

کاربرد روش تحلیل زمان دوام در طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی در مقابل نیروی امواج تصادفی

حمید متین‌نیکو* (کارشناس ارشد)

مصطفی زین‌الدینی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

همایون استکانچی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

سیده‌هدی اندرامی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (پیا ۱۳۹۳)
دربی ۲-۳، شماری ۱/۱، ص. ۱۸۸-۱۸۹، (یادداشت فنی)

در این نوشتار، روشی نوین با عنوان تحلیل موج دوام (EWA)^۱ و کاربرد آن در تحلیل، طراحی و ارزیابی سکوهای دریایی در برابر نیروی امواج تصادفی دریا معرفی شده است. این روش برگرفته از رویکرد تحلیل زمان دوام (ETA)^۲ است که در مطالعات لرزه‌یی ساختمان‌ها مورد استفاده می‌گیرد. در روش تحلیل موج دوام (EWA)، سازه در معرض توابع قطار موج افزایشی از پیش طراحی‌شده، که به نحو مناسبی با شرایط امواج ساختمانی دارند، قرار می‌گیرد. با شروع تحلیل، مقادیر شاخص خرابی از مرحله‌ی رفتار کشسان تا مرحله‌ی واژگونی کامل سازه، مستقیماً برحسب پارامتر زمان (و ارتفاع موج متناظر با آن) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این نوشتار با ساخت ۵ نمونه قطار موج افزایشی تصادفی و اعمال آنها به دو سکوی دریایی نوع جاکت، مفهوم روش تحلیل موج دوام به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: سازه‌های دریایی، امواج تصادفی نامنظم، توابع قطار موج افزایشی، روش تحلیل موج دوام، ارتفاع موج دوام، تحلیل زمان دوام.

۱. مقدمه

در خشکی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله قبلاً استفاده شده است. نتایج مطالعات انجام‌شده در برخی پژوهش‌ها، کارآمدی و دقت این روش در ارزیابی رفتار سازه‌ها در برابر نیروی رانش زمین‌لرزه را بیش از پیش نمایان می‌کند.^[۳-۶]

اگرچه مبانی اساسی تحلیل و مطالعه‌ی سازه‌ها در برابر نیروهای زمین‌لرزه و امواج تا حدودی مشابه و نزدیک به هم هستند، با وجود این، تفاوت‌های شایان ذکری نیز وجود دارد. اولاً، مدت زمان بیشینه‌ی قابل اهمیت رخداد زمین‌لرزه‌های معمول بین ۵ تا ۱۵ ثانیه است، در حالی که بار امواج را می‌توان یک نیروی محیطی تقریباً ثابت در نظر گرفت، که در طول عمر بهره‌برداری دائماً به سازه اعمال می‌شود. ثانیاً، تحریکات زمین‌لرزه حالتی قریب‌الوقوع و ناگهانی خواهد داشت که در مدت زمان کوتاهی به بیشینه‌ی مقدار توان خود خواهد رسید. در مقابل، روند پیدایش و توسعه‌ی یک وضعیت دریایی^۴ شدیداً طوفانی (بحرانی) -وضعیت دریایی عامل خرابی- فرآیندی با نرخ تدریجی و بلندمدت خواهد بود.

در این نوشتار با الهام از روش تحلیل زمان دوام (ETA)، روشی با عنوان تحلیل موج دوام (EWA) به‌منظور تحلیل، طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی در برابر تحریکات تصادفی ناشی از نیروی امواج معرفی می‌شود. لازمه‌ی اساسی این هدف، تولید توابع قطار موج افزایشی کالیبره‌شده و متناسب با طیف امواج محل است. در

بارهای محیطی شامل بار امواج و بارهای واردشده در مراحل مختلف ساخت، حمل و نصب سکوهای دریایی نقش غالب را دارند.^[۱،۲] نیروی حاصل از برخورد امواج به سازه، ماهیت دینامیکی دارد. با افزایش عمق آب و انعطاف‌پذیر شدن رفتار سیستم، تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی ضرورت یافته است و عموماً به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت، انجام تحلیل دینامیکی برای تمامی سکوهای دریایی الزامی خواهد بود.

از سوی دیگر، یکی از روش‌های نوین ارزیابی سازه‌ها در برابر تحریکات دینامیکی زلزله، روش زمان دوام (ETA) است.^[۳] این روش نوعی تحلیل تاریخی‌ی زمانی است که طیف پاسخ حاصل از آن، در زمان‌های مشخص (زمان‌های هدف)، برابر با طیف طرح متناظر با سطح خطر مورد نظر خواهد بود.^[۴] در روش تحلیل زمان دوام، سازه در معرض توابع شتاب فزاینده‌ی مصنوعی قرار می‌گیرد و در طول تحلیل، مقادیر شاخص خرابی و یا هر پارامتر نیاز مهندسی (EDP)^۵ دیگر را می‌توان بر حسب متغیر زمان مورد مطالعه قرار داد. روش زمان دوام برای سازه‌های مستقر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۰/۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۱۹، پذیرش ۱۳۹۱/۵/۷.

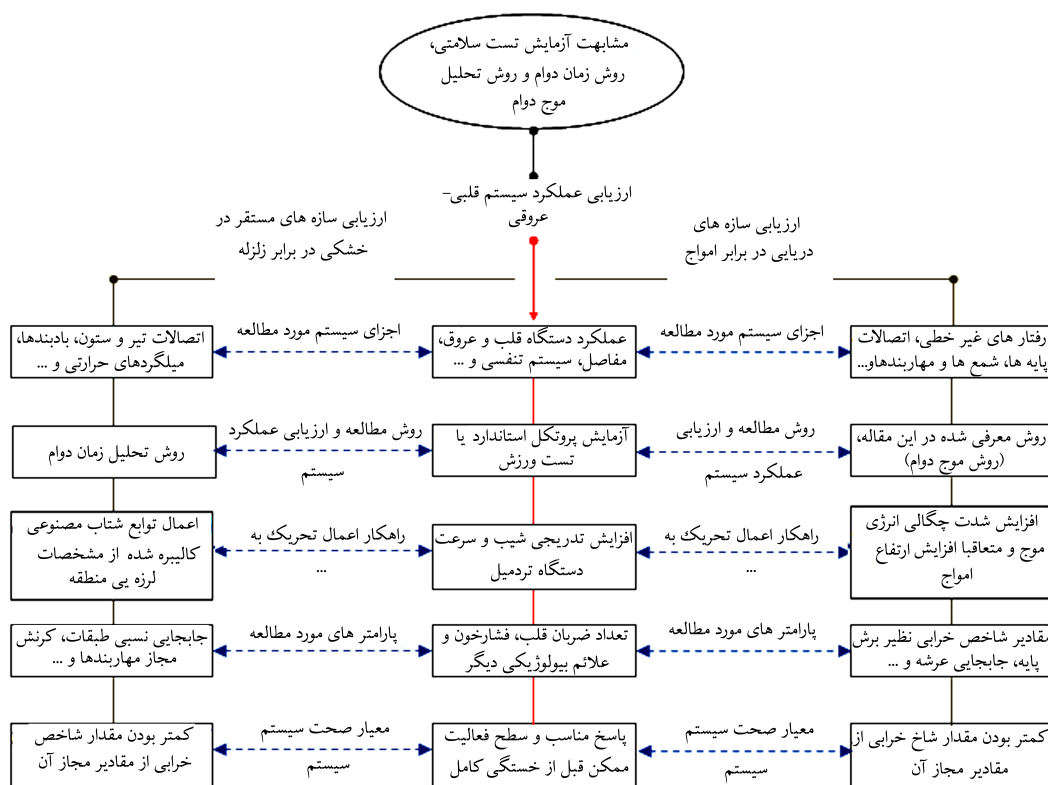
matinnikoo@alumni.com
zeinoddini@kntu.ac.ir
stkanchi@sharif.edu
s.m.enderami@gmail.com

