصادفی

2-6- آنالیز حساسیت

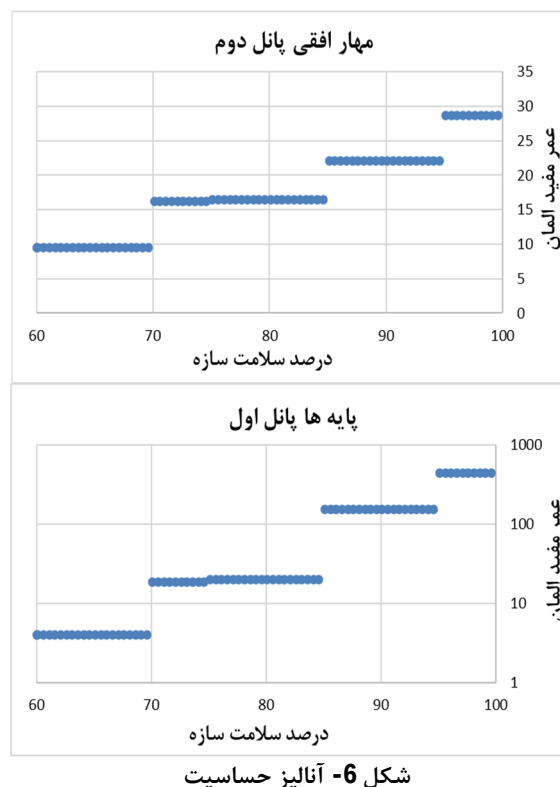
با استفاده از برنامه‌ای که در نرم‌افزار پایتون بر روی مجموعه داده تشکیل شده برای تخمین عمر مفید اعضا نوشته شده، آنالیز حساسیت برای دو المان حساس سکو مدنظر صورت گرفت که مطابق شکل (6) نتایج به‌صورت زیر می‌باشد:

برای مهار افقی پانل دوم که حساس‌ترین عضو به پدیده خستگی است و دارای کمترین عمر مفید می‌باشد اگر درصد سلامت آن به کمتر از 70 درصد برسد (معادل خرابی 30 درصد) به‌معنای این است که عمر این اعضا به کمتر از ده سال می‌رسد و کارهای تعمیراتی برای افزایش طول عمر این اعضا باید اعمال شود.

در ادامه برای پایه‌ها در پانل اول که دومین عضو حساس سازه می‌باشد نیز اگر درصد سلامت سازه به کمتر از 85 درصد برسد (معادل 15 درصد خرابی) عمر مفید این اعضا به کمتر از 15 سال کاهش یافته و تعمیر آن اجتناب‌ناپذیر است.



- Ali L, Khan S, Bashmal S, Iqbal N, Dai W, Bai Y, "Fatigue crack monitoring of T-type joints in steel offshore oil and gas jacket platform", *Sensors*, 2021, 21 (9), 3294. <https://doi.org/10.3390/s21093294>
- Amirafshari P, Brennan F, Kolios A, "A fracture mechanics framework for optimising design and inspection of offshore Wind Turbine support structures against fatigue failure", *Wind Energy Science*, 2020, 10.5194/wes-2020-65. <https://doi.org/10.5194/wes-6-677-2021>
- API-recommended Practice 2A-WSD, twenty-first ed., 2000. RP 2A-WSD.
- Asgarian B, Koozegar P, "Investigating the effect of joint flexibility on fatigue assessment in fixed offshore steel platforms", *Journal of Struct. Steel*, 2011, 5 (10).
- Avendano-Valencia LD, Abdallah I, Chatzi E, "Virtual fatigue diagnostics of wake-affected wind turbine via Gaussian Process Regression", *Renewable Energy*, 2021, 170. 10.1016/j.renene.2021.02.003. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.003>
- Barltrop ND, Adams AJ, "Dynamics of fixed marine structures", *Butterworth-Heinemann*, 2013, 91.
- Bhowmik S, "Life extension of offshore structure using machine learning", In *Offshore Technology Conference Brasil*. OnePetro, 2019. <https://doi.org/10.4043/29759-MS>
- Correia JA, Correia M, Holm M, Ekeborg J, Lesiuk G, Castro JM, Calçada R, "Evaluation of fatigue design curves for a double-side welded connection used in offshore applications", In *Pressure Vessels and Piping Conference*, 2018, 51678, p. V06AT06A028. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-85156>
- Ehsani M, Moghadas Nejad F, Hajikarimi P, "Developing an optimized faulting prediction model in Jointed Plain Concrete Pavement using artificial neural networks and random forest methods", *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2057975>
- Gan L, Wu H, Zhong Z, "Fatigue life prediction considering mean stress effect based on random forests and kernel extreme learning machine", *International Journal of Fatigue*, 2022, 158, 106761. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106761>
- Gandhi P, Murthy DR, Raghava G, Rao AM, "Fatigue crack growth in stiffened steel tubular joints in seawater environment", *Engineering Structures*, 2000, 22 (10), 1390-1401. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00080-2)
- Habibzadeh A, Ghafarzadeh H, "Structural damage detection using wavelet packet and random forest algorithm in a structure tested at the University of British Columbia Seismic Research Center", *Q. J. Civil Infrastruct. Research*, 2017, 3 (2).
- He Z, Wen X, Liu H, Du J, "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*, 2014, 509, 79-386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.054>
- Ibrion M, Paltrinieri N, Nejad A, "Learning from Failures: Accidents of Marine Structures on



