



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتیرانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



## محاسبه پارامتر عدم قطعیت ظرفیت نهایی شکست سکوه‌های دریایی با استفاده از تحلیل حساسیت بهروز عسگریان<sup>1</sup>، سید مهدی افزلی<sup>2</sup>

1- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران. پست الکترونیکی: [asgarian@kntu.ac.ir](mailto:asgarian@kntu.ac.ir)

2- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران. پست الکترونیکی:

[mehdiafzaly@yahoo.com](mailto:mehdiafzaly@yahoo.com)

### چکیده

سازه‌های دریایی معمولاً به روش متعین آنالیز می‌شوند ولی از آنجا که پدیده‌های تصادفی مختلفی در مقاومت و بارگذاری وجود دارند و بارهای محیطی وارده به سکوها دارای ماهیت تصادفی هستند تحلیل احتمالاتی برای سکوها کاملاً ضروری و منطقی به نظر می‌رسد. توسعه این روش در کنار روشهای مرسوم، طراحان را قادر می‌سازد تا به صورت دقیق تری رفتار سازه را در برابر تغییر پارامترهای تصادفی مقاومت و بارگذاری مورد بررسی قرار دهند. با توجه به اینکه در روشهای رفتار نهایی سکو مورد توجه می‌باشد، لذا آنالیز بارافزون (Pushover) که یک آنالیز استاتیکی غیر خطی می‌باشد، برای بررسی رفتار سازه چند درجه آزادی مفروض به کار بسته می‌شود. در این مقاله حساسیت ظرفیت نهایی محاسبه شده با استفاده از آنالیز بار افزون نسبت به تغییرات پروفیل بار اعمالی به سکو مورد بررسی قرار گرفته است. این مسأله از این جهت حائز اهمیت می‌باشد که می‌توان با استفاده از نتایج آن پارامتر عدم قطعیت ظرفیت شکست سکو را که نقش مهمی در بدست آوردن احتمال شکست دارد، محاسبه کرد. در آنالیزهای حساسیت چگونگی ارتباط ظرفیت نهایی شکست سکو با ارتفاع و پریود امواج وارده به سکو و همچنین ضریب تغییرات ظرفیت نهایی سکو برای سه سکوی نمونه استخراج شده است.

**کلمات کلیدی:** سکوی ثابت فلزی دریایی، ظرفیت شکست، احتمال شکست، تحلیل حساسیت

### Uncertainty Calculation of Ultimate Limit State of Jacket Type Offshore Platforms Capacity Using Sensitivity Analysis

In this paper, a review on probabilistic method for jacket type offshore platforms analysis subjected to wave loading was performed. Ultimate limit state capacity of jacket type offshore platforms using static pushover analysis was performed and a review on parameter affected ULS was done. The results of the Pushover analysis of sample jacket type offshore platforms subjected to different environmental load were compared. The differences between the results of the pushover analysis are linked to the uncertainty parameters.

**Keywords:** Jacket, Sensitivity analysis, Collapse capacity, Probability of failure

### مقدمه

امروزه استفاده از روشهای احتمال اندیشانه در تحلیل سازه و بخصوص تحلیل سازه های دریایی رشد چشمگیری یافته است. با استفاده از روشهای احتمال اندیشانه میتوان کیفیت و کمیت تأثیر عدم قطعیت پارامترهای مختلف دخیل در پاسخ سازه را مورد بررسی قرار داد. در صورت انجام دادن تحلیل احتمالاتی، هریک از متغیرهای مسأله را میتوان به صورت یک پارامتر احتمالاتی در نظر گرفت و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوطه، تأثیر آنها را در پاسخ، مورد کنکاش قرار داد. هر چقدر عدم قطعیت‌های مربوط به یک متغیر بیشتر باشند، تأثیر آن در پاسخ سازه بیشتر خواهد بود. از آنجا که ظرفیت سازه می‌تواند نسبت به الگوهای مختلف بارگذاری دارای مقادیر متفاوتی باشد، می‌توان آن را یک پارامتر تصادفی در نظر گرفت. این نکته از این منظر دارای اهمیت می‌باشد که ظرفیت سازه را می‌توان به عنوان یک پارامتر تصادفی در تحلیل پاسخ سازه و آنالیزهای قابلیت اعتماد به کار برد هر چند در اغلب موارد به دلیل کم بودن تأثیر تصادفی بودن پارامتر ظرفیت، آن را به صورت متعین در نظر می‌گیرند، حتی در آنالیزهای احتمال اندیشانه.