در روش موج دوام (EWA)، پس از مطالعه‌ی مقدماتی در مورد شرایط دریایی و مشخصات طیفی امواج ساختمانه، سازه‌ی مورد نظر تحت یک تابع قطار موج افزایشی^{۱۰} قرار می‌گیرد و فقط با انجام یک تحلیل، رفتار سازه از مرحله‌ی کاملاً خطی تا واژگونی کامل بررسی می‌شود. در این روش از هر پارامتر دلخواهی می‌توان به عنوان معیار هدف استفاده کرد و به کمک آن می‌توان سطوح مختلف عملکردی سازه‌های دریایی را مورد تحقیق قرار داد. شایان ذکر است ارزیابی سازه برای سطوح عملکردی و شاخص‌های خرابی مختلف در روش آنالیز طیفی نیز قابل انجام است، که اولاً یک تحلیل خطی است و ثانیاً نیازمند تعداد زیادی انجام تحلیل است. این نقایص در روش EWA مرتفع می‌شود. مفهوم دقیق‌تر را می‌توان با یک آزمایش فرضی ساده توضیح داد. سه سکوی نمونه‌ی فرضی نوع جاکت با مقاومت جانبی و مشخصات هندسی و دینامیکی نامشخص در برابر یک نیمرخ موج افزایشی قرار می‌گیرند (شکل ۲). ابتدا طیف چگالی انرژی امواج ضعیف و متعاقباً ارتفاع قطار امواج تصادفی کوتاه خواهد بود و هر سه سازه در مقابل آن پایداری دارند (شکل ۲الف). با گذشت زمان و افزایش شدت چگالی امواج، دامنه‌ی قطار موج افزایش می‌یابد و در برابر موجی با ارتفاع مثلاً $H = 14 \text{ m}$ مقادیر حدی در سازه‌ی ۲ از حد مجاز بیشتر می‌شود و برخی از اعضا وارد ناحیه‌ی غیرکشیان می‌شوند و بنابراین معیار خدمت‌پذیری سکوی ۲ بیشتر از حد مجاز خواهد بود. این در حالی است که این مقدار در سازه‌های ۱ و ۳ همچنان پائین‌تر از حد مجاز است (شکل ۲ب). به همین ترتیب با شدیدتر شدن وضعیت دریایی، در ارتفاع موج مثلاً $H = 18 \text{ m}$ در سکوی ۲ پدیده‌ی فروریزش اتفاق می‌افتد و سازه پایداری خود را به طور کامل از دست می‌دهد؛ در حالی که در سکوی ۳، فقط مقادیر شاخص خرابی از حد مجاز فراتر رفته و سکوی ۱ نیز پایداری خود را همچنان حفظ کرده است (شکل ۲ج).

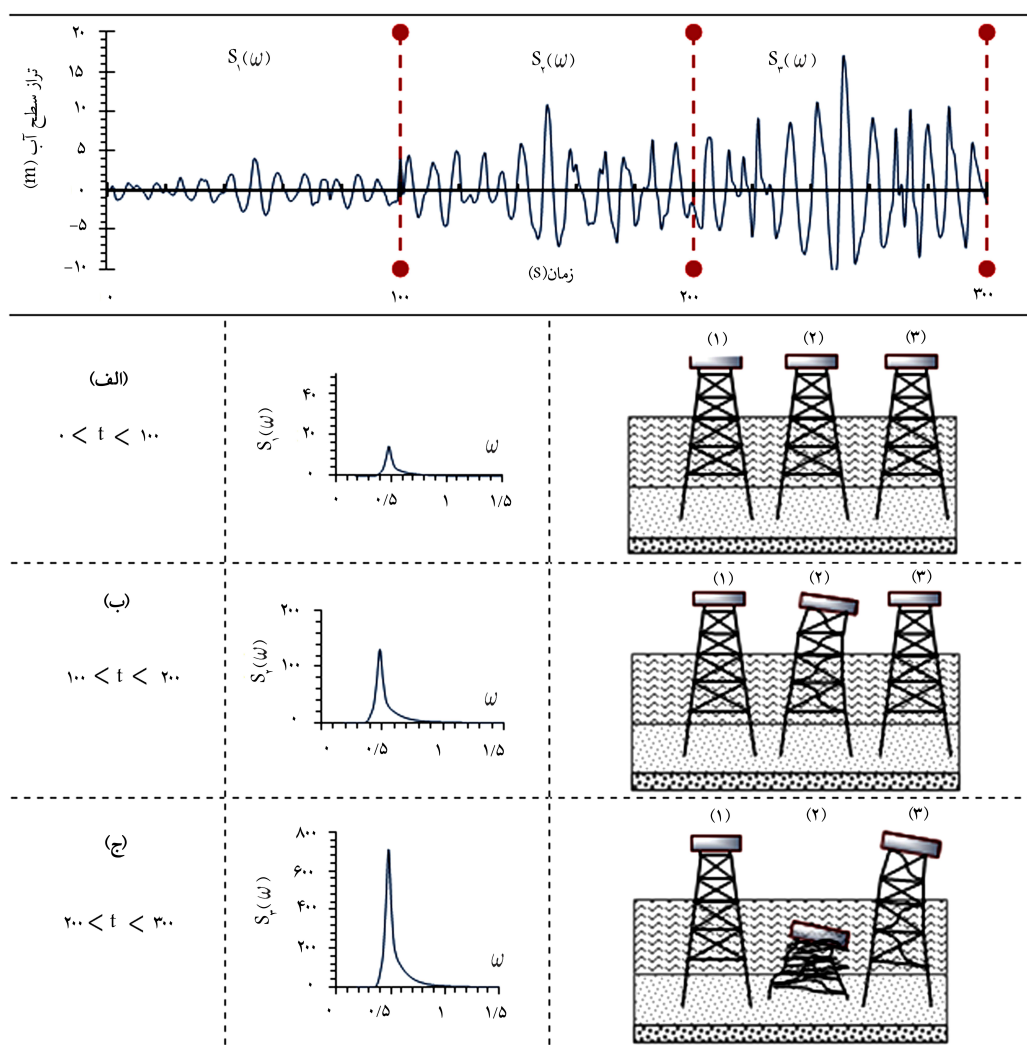
توابع قطار موج افزایشی تولید شده هر زمان مشخص می‌تواند منطبق با ارتفاع امواج تراز سطح طراحی^۵ و حد نهایی^۶ باشد. به کمک موج تراز طراحی، اعضای سازه‌ی طراحی می‌شوند و تنش‌های به وجود آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی مقایسه و از موج تراز حد نهایی نیز برای کنترل مقاومت نهایی و فروریزش سازه استفاده می‌شود.^[۱] شایان ذکر است که روش مرسوم برای ارزیابی سکوهایی دریایی در برابر بار امواج حدی، تحلیل بارافزون^۷ است. در نظر گرفتن پدیده‌ی موج بر عرشه^۸، بزرگ‌تر بودن حدود دوره‌ی بازگشت امواج عامل خرابی از مقدار ۱۰۰ ساله و پنهان ماندن رفتار سازه در مقابل سطوح مختلف خطر موج از عمده‌ترین کمبودهای روش بارافزون است.^[۸،۷] همچنین در این تحلیل اثرات دینامیکی شامل محتوای بسامدی و مدت زمان بار اعمالی چشم‌پوشی می‌شود.

۲. مفهوم روش تحلیل موج دوام

روش معرفی شده در این تحقیق (روش EWA) تا حدودی مشابه با تحلیل زمان دوام (ETA) است که اخیراً به عنوان رویکردی کارآمد در پژوهش‌های لرزه‌یی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش زمان دوام نیز الهام گرفته از آزمونی به نام پروتکل استاندارد (تست ورزش)^۹ است که در ارزیابی صحت و سلامتی سیستم قلبی-عروقی بدن انسان به کار گرفته می‌شود.^[۹] در واقع، یکی از پیچیده‌ترین سیستم‌های شناخته شده در طبیعت، سیستم قلبی-عروقی بدن انسان است. با وجود این، عملکرد همین سیستم بسیار پیچیده و ناشناخته با آزمون ساده‌ی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۱، تا حدودی مشابهت‌های تست ورزش، روش تحلیل زمان دوام (ETA) و روش معرفی شده در این نوشتار تحلیل موج دوام (EWA) را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقایسه‌ی آزمایش تست ورزش، روش تحلیل زمان دوام، و تحلیل موج دوام.



