روشهای احتمالاتی در تحلیل سکوهای ثابت فلزی دریایی خلیج فارس تحت بارگذاری امواج

بهروز عسگریان[۱] ، سید مهدی افضلی[۲]

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در این مقاله با استفاده از دو روش مختلف محاسبه احتمال گسیختگی سکوهای دریایی در مقابل بارهای محیطی، مطالعات احتمال گسیختگی سه سکوی نمونه واقع در خلیج‌فارس انجام شده است. در روش اول، عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه احتمال گسیختگی به صورت یک ضریب بزرگنمایی در تحلیل‌ها دخالت داده می‌شود، حال آنکه این عدم قطعیت‌ها در روش دوم، به صورت مستقیم و برای هر پارامتر به صورت جداگانه اثر داده شده است. در این مقاله با توجه به داده‌های آماری موجود، منحنی‌های خطر ارتفاع امواج در محدوده ساخت سکوها که برای محاسبه احتمال گسیختگی مورد نیاز می‌باشد، محاسبه شده‌اند. در نهایت پس از محاسبات احتمال گسیختگی طبق دو روش فوق، یک مقایسه تحلیلی بین دو روش انجام گرفته شد. این روش می‌تواند برای ارزیابی سکوهای موجود و تحلیل ظرفیت سکوهای جدید مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سکوی ثابت فلزی دریایی، تحلیل بارافزون، احتمال گسیختگی

Probabilistic-Based Methods For Jacket Type Offshore Platforms In Persian Gulf Subjected To Wave Loading

Abstract

In this paper, using two different methods, probability of failure is calculated for three offshore platforms in Persian Gulf. In first method, uncertainties are applied as a magnification factor in calculation of failure probability, whereas in the second method these uncertainties are considered directly for uncertainty parameters. The parameters of wave height hazard curve for eight directions of platforms with statistical analysis were obtained. These parameters are necessary for calculation of failure probability. Finally an analytical comparison has been carried out between two mentioned methods. These methods can be used for assessment of existing platforms and capacity analyses of new platforms.

Keyword: jacket, offshore platform, pushover analysis, probability of failure, Persian Gulf

۱- مقدمه

آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها به دلیل کاستیهای موجود در آنها در طول زمان دچار تغییرات اساسی گردیده است و این تغییرات همچنان ادامه دارد. بروز این کاستی‌ها عمدتاً ناشی از عدم شناخت کامل پارامترهای دخیل در طراحی اعم از نوع مصالح، مقاومت مصالح، نحوه ساخت، میزان خبره بودن سازندگان و همچنین شرایط محیطی و نوع بارهای وارده به سازه می‌باشد. هرچند متخصصین پیوسته در تلاش هستند که خطاهای ناشی از هریک از موارد فوق

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

را به حداقل برسانند و در نهایت سازه‌ای قابل اطمینان را طراحی و اجرا کنند. وضع استانداردهای مشخص کیفیتی و مدیریتی قابل قبول برای ساخت مصالح و همچنین نظارت کامل و دقیق بر نحوه اجرا و عوامل اجرایی می‌تواند تا حدود زیادی از بروز خطاهای ناخواسته در مرحله ساخت و اجرا بکاهد.

در مقابل نحوه اعمال بارها و شرایط محیطی بصورت تصادفی می باشد و نمی‌توان بر آن نظارت داشت. مسلماً طراحان با سعی در شناخت هر چه بیشتر و دقیقتر این موارد می‌توانند تأثیر واقعی شرایط مختلف را در سازه لحاظ کرده و به این ترتیب به نوعی به صورت غیر مستقیم بر این عوامل نظارت کنند. باید به این نکته توجه داشت که هر چقدر بتوان بر همه عوامل محیطی و بخصوص بر پارامترهای دخیل در ساخت و اجرا کنترل و اشراف داشت، باز هم عدم قطعیت‌هایی در آنها وجود دارد که ناشی از طبیعت تصادفی بودن آنهاست و فقط مقدار این عدم قطعیت‌ها متفاوت است، به‌طورمثال عدم قطعیت در تنش تسلیم مصالح مصرفی که دقت زیادی در نحوه ساخت و کنترل کیفیت آن می‌شود بسیار کمتر از عدم قطعیت در پارامترهای شرایط محیطی دریا برای یک سازه دریایی هستند.

می‌توان با شناخت هریک از موارد عدم قطعیت و بررسی تحلیلی آنها، میزان اثر و اهمیت آن در ظرفیت باربری نهایی سازه را مشخص و راههای محدود کردن این عدم قطعیتها را پیشنهاد نمود. این امر می‌تواند در تجدید نظر آیین نامه‌ها و اصلاح ضرایب اطمینان چه از نظر ایمن کردن سازه و چه از نظر اقتصادی کردن سازه مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعاتی که توسط سیگوردسون و همکاران [۱] انجام گرفت عدم قطعیت‌های در ارتباط با نیروها، اثرات نیروها، مقاومت اعضاء با همبستگی بین پارامترهای عدم قطعیت بررسی شد. همچنین در مطالعاتی که به وسیله کرنل و همکاران [۲] انجام شد، روش ساده‌ای برای محاسبه احتمال شکست توأم با طراحی به روش مرسوم ارائه گردید. در این مقاله تحلیل گسیختگی سکوهای نمونه در منطقه خلیج فارس با در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روابط احتمالاتی در ارتباط با ارتفاع امواج و احتمال گسیختگی

۲- ۱- احتمال گسیختگی به بیان برش پایه

سکوهای ثابت فلزی دریایی عموماً بر اساس نیروهای استاتیکی ناشی از امواج طراحی می‌گردند. در مطالعاتی که به وسیله کرنل و همکاران [۲] انجام شده است، روش ساده‌ای برای محاسبه احتمال گسیختگی توأم با طراحی به روش مرسوم ارائه گردیده است.

در این روش احتمال گسیختگی به بیان نیرو به صورت عبارتی از برش پایه نیاز در برابر برش پایه ظرفیت در هنگام گسیختگی بیان می‌شود.

$$P_f = P\left(BS_{demand} > BS_{capacity}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، BS_{demand} و BS_{cap} مقادیر متغیر تصادفی هستند که به ترتیب برش پایه نیاز و برش پایه ظرفیت نامیده می‌شوند. برش پایه ظرفیت BS_{cap}، به صورت یک پارامتر تصادفی لگاریتمی نرمال[1] با میانگینی برابر $BS_{cap,med}$ و ضریب تغییرات (COV) برابر V_{BScap} در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات انجام شده برای سکوهای از نوع جاکت یک مقدار COV در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درصد، با مقادیر مشاهده شده در عمل سازگاری دارد [۲].