## مفاهیم متغیرهای تصادفی، فضای نمونه و پیشامد

مفهوم یک متغیر تصادفی در ارتباط مستقیم با رفتار یک آزمایش می‌باشد. در صورتیکه یک آزمایش چندین بار انجام شود و سعی شود تا کلیه شرایط در هر آزمایش ثابت بماند، در صورت یکسان بودن نتایج حاصل، مقادیر اندازه گیری شده قطعی و یقین‌اندیشانه در نظر گرفته می‌شوند و چنانچه نتایج عددی دارای تغییرات باشند مقادیر اندازه گیری شده، تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. در بحث مهندسی سازه هرگاه اندازه گیری با دقت چهار یا پنج رقم معنی دار تکرار شود و شرایط اندازه گیری مشابه باشد، نتایج عددی یکسانی بدست نخواهد آمد، بنابراین این فرض صحیحی خواهد بود که هر آیتم اندازه گیری در یک آزمایش بصورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شود و میزان پراکندگی در مشاهدات مسأله مهندسی مورد بررسی قرار گیرد. در یک آزمایش، مقدار عددی یک آیتم می‌تواند یک متغیر تصادفی<sup>۱</sup> محسوب شود. کلیه مشاهدات ممکن متغیرهای تصادفی، فضایی موسوم به فضای نمونه<sup>۲</sup> را تشکیل می‌دهند. یک پیشامد<sup>۳</sup> مجموعه‌ای منتخب یا زیر مجموعه‌ای از این فضای نمونه است.

### کلیات آنالیز احتمالاتی

رفتار سازه در نزدیکی نقطه شکست ممکن است بسیار پیچیده باشد و همچنین شناخت این رفتار هم کار مشکلی است. این پیچیدگی ممکن است ناشی از خواص مکانیکی غیر خطی سازه، بارهای وارده و یا الگوی بار اعمالی به سازه باشد. رفتار سازه پس از گسیخته شدن اولین عضو نه تنها بستگی به درجه نامعینی استاتیکی آن دارد بلکه به این حقیقت نیز وابسته است که آیا سازه قادر به باز توزیع بار بعد از گسیختگی است یا خیر، به عنوان مثال پارامترهایی همچون شکل پذیری در اعضای منفرد و گره‌ها می‌توانند به عنوان یکی از این پارامترها تلقی شوند. به علاوه، احتمال خرابی سیستم بستگی به عدم قطعیت بارها، عدم قطعیت در محاسبه ظرفیت اعضا و ارتباط بین پارامترهای عدم قطعیت دارد. دو طبقه‌بندی مفید برای عدم قطعیت‌های خواص مکانیکی و اثرات بار به صورت زیر ارائه شده است:

1- عدم قطعیت‌های تصادفی<sup>۴</sup> که نشان دهنده تغییرات تصادفی هستند برای مثال تغییرات در ارتفاع موج یا شتاب حداکثر زلزله تصادفی هستند. عدم قطعیت‌های تصادفی به عنوان عدم قطعیت ذاتی شناخته می‌شوند. این عدم قطعیت‌ها قابل کاهش نیستند.

2- عدم قطعیت‌های معرفتی<sup>۵</sup> که در اثر فقدان آگاهی روی تغییرات می‌باشد. عدم قطعیت‌های معرفتی در برگزیده عدم قطعیت در اندازه گیری، عدم قطعیت آماری (در اثر محدودیت اطلاعات)، و عدم قطعیت مدل می‌باشد. عدم قطعیت معرفتی قابل کاهش است، برای مثال به وسیله افزایش تعداد آزمایشها یا بهبود دادن روشهای اندازه گیری [1].