شکل ۲. قرارگیری سیستم‌های سازه‌یی در برابر توابع قطار موج افزایشی و مفهوم روش تحلیل موج دوام.

و با شدت بارگذاری به حدی باشد که سازه بلافاصله وارد ناحیه‌ی غیرخطی شود و بنابراین رفتار آن در ناحیه‌ی کشسان پنهان بماند.

۳. تولید توابع قطار موج افزایشی

مهم‌ترین عامل موفقیت در کارآمدی و مقبولیت روش تحلیل موج دوام (EWA)، تولید توابع قطار موج افزایشی مناسب و کالبره شده است. با توجه به اهداف مورد انتظار از انجام تحلیل مورد نظر، نوع سازه‌ی مورد مطالعه، شرایط عمق بستر آب و دقت قابل انتظار از نتایج تحلیل، هر تئوری موجی می‌تواند در مفهوم تحلیل موج دوام مورد استفاده قرار گیرد.

برای محاسبه‌ی بارامواج بر روی سکوه‌ای ثابت فلزی، کماکان تئوری‌های امواج منظم همچون استوکس مرتبه‌ی ۵ (در آب‌های عمیق) و کنوئیدال (در آب‌های کم عمق) مورد توجه پژوهشگران است.^[۱۰] در این رویکرد فرض می‌شود تمام انرژی موج در یک بسامد ثابت متمرکز شده است و بنابراین در مواردی که انجام تحلیل دینامیکی سازه ضرورت یابد، صحت نتایج مورد بحث خواهد بود. سهولت به‌کارگیری

بنابراین چنانچه ارتفاع موج تراز سطح نهایی (ارتفاع موجی برای کنترل پدیده‌ی فروریزش در سکوه‌ای دریایی مطابق آئین‌نامه‌ی API-RP۲A^[۱] برابر با ۱۸ m باشد، از میان سه سکوی نشان داده‌شده در شکل ۲، سازه‌ی ۱ بهترین طراحی را خواهد داشت.

طبق تعریف می‌توان ارتفاع موج دوام (EWH)^[۱۱] یک سکوی دریایی را به ارتفاع موجی اطلاق کرد که مقدار خرابی مشاهده‌شده در سازه تا آن ارتفاع موج، بر اساس شاخص خرابی مورد نظر (پارامتری دلخواه) کمتر از حد مجاز باشد. با این توضیح یک سازه‌ی مشخص، بنا به سطوح نیاز عملکردی مختلف می‌تواند موج دوام‌های متفاوتی داشته باشد که طبق ضوابط طراحی تعیین می‌شود.

ویژگی دیگر روش تحلیل موج دوام (EWA) نسبت به تحلیل‌های بلندمدت حوزه‌ی زمانی آن است که در این روش، رفتار سازه از ناحیه‌ی کاملاً کشسان شروع می‌شود و با افزایش تدریجی شدت دامنه‌ی بارگذاری و توسعه‌ی تغییرشکل‌ها در اجزاء سازه‌یی، رفتار سازه وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شود و این روند تا مرحله‌ی واژگونی نهایی ادامه می‌یابد. در حالی که در روش تحلیل در حوزه‌ی زمانی ممکن است سازه در مقابل یک شرایط بارگذاری خاص عملاً وارد ناحیه‌ی غیرخطی نشود

که در آن $\eta_{ICNW}(t)$ معرف تابع موج نو مقیدشده‌ی افزایشی و $k, \eta_{Rk}(t)$ امین نیمرخ ارتفاع نامنظم سطح دریاست که به صورت مجموعی از امواج سینوسی منظم در نظر گرفته شده است، مدت زمان وقوع هر یک از k تحریک موج نو مقیدشده و t_c زمان وقوع تاج موج‌های مورد نظر است. $\rho_k(t)$ تابع خودهمبستگی شرایط دریایی بر اساس رابطه‌ی ۴ است. $\dot{\rho}_k(t)$ و $\dot{\eta}_{Rk}(t)$ به ترتیب شیب تابع خودهمبستگی و شیب تراز نامنظم سطح آب در زمان وقوع تاج بیشینه هستند. λ_k از دومین ممان طیفی بر اساس رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید. عبارت $\rho_k(t), \alpha_k$ نیز بیانگر مدل موج نو در هر گام زمانی و $\eta_{Rk}(t_c)$ نیمرخ تصادفی موج در زمان وقوع تاج بیشینه‌ی مورد انتظار است:

$$\eta_{Rk}(t) = \sum_{n=1}^N C_{kn} \cos(\omega_n t + \varepsilon_{kn}) \quad (2)$$

$$C_{kn} = \sqrt{2 S_k(\omega_n) \Delta \omega} \quad (3)$$

$$\rho_k(t) = \frac{1}{\sigma_k^2} \int_0^\infty S_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4)$$

$$\lambda_k = \frac{m_{\tau k}}{\sigma_k^2}, \quad m_{\tau k} = \int_0^\infty S_k(\omega) \omega^\tau d\omega \quad (5)$$

در این روابط، $S_k(\omega)$ مقدار متناظر طیف موج در تواتر ω ، σ انحراف معیار وضعیت دریای مورد نظر، و ε_{kn} زاویه‌ی فاز تصادفی با توزیع یکنواخت بین $0 - 2\pi$ در تواتر مذکور هستند. α_k معرف ارتفاع تاج موج مورد نظر (ارتفاع دلخواه) است که در این مطالعه مقدار آن برابر βH_{Maxk} در نظر گرفته شده است (رابطه‌ی ۶). H_{Maxk} ارتفاع موج بیشینه در یک وضعیت دریایی است و از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید. [۲۱]

$$\alpha_k = \beta H_{Maxk} \quad (6)$$

$$H_{Maxk} = 0.76 \sqrt{H_{SK} \ln N} \quad (7)$$

که در این روابط، N تعداد امواج سینوسی استخراج شده از طیف امواج است. مقدار β با توجه به استفاده از طیف جان سوآپ برابر با 0.58 در نظر گرفته شده است. [۱۹] در مدل معرفی شده، ارتفاع موج هدف و طیف چگالی انرژی متناظر آن -- ارتفاع موج دلخواه -- می‌تواند در زمانی دلخواه بعد از شروع آنالیز قرار گیرد. در این پژوهش از طیف جان سوآپ به لحاظ گستردگی کاربرد آن استفاده شده است.

شکل ۳ نمونه‌ی از پروفیل موج افزایشی ساخته شده را در مقابل یک تابع شتاب مصنوعی افزایشی مورد استفاده در مطالعات لرزه‌ی (روش زمان دوام) [۲۱] نشان می‌دهد. همچنین از این شکل می‌توان ملاحظه کرد که توابع قطار موج افزایشی در بازه‌های زمانی بزرگ‌تری نسبت به توابع شتاب مصنوعی به کار گرفته شده در روش تحلیل زمان دوام زلزله، که مدت زمانی در حدود 2° ثانیه دارند، تولید شده‌اند.

دلایل این امر نیز تا حدودی مورد بحث قرار گرفته و اشاره شده است که بر خلاف تحریکات ناشی از تکان زمین، امواج دارای پتانسیل تخریب طی مدت زمان قابل توجهی شکل گرفته‌اند؛ که در ابتدا ارتفاع و چگالی انرژی کمتری داشته‌اند. به بیان دیگر، نیروی موج بحرانی در اثر یک پیشینه‌ی امواج تدریجاً رشد یافته به شرایط حدی رسیده است. از این رو، اثر یک ارتفاع مشخص در سازه باید با حضور تأثیر امواج کوتاه‌تر قبلی همراه باشد. بنابراین صحت نتایج در رویکردهای مرسوم تحلیلی و تحقیقاتی که پاسخ سازه فقط در مقابل برخورد یک موج واحد که به صورت آنی شکل گرفته است، مورد تردید خواهد بود. با توجه به موارد ذکر شده مطلوب به نظر می‌رسد که به جای در نظر گرفتن فقط یک موج آنی به وجود آمده، اثر پیشینه و سیر تکامل ارتفاع موج مورد نظر نیز وارد نتایج شود. در روش تحلیل موج دوام