۲-۲- برش پایه نیاز

در این مطالعه برش پایه نیاز بیشینه سالیانه در ارتباط با ارتفاع بیشینه موج سالیانه به شکل زیر بیان می‌شود:

$$B.S. = c \cdot H^{\alpha} \cdot \Gamma \qquad (۲)$$

که c و α مقادیر ثابت متعینی هستند که بیان کننده چگونگی تغییرات برش پایه و ارتفاع موج می‌باشند. پارامتر Γ فاکتوریست که بیان کننده عدم قطعیت در برگیرنده محاسبه برش پایه در برابر ارتفاع موج است.

1 - Lognormal

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

وقتی از پارامترهای c و α استفاده می‌کنیم Γ به صورت یک مقدار متغیر با توزیع لگاریتمی نرمال و میانگین ۱/۰ و کواریانسی برابر ۰/۲۵ بیان می‌شود.

۲-۳- احتمال گسیختگی در ارتباط با ارتفاع موج

با توجه به معادلات (۱) و (۲) می‌توان رابطه‌ای برای بیان احتمال گسیختگی در برابر بیشینه ارتفاع موج سالیانه در نظر گرفت:

$$P_f = P\left(H > \left(\frac{BS_{cap}}{c\Gamma}\right)^{1/\alpha}\right) \qquad (۳)$$

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

$$H_{cap} = \left(\frac{BS_{cao}}{c\Gamma}\right)^{1/\alpha} \qquad (۴)$$

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

$$\text{Median of } H_{cap} = H_{cap,med} = \left(\frac{BS_{cap,med}}{c}\right)^{1/\alpha} \qquad (۵)$$

$$\text{COV of } H_{cap} = V_{Hcap} = \frac{1}{\alpha}\sqrt{V_{BScap}{}^2 + V_{\Gamma}{}^2} \qquad (۶)$$

۲-۴- توزیع ارتفاع موج

با استفاده از آمار سالیانه موج در محدوده مورد نظر، می‌توان توزیع سالانه احتمال وقوع امواج با ارتفاع بیشینه را محاسبه کرد. به این ترتیب منحنی خطر در محدوده ساخت سکوها که بیان کننده احتمال وقوع موج با ارتفاع معلوم است محاسبه می‌شود. منحنی خطر $Haz(h)$، بیان کننده احتمال سالیانه وقوع امواجی با ارتفاع بیشتر از یک موج مشخص با ارتفاع h، است.

$$Haz(h) = P(H > h) \qquad (۷)$$

احتمال گسیختگی با استفاده از تئوری کلی احتمالات و رابطه بین منحنی خطر موج و توزیع لگاریتمی نرمال ظرفیت محاسبه می‌شود. اکنون احتمال گسیختگی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P_f = Haz(H_{cap,med}) \cdot C_f \qquad (۸)$$

که $Haz(H_{cap,med})$، مربوط به منحنی خطر ارتفاع موج است که متناظر با $H_{cap,med}$ می‌باشد و C_f بیانگر یک ضریب تشدید یا به عبارتی یک ضریب بزرگنمایی است. اگر بتوان منحنی خطر ارتفاع امواج را به صورت یک رابطه نمایی در محدوده ارتفاع امواج مورد انتظار به شکل زیر بیان نمود:

$$Haz(h) = k_0 \cdot h^{-k_H} \qquad (۹)$$

می‌توان یک تعریف از مقدار C_f به شرح زیر ارائه کرد:

$$C_f = \exp\left(\frac{1}{2}k_H^2 V_{Hcap}^2\right) \qquad (۱۰)$$

که V_{Hcap}، در رابطه (۶) بیان شده. پارامتر دیگر k_H که در رابطه (۱۰) ظاهر شده بیان کننده شیب رابطه نمایی منحنی خطر موج است. برای محاسبه پارامترهای k_0 و k_H، از امواجی با دوره بازگشت مضربی از هزار استفاده می‌شود. مثلاً امواج با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال و ۱۰۰۰۰ سال به عنوان دو نقطه مبنا برای محاسبه می‌توانند استفاده شوند.

۲-۵- روابط حالت حدی مطابق توصیه‌نامه DNV [۳]

در این روش با مرتبط کردن ظرفیت گسیختگی به برش پایه کل، (یا ممان واژگونی کل) ظرفیت گسیختگی برای جهت مفروض θ، به صورت یک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

متغیر تصادفی $CC|\theta$ و بار نهایی سالیانه (مثلاً برش پایه کل یا ممان واژگونی کل) هم به صورت یک متغیر تصادفی $L|\theta$ نشان داده می‌شوند. تابع حالت حدی برای تحلیل قابلیت اطمینان برای جهت بارگذاری θ به صورت زیر قابل بیان است:

$$g\left(cc|\theta, l|\theta\right) = cc|\theta - l|\theta \qquad (۱۱)$$

ظرفیت گسیختگی $CC|\theta$ برای جهت مفروض بارگذاری θ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$CC|\theta = X_{CC-analysis} \cdot X_{CC-\text{model}}|\theta \cdot CC_{calc}|\theta \qquad (۱۲)$$

که در آن $CC|\theta$ ظرفیت محاسبه شده، $X_{CC-analysis}$ شکلی از عدم قطعیت‌ها هستند که ناشی از ناسازگاریها در تحلیل است و $X_{CC-\text{model}}$ عدم قطعیت‌های مدل در محاسبه ظرفیت هستند که به طور عمده بستگی به هندسه سازه، خصوصیات مصالح و الگو و جهت بار و سایر پارامترها دارد. عدم قطعیت‌های مدل $X_{CC-\text{model}}$، عموماً با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات تکمیلی ارزیابی می‌شود. به طور معمول اطلاعات محدودی برای مشخص کردن این عدم قطعیت در مدل وجود دارد و این عدم قطعیت عموماً به صورت متغیر تصادفی با توزیع نرمال یا لگاریتمی‌نرمال در نظر گرفته می‌شود.

برش پایه نهایی سالانه $L|\theta$، که به سازه اعمال می‌شود به صورت زیر قابل بیان است:

$$L|\theta = X_{L-jack} \cdot L_{jack}|\theta + L_{wind}|\theta + X_{L-deck} \cdot L_{deck}|\theta \qquad (۱۳)$$

$L_{jack}|\theta$، بارهای هیدرودینامیکی و $X_{L-jack}|\theta$، عدم قطعیت متناظر با آن است. $L_{wind}|\theta$ بار باد است. $L_{deck}|\theta$ بار هیدرودینامیکی وارده به عرشه سازه و $X_{L-deck}|\theta$ عدم قطعیت متناظر با آن می‌باشد.