### احتمال شکست به بیان برش پایه

سازه‌های دریایی مورد بحث در مقاله ذیل بر اساس نیروهای استاتیکی ناشی از امواج طراحی شده‌اند. در مطالعاتی که به وسیله کرنل و همکاران [2] انجام شد، روش ساده‌ای برای محاسبه احتمال شکست توأم با طراحی به روش مرسوم ارائه گردید که ذیلاً خلاصه‌ای از پارامترهای تعریف شده در آن معرفی می‌گردد. احتمال شکست به بیان نیرو به صورت عبارتی از برش پایه نیاز در برابر برش پایه ظرفیت در هنگام شکست بیان می‌شود. بنابراین داریم:

$$P_f = P(BS_{demand} > BS_{capacity}) \quad (1)$$

در معادله 1،  $BS_{demand}$  و  $BS_{cap}$  مقادیر متغیر تصادفی هستند که به ترتیب برش پایه نیاز و برش پایه ظرفیت نامیده می‌شوند. برش پایه نیاز بیشینه سالیانه در ارتباط با ارتفاع بیشینه موج سالیانه به شکل زیر بیان می‌شود:

$$B.S. = c \cdot H^\alpha \cdot \Gamma \quad (2)$$

1 - Random Variable

2 - Sample Space

3 - Event

4 - Aleatory

5 - Epistemic Uncertainty

که،  $c$  و  $\alpha$  مقادیر ثابت متعینی هستند که بیان کننده چگونگی تغییرات برش پایه و ارتفاع موج می‌باشند. پارامتر  $\Gamma$  فاکتوریست که بیان کننده عدم قطعیت در برگیرنده محاسبه برش پایه در برابر ارتفاع موج است. با توجه به معادلات 1 و 2 می‌توانیم رابطه‌ای برای بیان احتمال شکست در برابر بیشینه ارتفاع موج سالیانه بنویسیم:

$$P_f = P\left(H > \left(\frac{BS_{cap}}{c\Gamma}\right)^{1/\alpha}\right) \quad (3)$$

که  $H$ ،  $BS_{cap}$  و  $\Gamma$  همگی مقادیر تصادفی هستند. به این ترتیب می‌توان تعریفی از ارتفاع موج ظرفیت  $H_{cap}$ ، به صورت زیر ارائه کرد:

$$H_{cap} = \left(\frac{BS_{cao}}{c\Gamma}\right)^{1/\alpha} \quad (4)$$

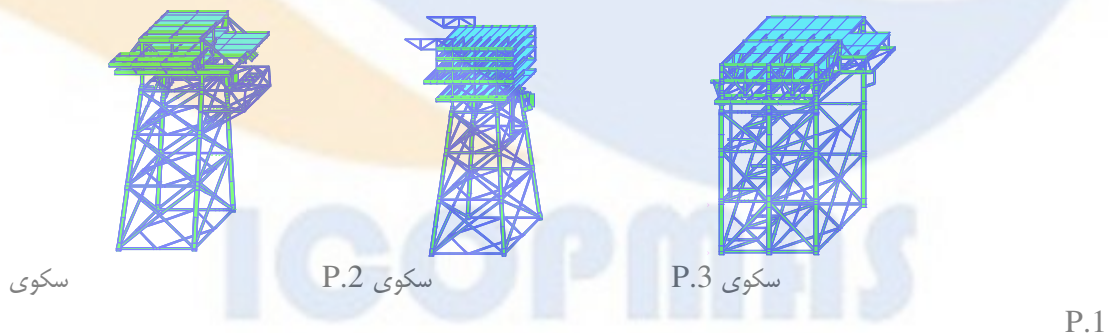
باید به این نکته توجه داشت که ظرفیت تابعی از دو پارامتر تصادفی لگاریتمی-نرمال شامل  $BS_{cap}$  و  $\Gamma$  می‌باشد. به این ترتیب  $H_{cap}$  نیز با پارامترهای زیر لگاریتمی-نرمال خواهد بود:

$$\text{Median of } H_{cap} = H_{cap,med} = \left(\frac{BS_{cap,med}}{c}\right)^{1/\alpha} \quad (5)$$

$$\text{COV of } H_{cap} = V_{H_{cap}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{V_{BS_{cap}}^2 + V_{\Gamma}^2} \quad (6)$$