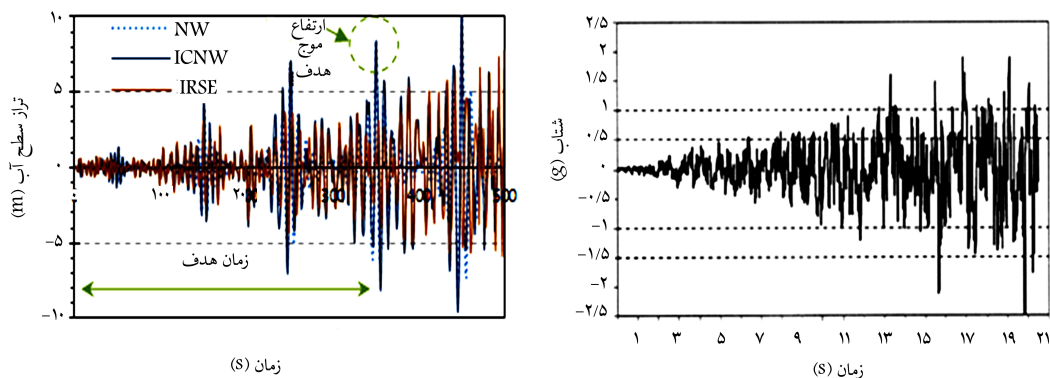
و کوتاه بودن زمان محاسبات از ویژگی‌های این روش است. در مقابل، جامع‌ترین راهکار مطالعه‌ی رفتار دینامیکی سازه‌های دریایی در مقابل نیروی امواج، به کارگیری تاریخچه‌های زمانی بلندمدت نامنظم تراز سطح آب و روش حل مستقیم معادلات حرکت در دامنه‌ی زمان است که امری زمانبر، پرهزینه، و تفسیر نتایج خروجی نیز به لحاظ حجم بالای داده‌های آن دشوار خواهد بود. بر این اساس، تعدادی تاریخچه‌ی زمانی کوتاه مدت امواج تصادفی که در برگزیده‌ی ارتفاع بیشینه‌ی مورد انتظار نیز هستند، نظیر مدل موج نو مقیدشده، توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. [۱۱-۱۳] برای تولید توابع قطار موج کالیبره شده، در این نوشتار از مدل موج نو مقیدشده [۱۲] استفاده شده است، چرا که اولاً، مدلی است مبتنی بر طیف امواج و می‌تواند معرف مناسبی از شرایط واقعی امواج طبیعت باشد. ثانیاً، از نتایج مطالعات سایر پژوهشگران در سال‌های اخیر چنین بر می‌آید که این مدل جایگزین مناسبی برای تاریخچه‌های بلندمدت تصادفی خواهد بود و استفاده از آن زمان و هزینه‌ی محاسبات را به شدت کاهش خواهد داد. [۱۳-۱۷]

۴. تولید مدل موج نو مقیدشده‌ی افزایشی

طی سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲، در پژوهشی نظریه‌ی موج شبه قطعی (QD) به دو شکل مختلف بر اساس بسط مرتبه‌ی اول استوکس، به صورت کاملاً نظری، ارائه شد. [۱۸] تئوری موج شبه قطعی بیان می‌دارد که در یک شرایط دریایی گوسی چنانچه یک ارتفاع تاج موج بیشینه (شکل اول تئوری شبه قطعی) و با یک ارتفاع موج بیشینه (شکل دوم تئوری شبه قطعی) در زمان و مکان مشخصی اتفاق بیافتد؛ پروفیل سطح آب در اطراف این پدیده‌ی بیشینه، متناسب با تابع اتوکورلیشن خواهد بود. [۱۹، ۲۰] نظریه‌ی اول موج شبه قطعی در سال ۱۹۹۱ نیز از روی نتایج آماری به دست آمد و در واقع برای نخستین بار به صورت عملی به معرفی تاریخچه‌های زمانی کوتاه مدت پرداخته شد و مدل موج نو نام گرفت. [۱۱] یک نیمرخ متفرد موج نو، نامنظم و تصادفی بودن وضعیت دریایی را لحاظ نمی‌کند؛ و بنابراین، این مدل قادر نخواهد بود چنین تأثیرات تصادفی را در سازه‌ی که تحت اثر تحریک‌های دینامیکی قرار دارد منظور کند. در صورتی که یک نیمرخ موج نو به یک نیمرخ تصادفی سطح دریا مقید شود، می‌توان یک مجموعه‌ی تاریخچه‌ی زمانی تصادفی مناسب جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی تولید کرد. با این هدف، در پژوهشی دیگر نیمرخ موج نو مقید شده (CNW) پیشنهاد شد. [۱۳]

در این پژوهش با به کارگیری تئوری نامنظم و تصادفی موج نو مقیده شده و طیف موج سازگار با موقعیت احداث سازه، نسل اول توابع قطار موج افزایشی که در آنها رشد توابع به صورت خطی است، تولید شد (رابطه‌ی ۸):

$$\eta_{ICNW}(t) = \begin{cases} \eta_{R_1}(t) + \rho_1(t)[\alpha_1 - \eta_{R_1}(t_c)] + \frac{\dot{\rho}_1(t)}{\lambda_1} \dot{\eta}_{R_1}(t_c) & 0 < t < t_d, S_1(\omega) \\ \eta_{R_2}(t) + \rho_2(t)[\alpha_2 - \eta_{R_2}(t_c)] + \frac{\dot{\rho}_2(t)}{\lambda_2} \dot{\eta}_{R_2}(t_c) & t_d < t < 2t_d, S_2(\omega) \\ \vdots & \vdots \\ \eta_{R_k}(t) + \rho_k(t)[\alpha_k - \eta_{R_k}(t_c)] + \frac{\dot{\rho}_k(t)}{\lambda_k} \dot{\eta}_{R_k}(t_c) & (k-1)t_d < t < kt_d, S_k(\omega) \end{cases} \quad (8)$$



شکل ۳. نیمرخ موج‌نو مقیدشده‌ی افزایشی جهت انجام تحلیل موج دوام (چپ) و تابع شتاب افزایشی جهت انجام تحلیل زمان دوام (راست). [۴]

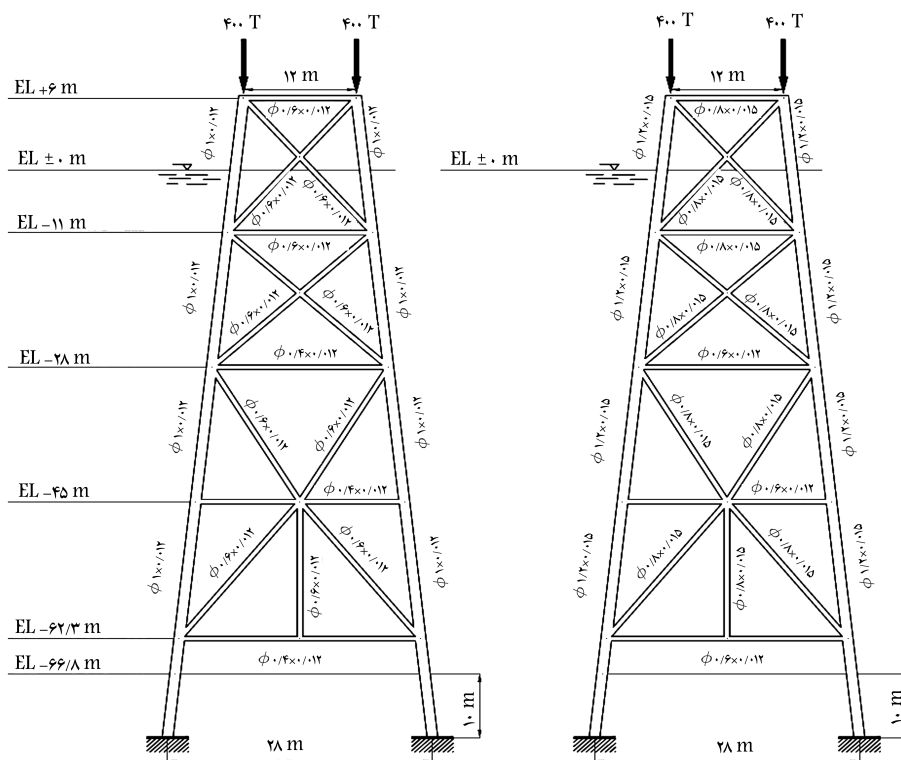
و اینرسی به ترتیب $1/5$ ، 1 و 2 و بیشینه‌ی جریان با دوره‌ی بازگشت 5° سال در سطح آب $1/24$ متر و در بستر $79/0$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جنس فولاد انتخابی بر اساس BS7191 دارای تنش تسلیم 355 و تنش نهایی 460 مگاپاسکال است.