$L_{jack}|\theta$ و $L_{deck}|\theta$ در اثر اتفاقی بودن محیط دریا (مثل ارتفاع و پریود امواج، جریانات دریایی و عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مورد استفاده در محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی)، دو پارامتر تصادفی هستند. این شکل از عدم قطعیت‌ها که ناشی از عدم قطعیت‌ها در مدل هیدرودینامیکی اعمال شده برای شرایط محیطی مفروض هستند به وسیله مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات پیشرفته عددی قابل ارزیابی هستند. میزان این عدم قطعیت‌ها بسیار بستگی به مدل ~~تئوریکال~~ تئوریک مورد استفاده دارد.

احتمال گسیختگی سازه با در نظر گرفتن احتمال گسیختگی برای هر جهت موج $(\theta_i, i = 1...N_{dir})$ به صورت جداگانه با مود گسیختگی $\{L|\theta_i \geq CC|\theta_i\}$ قابل محاسبه است. احتمال گسیختگی سالیانه سیستم به صورت زیر قابل بیان است:

$$P_{f,annual} = P(\{L|\theta_1 \geq CC|\theta_1\} \cup \{L|\theta_2 \geq CC|\theta_2\} \cup ... \cup \{L|\theta_{Ndir} \geq CC|\theta_{Ndir}\}) \qquad (۱۴)$$

می‌توان فرض کرد که عدم قطعیت‌ها برای جهت‌های مختلف غیر وابسته هستند. برای احتمالات گسیختگی کوچک، احتمال گسیختگی کل به صورت تقریبی برابر است با مجموع احتمال گسیختگی برای هر جهت تابش موج ،

$$P_{f,annual} = \sum_{i=1,N_{dir}} \left(P_{f,annual}|\theta_i\right) \cdot P(\theta_i) \qquad (۱۵)$$

که $P(\theta)$ احتمال وقوع بار در جهت θ و $P_{f.annual}|\theta$ احتمال گسیختگی سالانه در جهت θ است. برای یک $P_{f,annual}$ کوچک، احتمال خرابی سیستم در مدت زمان معین n_{life} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_f \approx n_{life} \cdot P_{f,annual} \qquad (۱۶)$$

۳- تحلیل گسیختگی سکوهای نمونه در منطقه خلیج فارس

۳-۱- تحلیل احتمالاتی آمار موج

با توجه به آمار موجود که به صورت جداگانه برای هشت جهت ارائه گردیده، تحلیل احتمالاتی وقوع موج برای هر جهت به صورت مستقل از سایر جهت‌ها انجام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

شده و با فرض توزیع ویبل[2] (مراجع [۳] و [۴]) رابطه زیر برای تحلیل احتمالاتی در نظر گرفته شد:

$$P(H) = 1 - \exp\left(-\delta \cdot \left(\frac{h-\beta}{h_s}\right)^{\alpha}\right) \qquad (۱۷)$$

رابطه (۱۷) توسط Forristall [۵] برای شرایط محیطی ایستا[3] ارائه گردید. در این حالت توزیع بیشینه ارتفاع امواج در رخداد بزرگترین طوفان از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

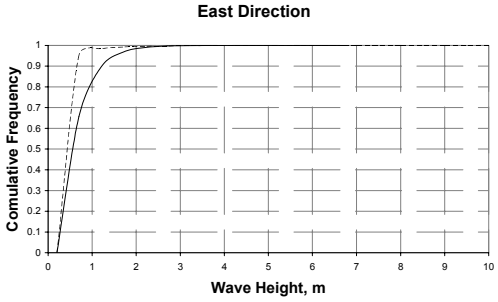
$$P(H_{\max}) = \exp\left\{-N_{wave} \cdot \exp\left[-\delta \cdot \left(\frac{h_{\max}-\beta}{h_s}\right)^{\alpha}\right]\right\} \qquad (۱۸)$$

که در روابط فوق مقدار $P(H)$ برابر احتمال وقوع امواجی با ارتفاع بیشتر از موجی با ارتفاع H است، تعداد امواج N_{wave} در شرایط محیطی دریا با توجه به ارتفاع امواج مشخصه و پریود مربوطه، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$N_{Wave} = \frac{\tau}{T_z \left| h_{s,\max}\right.} \qquad (۱۹)$$

τ زمان طوفان است، و برابر ۶ ساعت (۲۱۶۰۰ ثانیه) می باشد. پریود امواج مشخصه برای شرایط آماری موجود $T_z \left| h_{s,\max}\right.$، نیز برابر ۴ ثانیه می‌باشد.(با توجه به آمار موج موجود)

داده‌های آماری برای هر جهت به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه نمودار PDF برای جهت شرقی به طور نمونه قابل ملاحظه است. در این شکل منحنی خط چین نشان دهنده تابع چگالی طیفی محاسبه شده براساس رابطه (۱۷) و منحنی دیگر نشان دهنده وضعیت واقعی محیط دریا بر اساس آمار موجود در این جهت می‌باشد.



شکل ۱- نمودار PDF برای امواج جهت شرقی

لازم به ذکر است توزیعهای آماری فورچت[4] و گامبل[5] نیز روی داده‌های فوق برازش شد، که نتایج بیانگر انطباق بهتر توزیع ویبل بود. لذا برای سایر جهات به تبعیت از نتایج فوق از توزیع ویبل استفاده شد. خلاصه‌ای از نتایج سایر جهات در منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) قابل مشاهده است.

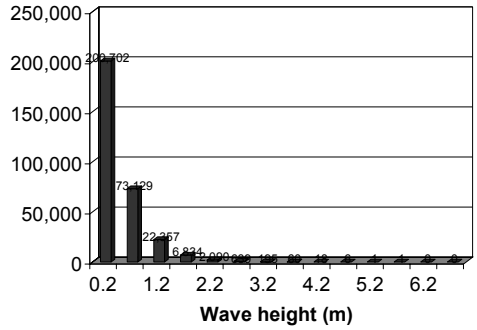
جدول ۱- پارامترهای توزیع ویبل به تفکیک هشت جهت اصلی وقوع امواج

Wave Direction	α	δ	β	h_s	$P(\theta)$	N_{wave}	R^2
East	0.4158	3.9860	0.2	0.93	0.101	545.40	0.9893
North East	0.4159	3.6958	0.2	0.93	0.112	604.80	0.9906
North	0.4312	3.7852	0.2	0.93	0.189	1021.60	0.9911
North West	0.4468	3.9594	0.2	0.93	0.312	1684.80	0.9913
West	0.4251	3.9310	0.2	0.93	0.144	776.60	0.9902
South West	0.3879	3.7487	0.2	0.93	0.040	216.00	0.9889
South	0.3886	3.9110	0.2	0.93	0.039	210.60	0.9880
South East	0.4030	3.9741	0.2	0.93	0.064	345.60	0.9889

همانگونه که مشاهده می‌گردد ضریب همبستگی توزیع انتخاب شده حدود ۹۹٪ بوده که دارای دقت مناسبی می‌باشد.