### مشخصات اختصاصی مدلها

مطالعات بر روی سه سکو که در خلیج فارس واقع می‌باشند انجام گردید. عمق آب در محل سکوی P.1 که یک سکوی حفاری چهار پایه است برابر 49/5 متر می‌باشد. این سکو در پلان دارای ابعاد متغیر 27/7\*28/5 تا 17/44\*22/22 می‌باشد. برای سکوی P.2 عمق آب در محل احداث سکو برابر 47/8 متر می‌باشد. سکوی P.2 یک سکوی نشیمن چهارپایه است و دارای ابعاد متغیر 28/6\*28/6 تا 17/94\*17/94 در پلان است. سکوی P.3 یک سکوی بهره برداری شش پایه است و عمق آب در محل احداث سکو برابر 47/6 متر می‌باشد. ابعاد سکوی P.3 در پلان برابر 36/00\*36/00 است. سکوهایی فوق بر اساس آیین نامه API-RP2A [6] جهت نصب در منطقه خلیج فارس طراحی شده‌اند.



شکل 1 شکل سه بعدی سکوهایی مورد استفاده در تحلیل‌ها

اساس مطالعات انجام شده برای محاسبات احتمال شکست، محاسبه ظرفیت با استفاده از تحلیل بارافزون می‌باشد. به این ترتیب که در محاسبات ابتدا بارهای ثقلی را در یک گام به سکو اعمال کرده سپس بارهای جانبی به صورت گام به گام افزایش داده شده.

$$R_{ult} = \lambda_{ult} E \quad (7)$$

از موج، باد و جریان‌ات دریایی.  $R_{ult}$  = برش پایه.  $\lambda_{ult}$  = ضریب بار  $E$  = بارهای محیطی که در سازه‌های دریایی عبارتند از بارهای ناشی از موج، باد و جریان‌ات دریایی.

تحلیل بارافزون از نوع کنترل بار است، به این معنی که ضریب بار همواره نرخ افزایشی دارد و منحنی بار-تغییر مکان تا نقطه انهدام همواره صعودی خواهد بود. از آنجا که در این مطالعه ظرفیت نهایی شکست سازه مورد نظر می‌باشد، لذا تحلیل



بارافزون نوع کنترل بار منجر به جوابهای مورد نظر برای این تحقیق می‌شود. تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار کامپیوتری SACS [3] بر روی سکوها انجام شده است.

### آنالیز حساسیت

یک سری از عدم قطعیت‌ها مربوط به محاسبه ظرفیت سازه هستند و می‌توان آنها را در محاسبات احتمال شکست، دخالت داد. یکی از راههای بدست آوردن پارامترهای مربوط به این عدم قطعیت‌ها انجام آنالیز حساسیت روی سازه مورد نظر است. در این مقاله حساسیت ظرفیت سکو نسبت به تغییرات پروفیل‌های مختلف بارگذاری موج مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور تعداد 25 پروفیل مختلف بار که شامل تغییرات پریود و ارتفاع موج می‌باشند به سکوها اعمال گردید. البته سعی شده که محدوده پریودهای اعمال شده برای ارتفاع موجهای وارده به سکو در محدوده منطقی باشند. محدوده پریود مناسب برای ارتفاع موج مربوطه با استفاده از رابطه زیر برای منطقه دریای شمال قابل محاسبه می‌باشد [4]. با توجه به اینکه برای محدوده مورد مطالعه در این مقاله رابطه‌ای مشابه رابطه ذیل موجود نمی‌باشد، لذا محاسبات مربوط به محدوده مناسب پریود امواج بر اساس رابطه 8 انجام شده است.

$$2.46(H_{max})^{1/2} < T < 3.70(H_{max})^{1/2} \quad (8)$$

جدول زیر بیان کننده پریودهای محاسبه شده برای امواج مختلف طبق رابطه 8 است.