مدل‌سازی هندسه‌ی سکوها با برنامه‌ی المان محدود ABAQUS [۲۲] و با استفاده از المان دو بعدی Beam21 و مقطع Pipe انجام شده است. مطابق رویکرد مرسوم در مطالعات سکوه‌ای دریایی نوع جاکت، [۲۳] جهت لحاظ کردن تأثیرات حضور جرم عرشه، دو بار متقارن متمرکز 400 تنی به کمک المان Mass در گره‌های عرشه توزیع شده است. نسبت میرایی نیز همانند مقدار متداول در تحلیل‌های دینامیکی برابر $0/5$ منظور شده است. برای مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه از شمع معادل با انتهای گیردار با طول حدود 8 برابر قطر شمع استفاده شد. جدول ۱، مقادیر بسامد طبیعی سکوه‌ای اشاره شده را نشان می‌دهد.

این موضوع کاملاً لحاظ شده است و می‌توان ادعا کرد این روش، طبیعت واقعی امواج را بهتر و دقیق‌تر شبیه‌سازی خواهد کرد و تقریباً اثر تمامی امواج با مشخصات فیزیکی مختلف در پاسخ سازه لحاظ خواهد شد.

۵. مثال ساده‌ی از کاربرد روش تحلیل موج دوام

در این بخش مفاهیم روش تحلیل موج دوام (EWA) بر روی دو نمونه‌ی سکوی نوع جاکت به نام‌های J2D1 و J2D2 مورد بحث قرار می‌گیرد. شرایط دریایی، ابعاد هندسی، بارهای عملیاتی، جنس مصالح، و شرایط تکیه‌گاهی برای هر دو سکوی اشاره شده یکسان است. تنها وجه تمایز سازه‌های مذکور تفاوت در مشخصات هندسی مقاطع آنهاست (شکل ۴). عمق آب $66/8$ متر، ضرایب درگ، جرم افزوده،



شکل ۴. سکوه‌ای نمونه‌ی مورد مطالعه: J2D1 (راست) و J2D2 (چپ).

جدول ۱. مقادیر دوره‌ی تناوب ارتعاش طبیعی سکوه‌های مورد مطالعه (برحسب ثانیه).

	J۲D۱	J۲D۲
مود اول	۱٫۸	۲٫۴۴
مود دوم	۰٫۴۸	۰٫۵۳
مود سوم	۰٫۳۳	۰٫۴۶

۶. نتایج

به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول، دست‌کم پنج تابع قطار موج افزایشی به عنوان تحریک ورودی به سیستم اعمال شده‌اند. در این پژوهش، این توابع با عناوین ICNW۱، ICNW۲، ICNW۳، ICNW۴ و ICNW۵ از یکدیگر متمایز شده‌اند. نتایج تحلیل موج دوام به کمک نمودارهای افزایشی با نام منحنی‌های موج دوام (EWA) نشان داده شده است. در این نمودارها محور افق معرف زمان و محور قائم در هر زمان t ، برابر بیشینه‌ی قدر مطلق مقادیر پارامتر مورد نظر در بازه‌ی زمانی ۰ تا ثانیه‌ی t است. مختصات محور قائم مطابق رابطه‌ی ۸ عبارت‌اند از:

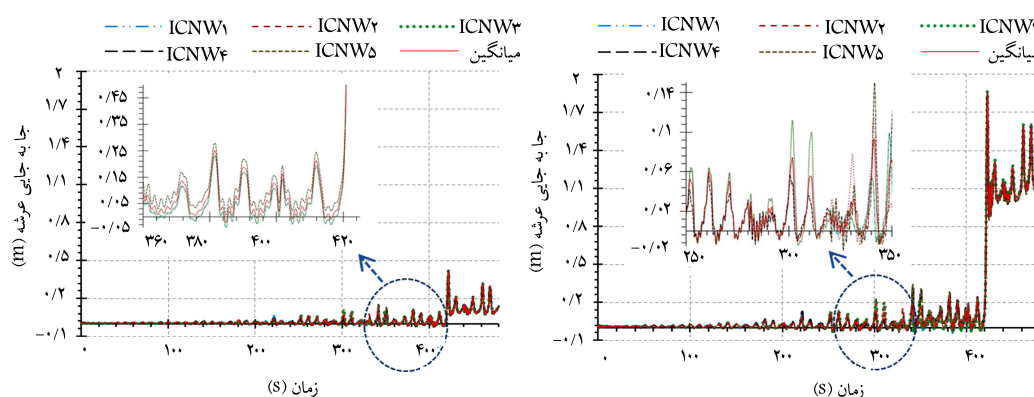
$$\Gamma(f(t)) = \text{Max}[Abs(f(\varepsilon)) : 0 < \varepsilon, t] \quad (8)$$

لازم به ذکر است که در روش تحلیل موج دوام، هر زمان مشخص t معرف یک ارتفاع موج معین H از پیش طراحی شده است. بنابراین در این روش هر یک از پارامترهای زمان و ارتفاع موج می‌تواند به عنوان شاخص و معیار قضاوت نتایج قرار گیرد.

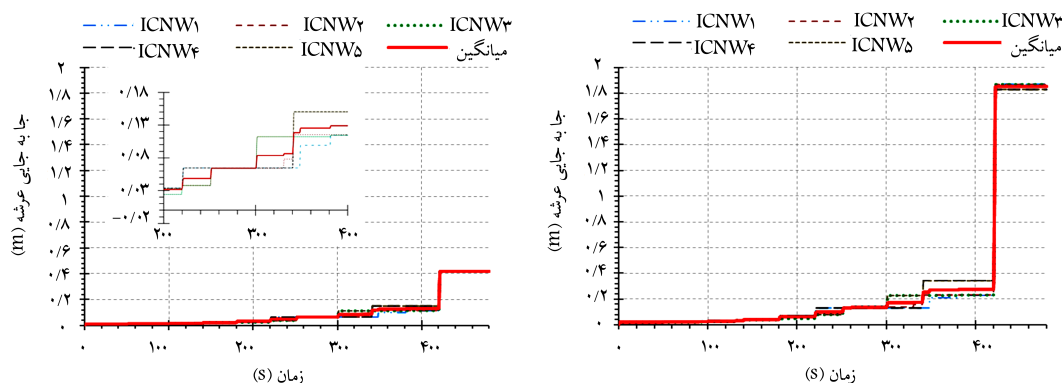
پس از انجام تحلیل موج دوام و قرارگیری سازه در مقابل توابع قطار موج افزایشی، مقادیر پاسخ مورد نظر، برای مثال تاریخیچه‌ی زمانی جابه‌جایی عرشه استخراج می‌شود. سپس در هر زمان مقدار بیشینه‌ی قدرمطلق پاسخ تا آن زمان به دست می‌آید. در نهایت بین ۵ نمودار منتج شده از ۵ تاریخیچه‌ی موج افزایشی، عمل میانگین‌گیری انجام شده و پاسخ واحد سیستم به دست خواهد آمد.

در شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب تاریخیچه‌ی زمانی پاسخ جابه‌جایی عرشه و

به منظور تولید توابع قطار موج افزایشی، چهار زیربرنامه ۱۳ به زبان فرترن ۱۴ تدوین شده است؛ که قابلیت استفاده در محیط ABAQUS/AQUA به عنوان یک برنامه‌ی افزودنی ۱۵ را خواهند داشت. هر یک از زیربرنامه‌های یادشده بر اساس یک مدل موج مشخص، شامل: مدل موج ایری، استوکس مرتبه‌ی ۲، استوکس مرتبه‌ی ۵، و مدل موج نو مقیدشده تصادفی تهیه شده‌اند. به کمک این زیربرنامه‌ها به ترتیب امکان تولید امواج منظم ایری افزایشی ۱۶، استوکس مرتبه‌ی ۲ افزایشی ۱۷، استوکس مرتبه‌ی ۵ افزایشی ۱۸، و مدل تصادفی موج نو مقیدشده افزایشی فراهم شده است. همچنین در این محیط امکان تعریف نیروهای درگ، اینرسی، شناوری، موج و باد فراهم می‌شود. در واقع زیربرنامه قادر است در هر گام محاسباتی مقادیر سرعت و شتاب ذرات را جهت استفاده در رابطه‌ی موريسون ۱۹ و نیز مقادیر فشار دینامیکی و گرادیان آن را جهت محاسبه نیروی شناوری در اختیار ماشین محاسباتی ABAQUS قرار دهد. در این نوشتار، فقط از مدل موج نو مقیدشده به دلایلی که قبلاً اشاره شد، استفاده شده است.