2 - Weibull
3 - Stationary sea state
4 - Furchet
5 - Gamble

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]



شکل ۲- تعداد امواج در نظر گرفته شده (سالیانه) برای جهت شمالی (بطور نمونه)

در شکل (۲) تعداد امواج در نظر گرفته شده، در جهت شمالی، به تفکیک ارتفاع موج، جهت انجام تحلیل ها ارائه گردیده است.

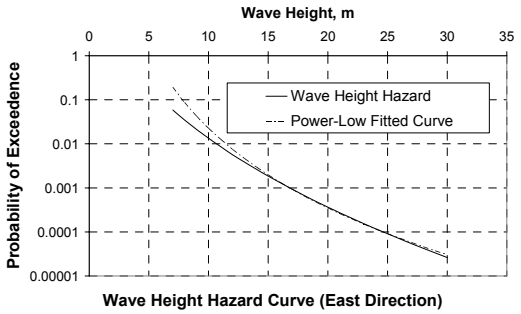
۳-۲- محاسبه پارامترهای منحنی خطر ارتفاع موج

منحنی خطر $Haz(h)$، بر اساس رابطه (۹) بیان کننده احتمال سالیانه وقوع امواجی با ارتفاع بیشتر از یک موج مشخص با ارتفاع h، است[۲]. برای منطقه مزبور با استفاده از تحلیلهای آماری مقادیر k_0 و k_H برای هر جهت محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۲- مقادیر k_0 و k_H در رابطه (۹)

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
k_0	23482	85479	208501	348790	63967	6601.6	3596.3	8762.9
k_H	-6.02	-6.05	-6.51	-6.98	-6.30	-5.24	-5.24	-5.64

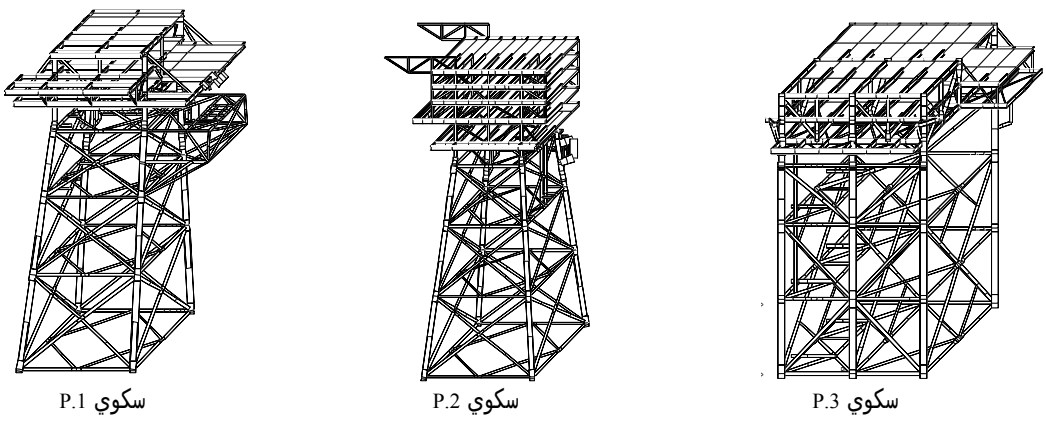
در شکل (۳) منحنی خطر ارتفاع موج برای منطقه مورد نظر در خلیج فارس و در حالتی که امواج از جهت شرقی اعمال می‌شوند قابل مشاهده است. برای هشت جهت مختلف اعمال امواج می‌توان منحنی‌های مشابه شکل (۳) را در نظر گرفت که مقادیر k_0 و k_H آن در جدول (۲) موجود می‌باشد.



شکل ۳- منحنی خطر ارتفاع موج برای جهت شرقی در منطقه مورد مطالعه در خلیج فارس

۳-۳- محاسبه نیروها

نیروهای وارد به سکو ناشی از شرایط محیطی دریا می‌باشند. بارهای محیطی به آن دسته از بارها اطلاق می‌شود که از پدیده‌های محیطی همچون باد، امواج، جریان آب، جزر و مد، زمین لرزه، یخبندان، جابجایی بستر دریا و رویدنیهای دریایی ناشی می‌شوند. تعیین پارامترهای مشخصه آنها و تعیین مقادیر بارهای طراحی موضوع مطالعات خاصی است که بر اساس اطلاعات و



شکل ۴- شکل سه بعدی سکوهای مورد استفاده در تحلیل‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

داده‌هایی که در هر زمینه در دسترس می‌باشد انجام می‌شود. در این مطالعه بار باد و موج و جریان با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برای محاسبه ظرفیت سکو به کار گرفته شده‌اند. همچنین جهت انجام تحلیل های آماری، از اطلاعات محلی مربوط به امواج استفاده گردیده است. اطلاعات مربوطه شامل ارتفاع و پریود امواج می‌باشد.

۳-۴- 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 ۴۹/۵ متر می‌باشد. این سکو در پلان دارای ابعاد متغیر ۲۷/۷×۲۸/۵ متر تا ۱۷/۴۴×۲۲/۲۲ متر می‌باشد. برای سکوی P.2 عمق آب در محل احداث سکو برابر ۴۷/۸ متر می‌باشد. سکوی P.2 یک سکوی نشیمن چهارپایه است و دارای ابعاد متغییر ۲۸/۶×۲۸/۶ متر تا۱۷/۹۴×۱۷/۹۴ متر در پلان است. سکوی P.3 یک سکوی بهره برداری شش پایه است و عمق آب در محل احداث سکو برابر ۴۷/۶ متر می باشد. ابعاد سکوی P.3 در پلان برابر ۳۶/۰۰×۳۶/۰۰ متر است. سکوهای فوق بر اساس آیین نامه API-RP2A[۶] جهت نصب در منطقه خلیج فارس طراحی شده‌اند.