شکل 6- آنالیز حساسیت

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عمر مفید اعضای سکوها‌ی فراساحل استفاده شده است. عمر مفید حساس‌ترین المان در هر پانل به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. پس از انجام تحلیل خستگی بر روی 75 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 می‌دهد این الگوریتم توانایی بالایی در تشخیص عمر مفید اعضای سازه بر اساس وضعیت سلامت سازه را دارد و با دقت بالا قادر به پیش‌بینی عمر مفید اعضای سازه می‌باشد. همچنین با آنالیز حساسیت انجام شده مشخص شد که اگر درصد خرابی پایه‌ها در پانل اول به بیشتر از 15 درصد برسد به این معناست که عمر مفید این اعضا به کمتر از 15 سال رسیده و سلامت سکو به‌خطر می‌افتد.

8- مراجع

- Abd Alhusein TA, Kadim JA, "Fatigue Analysis of fixed jacket platform using FEM", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2020, 11, 2229-5518.
- Aeran A, Siriwardane SC, Mikkelsen O, Langen I, "A new nonlinear fatigue damage model based only on SN curve parameters", *International Journal of Fatigue*, 2017, 103, 327-341. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.017>

- Wang S, Liu F, Zhang M, "Modal strain energy based structural damage localization for offshore platform using simulated and measured data", *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s11802-014-2028-4>
- Wöhler A, "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*, 1858, 8, 642-652.
- Yeter B, Garbatov Y, Soares CG, "Evaluation of fatigue damage model predictions for fixed offshore wind turbine support structures", *International Journal of Fatigue*, 2016, 87, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.01.007>
- Zhang Z, Sun C, Jahangiri V, "Structural damage identification of offshore wind turbines: A two-step strategy via FE model updating", *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29 (2), e2872. <https://doi.org/10.1002/stc.2872>
- Norwegian Continental Shelf over 40 Years Time Period", *Engineering Failure Analysis*, 2020. 111-104487. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104487>
- Khoshdel S, "Practical training of sacs software and analysis & design of offshore platforms", 1st ed. Elias Publications, 2011.
- Kim B, Kim C, Ha SH, "Multiple Damage Detection of an Offshore Helideck through the Two-Step Artificial Neural Network Based on the Limited Mode Shape Data", 2021, *Sensors*, 21 (21), 7357. <https://doi.org/10.3390/s21217357>
- Li Y, Wang S, Zhang M, Zheng C, "An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures", *Journal of Marine Science and Application*, 2016, 15 (2), 182-192. <https://doi.org/10.1007/s11804-016-1350-1>
- Mansouri Nejad N, Beheshti Aval SB, Maldar M, Asgarian B, "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*, 2021, 24 (8), 1655-1667. <https://doi.org/10.1177/13694332209816>
- Rahgozar R, Bitaraf M, "A summary evaluation of output-only damage-sensitive features for structural health monitoring of offshore platforms subjected to ambient loads", *Ocean Engineering*, 2022, 266, 112892. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112892>
- Ramachandra M, D.S., Madhava Rao AG, Santhakumar AR, "Corrosion fatigue of stiffened offshore steel tubular joints", *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120 (7), 1991-2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:7\(1991\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:7(1991))
- Rezaei R, Fromme P, Duffour P, "Fatigue life sensitivity of monopile-supported offshore wind turbines to damping", *Renewable Energy*, 2018, 123, 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.086>
- Santos F, Noppe N, Weijtjens W, Devriendt C, "Data-driven farm-wide fatigue estimation on jacket-foundation OWTs for multiple SHM setups", *Wind Energy Science*, 2022, 7 (1), 299-321. <https://doi.org/10.5194/wes-7-299-2022>
- Shabakhty N, Haselibozechaloe D, Correia JA, "Investigation on fatigue damage calibration factors in offshore structures", In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, September 2021, 174 (3), 65-80. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.17>
- SPD13 Structural Design Basis, Pars Oil and Gas Company, South Pars Gas Field Development (Phase 13), 2011.
- Taheri A, Fotrati A, "Deterministic fatigue analysis of an existing jacket platform in the Persian Gulf and the use of stiffener rings to increase joint lifespan", 7th Int. Conf. Offshore Industries, 2017.
- Torres MA, Ruiz SE, "Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time", *Engineering Structures*, 2007, 29 (9), 2183-2192. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.014>