شکل ۵. تاریخیچه‌ی زمانی پاسخ جابه‌جایی عرشه‌ی سکوه‌های J۲D۱ (چپ) و J۲D۲ (راست).



شکل ۶. منحنی موج دوام سکوه‌های J۲D۱ (چپ) و J۲D۲ (راست).

داده شده است. ملاحظه می‌شود تا زمان حدود $t = 38^{\circ} \text{ s}$ متناظر با ارتفاع موج، $H = 13/5 \text{ m}$ ، مقادیر شتاب هر ۳ سازه تفاوت ناچیزی دارند و این اختلاف با افزایش شدت تحریک ورودی و برجسته شدن نقش مقاومتی اعضاء بیشتر خواهد شد.

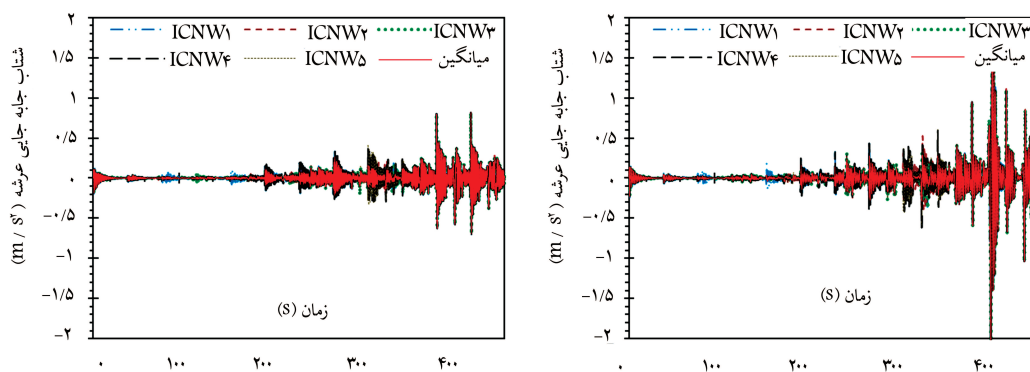
در زمان حدود $t = 42^{\circ} \text{ s}$ متناظر با ارتفاع موج $H = 15 \text{ m}$ اولین افزایش ناگهانی در مقادیر شتاب سکوی J2D2 مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی غیرخطی و تسلیم شدن اعضاء سازه‌ی خواهد بود. این افزایش ناگهانی در سکوی J2D2 به مراتب بزرگ‌تر از مقدار آن در سکوی J2D1 است و بیانگر ضعیف بودن اعضاء سازه‌ی J2D2 نسبت به سکوی J2D1 در شرایط دریایی کاملاً یکسان خواهد بود. به بیان دیگر، سازه‌ی J2D1 در شرایط دریایی یکسان مقاومت بیشتری نسبت به سازه‌ی J2D2 خواهد داشت.

به منظور مقایسه در مورد سازه‌های مورد مطالعه، منحنی میانگین پاسخ جابه‌جایی عرشه و برش پایه‌ی سکوها مذکور در شکل ۸ آمده است.

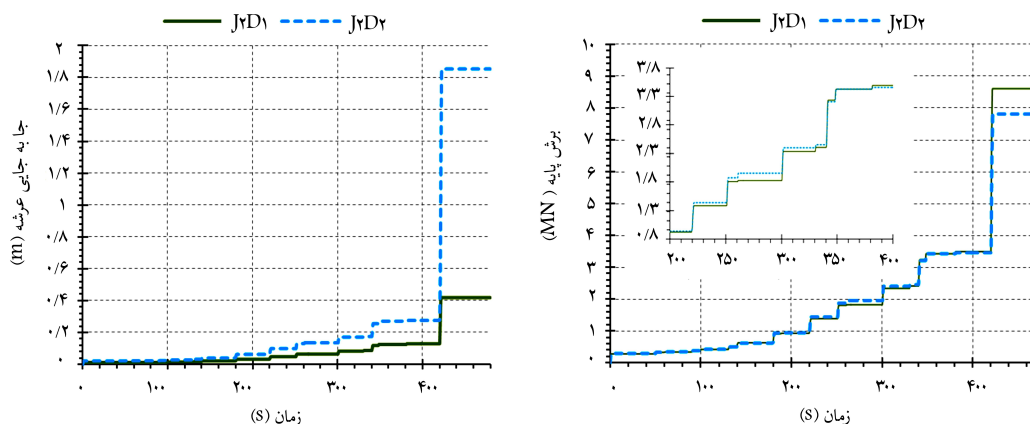
مشاهده می‌شود نرخ افزایش مقادیر جابه‌جایی عرشه در سکوی J2D1 روندی تدریجی و تقریباً یکنواختی دارد، درحالی‌که در سکوی J2D2 در زمان حدود $t = 42^{\circ} \text{ s}$ پرش قابل ملاحظه‌ی در منحنی‌های موج دوام اتفاق می‌افتد. این تغییر ناگهانی، معرف آستانه‌ی زمان تسلیم در اعضاء سیستم سازه‌ی مورد مطالعه است. این روند در مورد تاریخچه‌ی زمانی برش پایه متفاوت است. تا زمان $t = 42^{\circ} \text{ s}$ یعنی تا قبل از آستانه‌ی وقوع تغییر شکل‌های بزرگ و تشکیل نخستین مفاصل خمیری در سکوی J2D2، مقدار برش پایه در هر دو سکو تفاوت ناچیزی در مقیاس مگانیوتن خواهند داشت. در آستانه‌ی زمان $t = 42^{\circ} \text{ s}$ به دلیل جذب

مقادیر بیشینه‌ی آن برای سکوها مورد مطالعه آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر پاسخ سازه نیز نسبت به زمان روندی افزایشی خواهد داشت. می‌توان مشاهده کرد که به طور کلی مقادیر جابه‌جایی عرشه‌ی سکوی J2D2 در زمان‌های یکسان، بزرگ‌تر از مقدار متناظر آن در سکوی دیگر است و این اختلاف با افزایش زمان بیشتر می‌شود. شایان ذکر است علی‌رغم آنکه هر ۵ پروفیل موج افزایشی به عنوان تحریک ورودی بر اساس یک روند طیفی و محتوای بسامدی یکسان تولید شده‌اند، در مقادیر پاسخ دینامیکی هر یک از سازه‌ها تفاوت ناچیزی مشاهده می‌شود؛ که البته این پدیده قابل انتظار است و از مشخصه‌های اساسی تحلیل‌های دینامیکی در مقابل تحریک‌های تصادفی به شمار می‌آید. بر همین اساس نیز به منظور دستیابی به نتایج دقیق، انجام تعداد زیادی شبیه‌سازی ۳ ساعته از پروفیل تصادفی و نامنظم سطح آب توصیه شده است.^[۱۰]

ویژگی دیگر روش تحلیل موج دوام در صورت به‌کارگیری مدل موج نو مقید شده، عدم نیاز به انجام این تعداد آنالیز و در نتیجه کاهش قابل توجه زمان و هزینه محاسبات خواهد بود. زیرا با مقید کردن هر وضعیت دریایی نامنظم به یک ارتفاع موج بیشینه ممکن برای آن شرایط دریایی (رابطه‌ی ۷)، علاوه بر لحاظ شدن تأثیر تحریک‌های ضعیف‌تر یا امواج با ارتفاع‌های کوچک‌تر و بسامدهای متفاوت، شاهد حضور اثر ارتفاع موج غالب مورد نظر نیز خواهیم بود. اثر این پدیده غالب با تغییر بخش تصادفی و نامنظم سطح آب دستخوش تغییرات کمتری نسبت به رویکرد استفاده از تعداد زیادی شبیه‌سازی بلندمدت تصادفی خواهد شد. در شکل ۷، تاریخچه‌ی زمانی شتاب جابه‌جایی سکوها مورد مطالعه نمایش



شکل ۷. مقادیر شتاب جابه‌جایی عرشه‌ی سکوها J2D1 (چپ) و J2D2 (راست) در مقابل توابع قطار موج افزایشی.