جدول 1- محدوده پریود مناسب، محاسبه شده با استفاده از رابطه 8

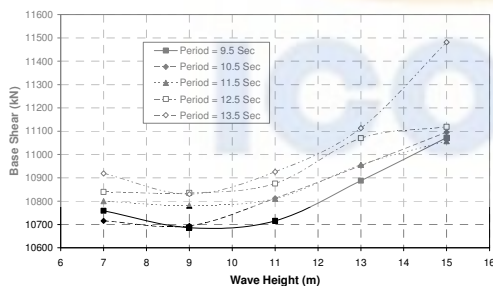
Wave Height,	7.00	9.00	11.00	13.00	15.00
$T_{min}$ , sec	6.51	7.38	8.16	8.87	9.53
$T_{max}$ , sec	9.79	11.10	12.27	13.34	14.33

رابطه فوق محتمل ترین پریودها را برای ارتفاع موج مربوطه ارائه می‌کند و لزوماً به این معنی نمی‌باشد که امواج صرفاً با پریودهای فوق بوقوع می‌پیوندند. در نهایت و با توجه به محاسبات فوق، پروفیل‌های بار طبق جدول زیر برای انجام آنالیز حساسیت به سکوها اعمال گردید.

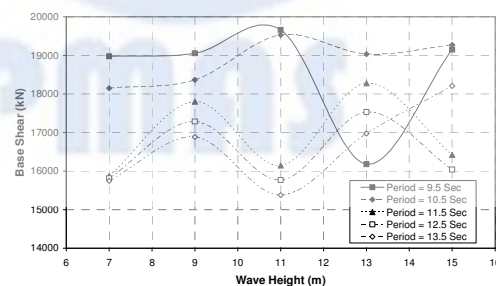
جدول 2- پروفیل‌های بار وارده به سکوها (بر اساس ارتفاع و پریود امواج)

Wave Height.	Wave Period. sec				
7.00	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
9.00	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
11.00	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
13.00	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
15.00	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5

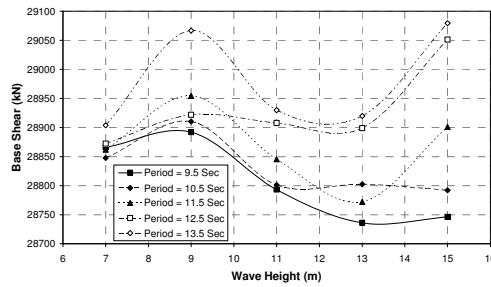
نتایج آنالیزهای حساسیت برای سه سکوی نمونه به صورت نمودار در شکل‌های 2 تا 4 قابل مشاهده می‌باشند.



شکل 3- ظرفیت شکست در برابر ارتفاع و پریود موج، برای سکوی P.2 جهت شرقی



شکل 2- ظرفیت شکست در برابر ارتفاع و پریود موج، برای سکوی P.1 جهت شرقی



شکل-4 ظرفیت شکست در برابر ارتفاع و پریود موج، برای سکوی P.3 جهت شرقی

### پارامترهای ظرفیت در آنالیز قابلیت اطمینان

با توجه به نتایج حاصل از آنالیزهای قابلیت اطمینان برای سکوها، مقداری داده آماری از جنس ظرفیت در اختیار داریم که می‌توان با توجه به آنها پارامترهایی را محاسبه کرد که ما را در قضاوت‌های قابلیت اطمینان یاری دهند. یکی از مهمترین این پارامترها میانگین ظرفیت و همچنین ضریب تغییرات ظرفیت هستند. شایان ذکر است که مقادیری که برای ظرفیت نهایی سکو محاسبه شدند برای بارگذاری موج و باد و جریان با دوره بازگشت 100 ساله هستند، که در ادامه با مقدار میانگین ظرفیت حاصل از آنالیز قابلیت اطمینان مقایسه شده‌اند. مقادیر  $E[BS_{cap}]$  یا همان میانگین ظرفیت نهایی سکو برای سه جهت اصلی سکو به عنوان نماینده‌ای از کلیه جهت‌های اعمال بار محاسبه شده است.