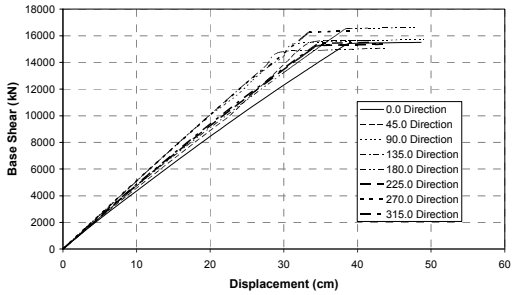
۳-۵- تحلیلهای بارافزون[۶] برای محاسبه ظرفیت نهایی سکوها

اساس مطالعات انجام شده برای محاسبات احتمال گسیختگی، 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 می‌شود. 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 گسیختگی 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 [۸] بر روی سکوها انجام شده است. در تحلیل‌های بار افزون انجام شده، اثرات غیرخطی مصالح سازه، اثرات غیرخطی هندسی به همراه رفتار غیر خطی خاک اطراف شمع‌ها مد نظر قرار گرفته است. بدین منظور تحلیل اندرکنش خاک - سازه و شمع انجام گرفته است. در مدلهای در نظر گرفته شده علاوه بر سازه جاکت و عرشه، شمع‌های داخل خاک به همراه خاک اطراف آن (با در نظرگرفتن فنرهای غیر خطی Q-Z, T-Z, P-Y) مدلسازی گردیده است. الگوی توزیع بار جانبی جهت انجام تحلیل بار افزون براساس نتایج حل معادله موج و بدست آوردن نیروی وارد بر سازه با استفاده از معادله موریسون انجام گرفته است. محل اعمال بار مطابق با الگوی بدست آمده از معادله موریسون در نقاط مختلف سازه بوده است. همچنین موج در نظر گرفته شده جهت محاسبه الگوی بار، موج با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در منطقه مورد نظر و مطابق با دفترچه های طراحی بوده است. در ادامه نتایج تحلیل بارافزون انجام شده روی سه سکوی مورد مطالعه و برای هشت جهت مجزا به صورت نمودار بار-تغییر مکان قابل مشاهده هستند. شکلهای (۵)، (۷) و (۹) نشان دهنده منحنیهای بار تغییر مکان حاصل ار تحلیلهای بارافزون هستند. همانگونه که مشاهده می‌شود برای تمامی سکوها رفتار نیرو تغییر مکان در ابتدا تا مرحله تسلیم به صورت خطی و پس از آن وارد مرحله غیر خطی و نهایتاً گسیختگی می‌گردد. شکلهای (۶)، (۸) و (۱۰) نشان دهنده توزیع جهتی مقاومت سکوها است و جداول (۳)، (۴)و (۵) نشان دهنده مقادیر ظرفیت نهایی گسیختگی سکو و مقادیر ضریب بار مربوطه هستند.

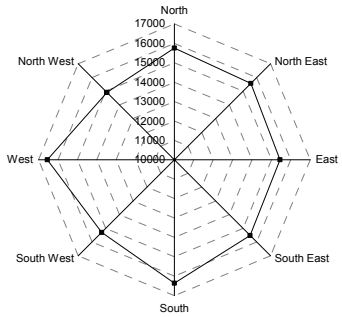
6- Pushover

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

محاسبات ظرفیت نهایی برای سکوی P.1 :



شکل ۵- منحنیهای Pushover سکوی P.1

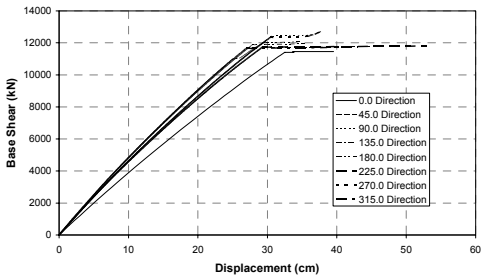


شکل ۶- توزیع جهتی مقاومت سکوی شکل P.1

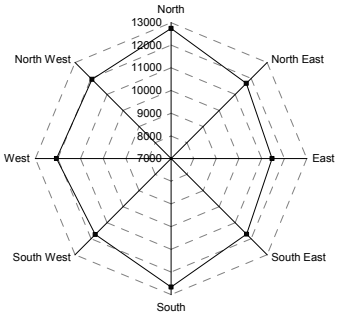
جدول ۳- ظرفیت نهایی بر حسب kN برای هشت جهت مختلف در سکوی P.1

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
Load Coefficient	2.07	1.96	1.70	1.84	2.14	1.85	1.78	1.94
Base Shear	15439	15570	15392	14907	16542	15282	16336	15425

محاسبات ظرفیت نهایی برای سکوی P.2 :



شکل ۷- منحنیهای Pushover سکوی P.2

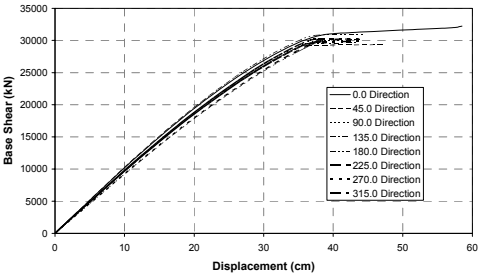


شکل ۸- توزیع جهتی مقاومت سکوی P.2

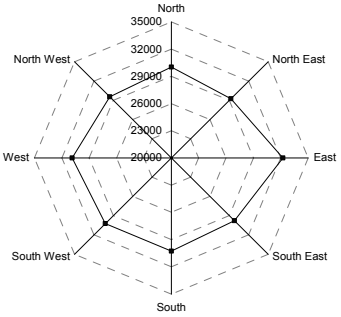
جدول ۴- ظرفیت نهایی بر حسب kN برای هشت جهت مختلف در سکوی P.2

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
Load Coefficient	1.91	1.95	2.00	1.98	2.01	1.94	1.95	1.93
Base Shear	11456	11757	12736	11941	12124	11793	12732	11713

محاسبات ظرفیت نهایی برای سکوی P.3 :



شکل ۹- منحنیهای Pushover سکوی P.3



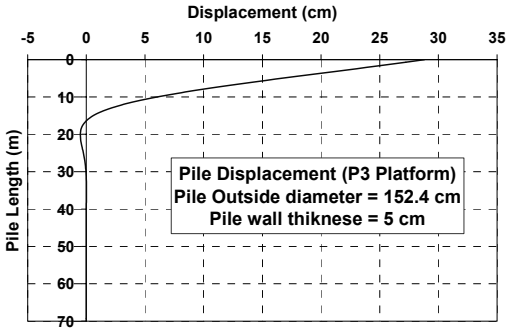
شکل ۱۰- توزیع جهتی مقاومت سکوی P.3

جدول ۵- ظرفیت نهایی بر حسب kN برای هشت جهت مختلف در سکوی P.3

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
Load Coefficient	3.43	3.33	3.54	3.33	3.31	3.44	3.53	3.34
Base Shear	32232	29237	30015	29547	30874	30221	30226	29791

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

شایان ذکر است در بیشتر تحلیلهای انجام شده، سکو در اثر نقصان شمعها دچار انهدام می‌گردد و دنباله کوتاه نمودار بار- تغییرمکان نیز به همین دلیل است، در شکل (۱۱) وضعیت تغییر شکل یافته یکی از شمعهای سکوی نمونه شماره ۳ در انتهای تحلیل ارائه گردیده است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می شود، شمع مورد نظر در محل برخورد با کف دریا، پس از رسیدن به تغییر مکان نهایی، به ظرفیت نهایی خود رسیده و سازه وارد مرحله گسیختگی گردیده است.