شکل ۸. منحنی موج دوام سکوها J2D1 و J2D2 بر اساس جابه‌جایی عرشه (چپ) و برش پایه (راست).

مقدار 10^6 ساله، پنهان ماندن رفتار سازه در مقابل سطح خطر موج و در نظر گرفتن اثرات دینامیکی شامل محتوای بسامدی و مدت زمان بار اعمالی از عمده ترین نقایص روش بارافزون است. بنابراین، نتایج حاصل از تحلیل بارافزون سکوها در برابری در برابر امواج به نتایج دور از واقعیت منجر خواهد شد.^[۲۷]

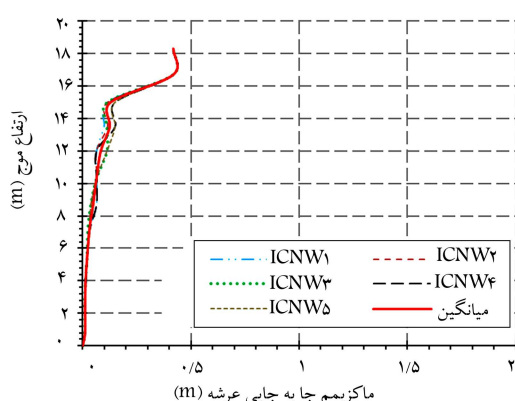
زمان دقیق وقوع تخطی از شاخص دلخواه (در اینجا حد CP)^[۲۴] به کمک شکل ۱۱ قابل تعیین خواهد بود. در زمان $t = 42^s$ اتلاف انرژی مشهودی در اثر خمیری شدن اعضاء در سازه J2D2 مشاهده می شود؛ در مقابل، این مقدار در سازه J2D1 تقریباً $\frac{1}{5}$ سازهی ضعیف تر است. از نگاه دیگر، زمان دوام سکوی J2D2 در وضعیت دریایی مفروض در این نوشتار، برابر با $t_E = s$ است؛ که معادل زمان وقوع ارتفاع موج دوام 15 m EWH است (شکل ۱۱).

روش تحلیل موج دوام توانایی شناسایی اعضاء ضعیف و معرفی دقیق مودهای خرابی با وقوع اولین گسیختگی تا مرحله ی فروریزش نهایی را خواهد داشت. در نهایت، چنانچه ارتفاع موج تراز حد نهایی محل احداث این دو سکوی فرضی برابر با 16 m باشد، می توان چنین بیان داشت که سازهی J2D2 نخواهد توانست معیار پایداری لازم در برابر سطح عملکرد CP را در شرایط دریایی مورد نظر تأمین کند. در مقابل، سکوی J2D1 در همان شرایط دریایی طراحی مناسبی محسوب خواهد شد. توجه شود که در این نوشتار سطح عملکردی CP^[۲۴] مد نظر قرار گرفته است. روش تحلیل موج دوام قادر خواهد بود سطوح عملکردی و شاخص های خرابی مختلفی که در آئین نامه ها مطرح شده اند، را مورد ارزیابی قرار دهد.

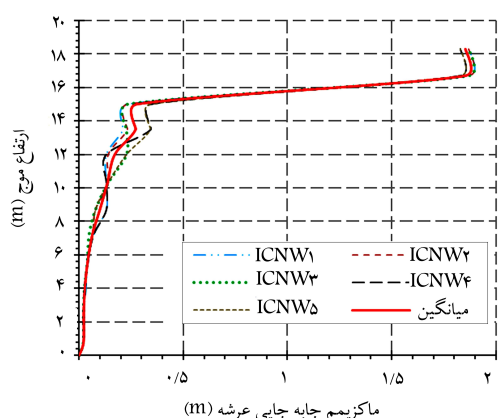
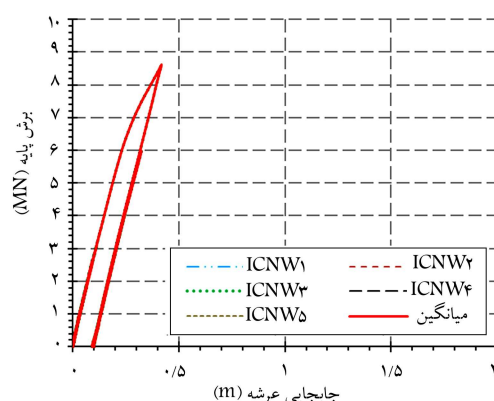
انرژی ورودی به سیستم در اثر تشکیل مفاصل خمیری مقدار برش پایه در سکوی J2D2 به مراتب کمتر از مقدار متناظر در سکوی J2D1 است. بنابراین همان طور که می توان دید در روش موج دوام با انجام یک آنالیز نسبتاً ساده، شناخت جامعی از کلیت رفتار سیستم های سازه ی پیچیده در مقابل پدیده ی ذاتاً تصادفی و ناشناخته (موج) در اختیار قرار خواهد گرفت و بر اساس آن می توان طیف گسترده یی از نیازهای طراحی و ارزیابی سازه ها در برابر نیروی موج را تأمین کرد. برای مثال به کمک روش موج دوام می توان مفاهیم طراحی بر اساس عملکرد را مشابه آنچه در علوم طراحی لرزه یی ساختمان ها وجود دارد، به حوزه ی مسائل مرتبط با نیروی موج بسط داد و به معرفی حدود و شاخص های خرابی مختلف نظیر IO، LS و CP^[۲۴] برای سازه های دریایی پرداخت.

شایان ذکر است که در این نوشتار حد CP مورد بررسی قرار گرفته است. حد CP برای سکوها دریایی نوع جاکت، متناظر با نقطه یی است که شیب آن در منحنی جابه جایی نیرو، برابر 20% شیب بخش کشسان منحنی باشد.^[۷] شکل های ۹ و ۱۰، منحنی ظرفیت به دست آمده از آنالیز موج دوام را برای سکوها مورد مطالعه نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی مربوط به سازهی J2D2 دارای یک بخش کاملاً افقی است که معرف وقوع تسلیم اعضاء است، در حالی که این پدیده برای سکوی J2D1 مشاهده نمی شود.

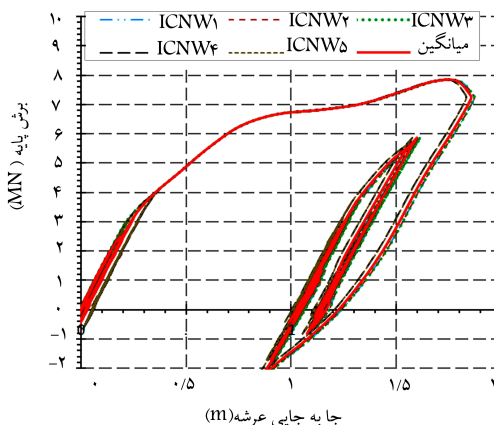
چنان که مشاهده می شود، منحنی های ظرفیت نشان داده شده در شکل ۱۰، مشابه منحنی های مرسوم بارافزون (پوش آور) است. یادآور می شود که در نظر گرفتن پدیده ی موج بر عرشه، بزرگ تر بودن حدود دوره ی بازگشت امواج عامل خرابی از



شکل ۹. منحنی ظرفیت سکوی J2D1 بر حسب ارتفاع موج (چپ) و برش پایه (راست).