جدول-3 پارامترهای قابلیت اطمینان برای هشت جهت مختلف در سکوی P.1

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
$E[BS_{cap}]$ , MN	17.50	15.23	15.37	15.23	17.50	15.23	15.37	15.23
$COV[BS_{cap}]$	0.079	0.091	0.111	0.091	0.079	0.091	0.111	0.091
$BS_{cap}$ , MN	15.44	15.57	15.39	14.91	16.54	15.28	16.34	15.42
$BS_{cap}/E[BS_{cap}]$	0.882	1.023	1.001	0.979	0.945	1.004	1.063	1.013

در بحث ارزیابی قابلیت اطمینان سازه جاکت، به طور کلی عدم قطعیت‌ها در مدل کردن بار مهمتر از مدل کردن ظرفیت شکست است. مطالعات انجام شده بر روی ظرفیت شکست در جاکتها نشان می‌دهد که ضریب تغییرات بار  $COV[L]$ ، برای برش پایه نهایی سالیانه در بارگذاری روی سازه حدود 0/4 است در حالیکه ضریب تغییرات ظرفیت  $COV[BS_{cap}]$ ، برای برش پایه ظرفیت سازه در حدود 0/05 تا 0/10 است که این مقدار هم وابسته به تنش تسلیم فولاد مصرفی دارد.[5]

### نتیجه گیری

با نظر به آنالیزهای حساسیت انجام شده و بررسی نمودارهای استخراج شده می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:  
 - ضریب تغییرات نهایی در سکوی P.1 دارای ماکزیمم مقدار 0/11 و برای سکوی P.2 دارای ماکزیمم مقدار 0/019 و در سکوی P.3 دارای ماکزیمم مقدار 0/005 است. مشاهده می‌شود که این مقادیر برای سکوهایی مختلف به نسبت شکل هندسی سازه و خصوصیات فیزیکی آن می‌توانند متفاوتی داشته باشند، لذا در بحث محاسبه احتمال شکست سازه، انجام یک آنالیز حساسیت برای ظرفیت نهایی شکست سازه، اطمینان بخشی نتایج نهایی را تا حدود زیادی افزایش می‌دهد.

- در مواردی که امکان آنالیز حساسیت برای ظرفیت نهایی شکست موجود نیست، ظرفیت محاسبه شده به وسیله بار موج مشخصه با دوره بازگشت صدساله با ترکیب بار باد و جریان، نتایج قابل قبولی بدست می‌دهد. بیشترین انحراف بدست آمده از تحلیل ظرفیت شکست ناشی از بار امواج صدساله نسبت به میانگین ظرفیت محاسبه شده در آنالیز حساسیت ظرفیت، برابر 12٪ بوده است، که در صورت انجام ندادن آنالیز حساسیت ظرفیت شکست می‌تواند به عنوان یکی از ضرایب عدم قطعیت به کار برده شود. البته تعیین مقدار قابل قبول برای این ضریب نیازمند انجام مطالعات بیشتری است.

### References

- [1] Suzanne Lacasse (2004). "Risk Assessment for Geotechnical Solutions Offshore", OMAE04
- [2] L. Manuel, D.G. Schmucker, C.A. Cornell, J.E. Carballo,(1998). "A reliability-based design format for jacket platforms under wave loads"
- [3] SACS Executive, Version 5.1.06
- [4] N.D. Bartlop, A.J. Adams, "Dynamics of Fixed Marine Structures. Third edition" Atkins Oil & Gas Engineering Limited, Epsom, UK
- [5] DnV: "Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis: Application to Jacket Platforms". Det norske Veritas, Report No 95-3203.