شکل ۱۱- منحنی تغییر شکل جانبی شمع نسبت به طول شمع (سکوی P.3)

۳-۶- تحلیل حساسیت بار گسیختگی

برای محاسبه $V_{BS,cap}$ که یکی از پارامترهای تأثیرگذار در احتمال خرابی سکو می‌باشد، یک سری تحلیل حساسیت بر اساس پروفیلهای متفاوت بار شامل تغییر در ارتفاع موج و زمان تناوب موج روی هر سه سکوی مورد مطالعه انجام شد. این تحلیلها برای سه جهت اصلی سکو انجام شده و نتایج آن به تمام جهت‌ها تعمیم داده شده‌اند. ارتفاع امواج در تحلیلها در بازه ۷ متر تا ۱۵ متر و محدوده پریود امواج در محدوده ۹/۵ ثانیه تا ۱۱/۵ ثانیه می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیلهای قابلیت اطمینان برای سکوها، داده های آماری از جنس ظرفیت در اختیار می‌باشد که با توجه به آنها می‌توان ضریب تغییرات ظرفیت را محاسبه نمود. جدول (۶) بیانگر ضریب تغییرات ظرفیت محاسبه شده در سه جهت اصلی است که مقادیر ضریب تغییرات ظرفیت متناظر برای سایر جهت‌ها نیز در این جدول قید شده‌اند.

جدول ۶- مقادیر $V_{BS,cap}$ محاسبه شده، برای سکوهای P.1، P.2، P.3

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
P.1	0.079	0.091	0.111	0.091	0.079	0.091	0.111	0.091
P.2	0.016	0.014	0.019	0.014	0.016	0.014	0.019	0.014
P.3	0.003	0.005	0.002	0.005	0.003	0.005	0.002	0.005

۳-۷- محاسبه رابطه بین ارتفاع موج و برش پایه ایجاد شده در سکو

برای محاسبه رابطه بین بارگذاری و ظرفیت در سکوها یک سری از امواج با ارتفاعهای یک متر تا ۱۴ متر با پریودهای متناسب و با ترکیب با بار باد و جریان و بارهای ثقلی به سکوها اعمال شد و برش پایه بیشینه حاصل از هر موج در هر جهت محاسبه شد. با در دست داشتن ارتفاع موج و برش پایه بیشینه متناظر با آن می‌توان با استفاده از روشهای ریاضی یک رابطه نمایی به شکل رابطه ۲۰ ارائه کرد[۳].

$$B.S. = C_1 \cdot H^{C_2} \qquad (۲۰)$$

پارامترهای C_1 و C_2 در جهات مختلف متفاوت می‌باشند. در جداول (۷) تا (۹) مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 برای سه سکوی P.1، P.2 و P.3 نشان داده شده است.

جدول ۷- مقادیر C_1 و C_2 در رابطه $B.S. = C_1 \cdot H^{C_2}$، برای سکوی P.1

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
C_1	80.83	84.41	99.65	73.02	85.48	89.90	110.73	77.02
C_2	1.81	1.84	1.83	1.92	1.81	1.84	1.80	1.89

جدول ۸- مقادیر C_1 و C_2 در رابطه $B.S. = C_1 \cdot H^{C_2}$، برای سکوی P.2

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
C_1	109.5	82.37	105.99	81.28	110.94	93.89	133.58	97.22
C_2	1.62	1.76	1.67	1.76	1.62	1.72	1.59	1.70

جدول ۹- مقادیر C_1 و C_2 در رابطه $B.S. = C_1 \cdot H^{C_2}$، برای سکوی P.3

Direction	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
C_1	112.53	101.68	136.80	107.42	108.00	104.37	144.32	106.94
C_2	1.80	1.81	1.64	1.79	1.81	1.80	1.63	1.79

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

۳-۸- محاسبه احتمال خرابی

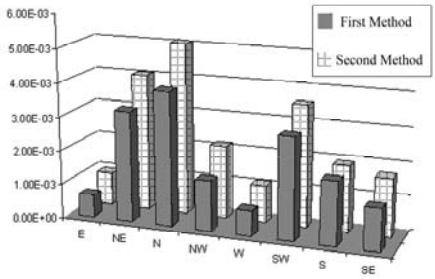
با توجه به محاسبات انجام شده می‌توان ظرفیت نهایی محاسبه شده برای هر جهت سکو را به ارتفاع موج متناظری که همان برش پایه کل را در سکو ایجاد می‌کند مرتبط کرد. پارامتر k_H که در تحلیلهای آماری محاسبه شد نیز برای محاسبه C_f مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله دو روش مشابه برای محاسبه احتمال خرابی در سازه‌های دریایی مورد بحث قرار گرفته، روش اول براساس مطالعات کرنل و همکاران [۲] است و روش دوم بر اساس روش ارائه شده توسط توصیه نامه DNV [۳] می‌باشد. اگرچه در این دو روش پارامترها با نامهای متفاوتی وجود دارد ولی ماهیت این پارامترها یکسان هستند و می‌توانند در مقایسه بین دو روش از آنها استفاده کرد. در ادامه محاسبات مربوط به احتمال خرابی برای سکوی P.1 در جداول (۱۰) و (۱۱) برای مقادیر مختلف ضریب تغییرات بار قابل مشاهده هستند.