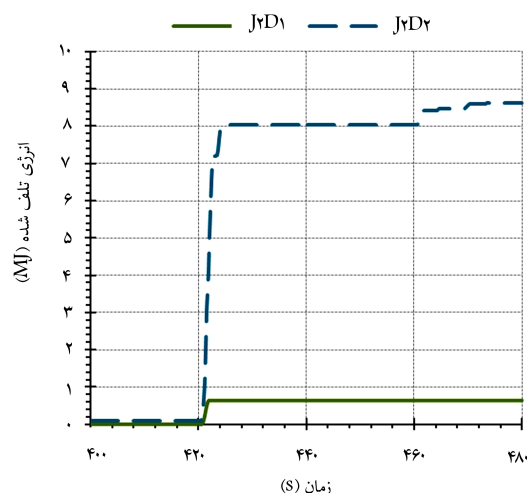
شکل ۱۰. منحنی ظرفیت سکوی J2D2 بر حسب ارتفاع موج (چپ) و برش پایه (راست).



این روش، سازه در معرض توابع قطار موج افزایشی کالیبره شده قرار گرفته و مقادیر شاخص خرابی متناظر با سطوح عملکردی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور تولید تاریخچه های زمانی کوتاه مدت افزایشی، از مدل موج نو مقید شده بهره گرفته شد و پروفیلی به نام موج نو مقید شده ی افزایشی معرفی شد. قضاوت در مورد تأیید و یا عدم پذیرش معیارهای طراحی سازه به کمک پارامترهای زمان دوام و ارتفاع موج دوام قابل بیان خواهد بود. موج دوام یک سازه به آستانه ی ارتفاع موجی اطلاق می شود که به ازاء آن مقادیر پاسخ حدی سازه از مقادیر مجاز تخطی کند.

از روش تحلیل موج دوام هم در طراحی سکوها ی جدید و هم ارزیابی سکوها ی موجود می توان استفاده کرد. در این تحقیق مفاهیم بنیادی روش موج دوام بر روی سکوها ی نوع جاکت مورد مطالعه قرار گرفت. با اعمال پنج تاریخچه ی زمانی افزایشی به سازه و میانگین گیری از نتایج، منحنی های موج دوام و زمان دوام مورد سیستم سازه یی استخراج شد.

ورود مفاهیم طیفی و در نظر گرفتن تأثیر امواج با بسامدها و ارتفاع های مختلف، لحاظ کردن تأثیرات تصادفی بودن امواج، در نظر گرفتن شرایط حدی حاکم بر وضعیت دریایی مورد نظر، کوتاه بودن تاریخچه های زمانی تولید شده نسبت به شبیه سازی های بلند مدت و در نتیجه کاهش زمان و هزینه ی محاسبات، ارزیابی دقیق کامل رفتار سکو در برابر نیروی ذاتاً پیچیده ی موج از مرحله ی خطی تا فروریزش نهایی با انجام یک تحلیل نسبتاً ساده، حضور اثر پدیده ی موج بر عرشه در نتایج، متغیر پذیری روش در مطالعه ی پارامترهای دلخواه در حین انجام تحلیل، از ویژگی های روش موج دوام است.



شکل ۱۱. منحنی اتلاف انرژی ناشی از خمیری شدن رفتار سیستم برای سکوها ی مورد مطالعه.

۷. نتیجه گیری

در این پژوهش، روش جدیدی با عنوان تحلیل موج دوام به منظور تحلیل، طراحی، و ارزیابی سازه های دریایی -- اعم از ساحلی و فراساحلی -- معرفی شده است. در

پانویس ها

1. endurance wave analysis (EWA)
2. endurance time method (ETA)
3. engineering demand parameter (EDP)
4. sea state
5. design level wave
6. ultimate level wave
7. push-over
8. wave-in-deck
9. exercise test
10. intensifying wave train function (IWTF)
11. endurance weight height (EWH)
12. constrained new wave (CNW)
13. subroutine
14. fortran
15. add-in program
16. intensifying airy wave (IAW)
17. intensifying second-order stokes wave (ISSW)
18. intensifying fifth-order stokes wave (IFSW)
19. Morison equation

منابع (References)

1. Zeinoddini, M., "Design and the performance of fixed offshore platform". Iranian National Oceanology Institute, (In Persain) (2006).

2. American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*, API-RP2A, Washington DC, 21th Edition (2000).
3. Estekanchi, H.E., Vafai, A. and Sadeghazar, M. "Endurance time method for seismic analysis and design of structures", *Journal of Scientica Iranica*, **11**(4), pp. 361-370 (2004).
4. Estekanchi, H., Kianfar, E., Vafai, A., "Application of damage indexes in non-linear analysis of steel frames by endurance time method", *Sharif Journal of science and technology*, **33** pp.13-21 (In Persain) (2006).
5. Valamanesh, V., Estekanchi, H., and vafai, A., "investigation of endurance time method in seismic Analysis of two dimensional steel frames as compared to static method", *Sharif Journal of science and Technology*, **35** pp.47-66 (In Persain)(2006).
6. Estekanchi, H.E., Riahi, H.T. and Vafai, A. "Application of endurance time method in seismic assessment of steel frames", *Journal of Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2535-2546 (2011).
7. Golafshani, A.A., Bagheri, V., Ebrahimian, H. and Holmas T. "Incremental wave analysis and its application to performance-based assessment of jacket platforms", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(10), pp. 1649-1657 (2011).

8. Golafshani, A.A., Bagheri, V., Ebrahimian, H. and Holmas T. "Assessment of offshore platforms under extreme waves by probabilistic incremental wave analysis", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(5), pp. 759-769 (2011).
9. Stewart, R.A., Kittelson, J. and Kay, I.P. "Statistical methods to improve the precision of the treadmill exercise test", *Journal of American College of Cardiology*, **36**(4), pp. 1274-1279 (2000).
10. DNV-RP-C205., *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas (2007).
11. Tromans, P.S., Anaturk, A.R. and Hagemeyer, P. "A new model for the kinematics of large ocean waves-application as a design wave", *Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference*, **3**, pp. 64-71 (1991).
12. Friis-Hansen, P. and Nielsen L.P. "On the new wave model for the kinematics of large ocean waves", *Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **1**, pp. 17-24 (1995).
13. Taylor, P.H., Jonathan, P. and Harland, L.A. "Time domain simulation of jack-up dynamics with extremes of a Gaussian process", *Journal of Vibration and Acoustics*, **119**(4), pp. 624-628 (1997).
14. Cassidy, M.J., Taylor, R.E. and Houlsby, G.T. "Analysis of jack-up units using a constrained new wave methodology", *Journal of Applied Ocean Research*, **23**(4), pp. 221-234 (2001).
15. Cassidy, M.J., Taylor, P.H., Taylor, R.E. and Houlsby, G.T. "Evaluation of long-term extreme response statistics of jack-up platforms", *Journal of Applied Ocean Engineering*, **29**(13), pp. 1603-1631 (2002).
16. Romolo, A., Malara, G., Barbaro, G. and Arena, F. "An analytical approach for the calculation of random wave forces on submerged tunnels", *Journal of Applied Ocean Research*, **31**(1), pp. 31-36 (2009).
17. Enderami, S.M., Zeinoddini, M., Shabakhty, N. and Ameryoun, H. "Dynamic non-linear analysis of offshore jacket type platform under extreme wave loads", *Proceeding of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE (2010).
18. Boccotti, P. "Wave mechanics for ocean engineering", *Elsevier Oceanography Series*, **64**, pp.281-306 (2000).
19. Arena, F. and Fedele, F. "Non-linear space-time evolution of wave groups with a high crest", *Journal of Offshore Mechanics and Ocean Engineering*, **127**(1), pp. 46-51 (2005).
20. Arena, F., Ascanelli, A., Nava, V., Pavone, D. and Romolo, A. "Three-dimensional nonlinear random wave groups in intermediate water depth", *Journal of Coastal Engineering*, **55**(12), pp. 1052-1061 (2008).
21. Sorensen, R.M., *Basic Coastal Engineering*, Springer (2006).
22. SIMULIA, ABAQUS Theory Manuals v.6.10, Dassault Systèmes, Realistic Simulation, Providence, RI, USA (2010).
23. Elshafey, A.A., Haddara, M.R. and Marzouk, H. "Dynamic response of offshore jacket structures under random loads", *Journal of Marine Structures*, **22**(3), pp. 504-521 (2009).
24. FEMA-350., *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, Washington D.C., Federal Emergency Management Agency (2000).