جدول ۱۰- مقادیر P_f برای سکوی P.1 (روش اول)

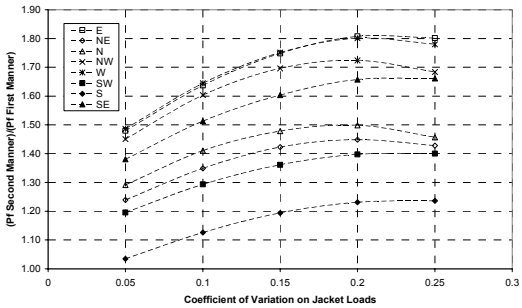
Direction	P_f on $0.05 < COV[\Gamma] < 0.25$				
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
E	6.464E-4	6.737E-4	7.219E-4	7.952E-4	9.004E-4
NE	3.267E-3	3.402E-3	3.639E-3	3.999E-3	4.515E-3
N	3.933E-3	4.123E-3	4.461E-3	4.981E-3	5.739E-3
NW	1.476E-3	1.551E-3	1.685E-3	1.892E-3	2.196E-3
W	7.416E-4	7.760E-4	8.371E-4	9.306E-4	1.067E-3
SW	2.994E-3	3.087E-3	3.248E-3	3.488E-3	3.822E-3
S	1.869E-3	1.929E-3	2.034E-3	2.190E-3	2.409E-3
SE	1.237E-3	1.279E-3	1.352E-3	1.462E-3	1.616E-3

جدول ۱۱- مقادیر P_f برای سکوی P.1 (روش دوم)

Direction	P_f on $1.05 < X_L < 1.25$				
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
E	9.564E-4	1.103E-3	1.262E-3	1.437E-3	1.622E-3
NE	4.049E-3	4.589E-3	5.177E-3	5.792E-3	6.447E-3
N	5.079E-3	5.815E-3	6.595E-3	7.464E-3	8.361E-3
NW	2.141E-3	2.487E-3	2.858E-3	3.262E-3	3.697E-3
W	1.102E-3	1.276E-3	1.466E-3	1.676E-3	1.899E-3
SW	3.579E-3	3.992E-3	4.421E-3	4.875E-3	5.351E-3
S	1.934E-3	2.172E-3	2.429E-3	2.696E-3	2.978E-3
SE	1.708E-3	1.935E-3	2.168E-3	2.423E-3	2.685E-3



شکل ۱۲- مقایسه احتمال خرابی محاسبه شده با روش اول و دوم و ضریب تغییرات بارگذاری برابر ۵ درصد (سکوی P.1)



شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای احتمال گسیختگی در روش دوم نسبت به روش اول در برابر ضریب تغییرات بارگذاری (سکوی P.1)

محاسبات مربوط به احتمال خرابی برای سکوی P.2 در جداول (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده هستند:

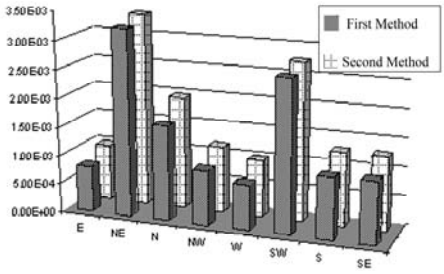
جدول ۱۲- مقادیر P_f برای سکوی P.2 (روش اول)

Direction	P_f on $0.05 < COV[\Gamma] < 0.25$				
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
E	7.848E-4	8.262E-4	9.003E-4	1.015E-3	1.184E-3
NE	3.241E-3	3.389E-3	3.650E-3	4.050E-3	4.630E-3
N	1.649E-3	1.746E-3	1.920E-3	2.193E-3	2.602E-3
NW	9.386E-4	9.954E-4	1.098E-3	1.259E-3	1.502E-3
W	7.842E-4	8.298E-4	9.119E-4	1.041E-3	1.233E-3
SW	2.640E-3	2.734E-3	2.897E-3	3.143E-3	3.490E-3
S	1.059E-3	1.104E-3	1.181E-3	1.300E-3	1.470E-3
SE	1.075E-3	1.121E-3	1.201E-3	1.323E-3	1.498E-3

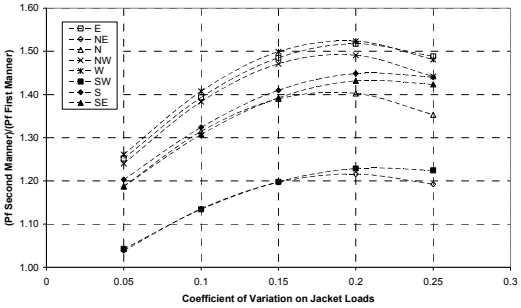
جدول ۱۳- مقادیر P_f برای سکوی P.2 (روش دوم)

Direction	P_f on $1.05 < X_L < 1.25$				
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
E	9.824E-4	1.151E-3	1.337E-3	1.540E-3	1.762E-3
NE	3.365E-3	3.848E-3	4.367E-3	4.924E-3	5.519E-3
N	1.958E-3	2.296E-3	2.668E-3	3.076E-3	3.520E-3
NW	1.164E-3	1.377E-3	1.615E-3	1.877E-3	2.165E-3
W	9.892E-4	1.168E-3	1.367E-3	1.586E-3	1.826E-3
SW	2.752E-3	3.100E-3	3.470E-3	3.861E-3	4.273E-3
S	1.274E-3	1.462E-3	1.665E-3	1.883E-3	2.117E-3
SE	1.276E-3	1.466E-3	1.672E-3	1.894E-3	2.132E-3

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]



شکل ۱۴- مقایسه احتمال خرابی محاسبه شده با روش اول و دوم و ضریب تغییرات بارگذاری برابر ۵ درصد (سکوی P.2)



شکل ۱۵- نمودار مقایسه‌ای احتمال گسیختگی در روش دوم نسبت به روش اول در برابر ضریب تغییرات بارگذاری(سکوی P.2)

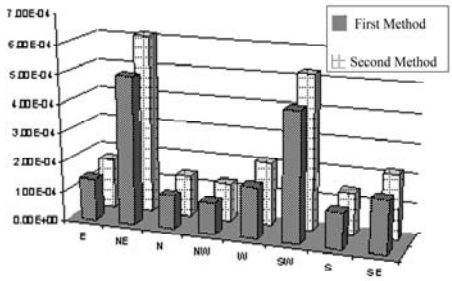
محاسبات مربوط به احتمال خرابی برای سکوی P.3 در جداول (۱۴) و (۱۵) قابل مشاهده هستند:

جدول ۱۴- مقادیر P_f برای سکوی P.3 (روش اول)

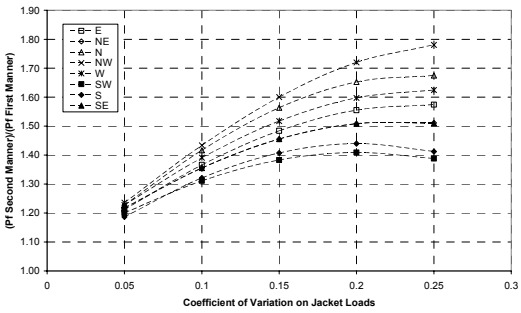
Direction	P_f on $0.05 < COV[\Gamma] < 0.25$				
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
E	1.393E-4	1.453E-4	1.559E-4	1.720E-4	1.951E-4
NE	5.029E-4	5.243E-4	5.619E-4	6.192E-4	7.015E-4
N	1.128E-4	1.186E-4	1.290E-4	1.451E-4	1.687E-4
NW	1.039E-4	1.084E-4	1.164E-4	1.285E-4	1.461E-4
W	1.742E-4	1.816E-4	1.947E-4	2.146E-4	2.431E-4
SW	4.385E-4	4.574E-4	4.906E-4	5.413E-4	6.141E-4
S	1.212E-4	1.275E-4	1.389E-4	1.565E-4	1.825E-4
SE	1.791E-4	1.868E-4	2.004E-4	2.212E-4	2.511E-4

جدول ۱۵- مقادیر P_f برای سکوی P.3 (روش دوم)

Direction	P_f on $1.05 < X_L < 1.25$				
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
E	1.688E-4	1.985E-4	2.313E-4	2.675E-4	3.071E-4
NE	6.126E-4	7.105E-4	8.175E-4	9.338E-4	1.060E-3
N	1.385E-4	1.680E-4	2.017E-4	2.398E-4	2.825E-4
NW	1.284E-4	1.554E-4	1.863E-4	2.210E-4	2.601E-4
W	2.139E-4	2.526E-4	2.955E-4	3.428E-4	3.949E-4
SW	5.264E-4	5.997E-4	6.785E-4	7.627E-4	8.524E-4
S	1.438E-4	1.684E-4	1.955E-4	2.253E-4	2.577E-4
SE	2.179E-4	2.532E-4	2.917E-4	3.337E-4	3.791E-4



شکل ۱۶- مقایسه احتمال خرابی محاسبه شده با روش اول و دوم و ضریب تغییرات بارگذاری برابر ۵ درصد (سکوی P.3)



شکل ۱۷- نمودار مقایسه‌ای احتمال گسیختگی در روش دوم نسبت به روش اول در برابر ضریب تغییرات بارگذاری (سکوی P.3)

شکلهای (۱۲)، (۱۴) و (۱۶) نمودار مقایسه‌ای احتمال خرابی محاسبه شده توسط روش اول و روش دوم می‌باشد، با توجه به نمودار مشخص است که جوابهای حاصل از روش دوم (DNV)، جوابهای محافظه‌کارانه‌تری نسبت به روش اول (Cornell) هستند. این نمودار به صورت مشابه برای سایر ضرایب تغییر بار تکرار می‌شود.

شکلهای (۱۳)، (۱۵) و (۱۷) بیانگر نسبت احتمال گسیختگی محاسبه شده در روش دوم به مقدار محاسبه شده در روش اول است. این مقادیر در ابتدای منحنی برای کلیه جهت‌ها با شیب یکسانی به صورت خطی افزایش می‌یابند، ولی از نقطه‌ای که ضریب تغییرات بارگذاری برابر ۰/۱۵ است نرخ افزایشی کند نمایی پیدا می‌کنند و از نقطه‌ای که ضریب تغییرات بارگذاری برابر ۰/۲ است دارای نرخ کاهشی می‌شوند. لازم به ذکر است در صورت وجود هرگونه خطا در اطلاعات آماری و عدم قطعیت ورودی‌های مسئله، نتایج بدست آمده دارای اختلاف با مقادیر واقعی خواهد بود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]

۴- نتیجه گیری

در طراحی‌های مهندسی، معمولاً در حین عملیات طراحی و یا پس از آن, محاسبات احتمال گسیختگی در مقابل بارهای با دوره بازگشت مختلف صورت نمی‌گیرد. در این مقاله، با استفاده از دو روش مختلف، احتمال گسیختگی سکوهای ثابت فلزی دریایی نمونه در خلیج فارس با توجه به داده‌های آماری موجود محاسبه شده. در روش اول عدم قطعیتهای مختلف به صورت ضریب بزرگنمایی C_f در محاسبات شرکت داده شده‌اند و در روش دوم ضرایب عدم قطعیت به صورت مستقیم در هر مورد اثر داده شده است. نتایج زیر با توجه به محاسبات انجام شده قابل ارائه هستند.

با توجه به اینکه در این روشها عدم قطعیت‌های مختلف در بارگذاری و تحلیل بصورت آماری مد نظر قرار می‌گیرد، درک بهتری از شرایط سازه و رفتار حدی آن وجود خواهد داشت. ضمناً این روش برای ارزیابی سکوهای موجود در مقابل بارهای جانبی قابل کاربرد است.

به طور کلی روش توصیه‌نامه DNV، منجر به جوابهای محافظه‌کارانه تری نسبت به روش کرنل و همکاران می‌شود. در روش کرنل و همکاران نرخ افزایش احتمال گسیختگی در برابر افزایش ضریب تغییرات بارگذاری به صورت غیر خطی افزایش پیدا می‌کند، حال آنکه این نرخ افزایش در روش DNV به صورت خطی است. ضمن اینکه برای جهت‌هایی که احتمال گسیختگی محاسبه شده به صورت فاحشی بیشتر از سایر جهت‌ها است، نرخ افزایش احتمال گسیختگی نیز بالاتر از نرخ افزایش احتمال گسیختگی در سایر جهت‌ها می‌باشد. این امر در هر دو روش مشاهده می‌شود.

مراجع

1- Sigurdsson G., Skallerud B., Skjong R., Dalane J.I. and Amdahl J. (1992). "Probabilistic Collapse Analysis of Jackets." DNV-Research Report No. 92-2045, Hevik, Norway.

2- L. Manuel, D.G. Schmucker, C.A. Cornell, J.E. Carballo,(1998). "A reliability-based design format for jacket platforms under wave loads". Marine structures 11 (1998) 413-428.

3- DnV, (1996). "Guidline For Offshore Structural Reliability Analysis: Application To Jacket Platforms". Det norske Veritas, Report No 95-3203.

4- Robert.M. Sorensen, (1997). "Basic Coastal Engineering". Lehigh university.

5- Forristall, G.Z. (1978); "On the Statistical Distribution of Wave Height in a Storm", Journal of Geophysical Research, Vol. 83, No 1978.

6- API-RP2A 21th ed. December 2000. "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", American Petroleum Institute (RP 2A-WSD).

7- N.D. Bartlop, A.J. Adams, (1991). "Dynamics of Fixed Marine Structures. Third edition" Atkins Oil & Gas Engineering Limited, Epsom, UK.

8- SACS Executive, Version 5.1.06.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.2.3]