

## تحلیل حساسیت پاسخ سازه‌های ثابت دریایی به پارامترهای نیروی امواج با استفاده از تئوری موج نو

میلاذ شاکرمی<sup>۱</sup>، احمد شانه ساز زاده<sup>۲</sup>، ناصر شایبختی<sup>۳</sup>

a.shanehsazzadeh @eng.ui.ac.ir

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه اصفهان
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در این پژوهش تحلیل حساسیت پاسخ‌های سازه‌های ثابت دریایی شامل جابجایی حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی به پارامترهای موثر و توام با عدم قطعیت در نیروی امواج شامل ضریب درگ، ضریب اینرسی و ارتفاع موج مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور دو هندسه ساده شامل سکوی تک پایه و سکوی چهار پایه مورد بررسی قرار گرفته شده است. سینماتیک امواج به روش تئوری موج نو استخراج شده و با استفاده از معادله موریسون سری زمانی نیروها محاسبه و با اعمال این نیروها بر روی سازه و انجام تحلیل دینامیکی پاسخ‌های سازه بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به صورت عمومی در مقایسه با حساسیت پاسخ‌های سازه به ضرایب درگ و اینرسی، پاسخ‌های سازه حساسیت بیشتری به تغییر ارتفاع موج دارند. هم چنین نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم روابط ذاتاً غیر خطی بین پاسخ‌های سازه‌ها و پارامترهای نیروی امواج، درصد انحراف تغییرات پاسخ سازه‌ها به پارامترهای ضریب درگ، ضریب اینرسی و ارتفاع موج از برون یابی خطی کمتر از ۳٪ بوده و قابل صرف نظر کردن است.

واژگان کلیدی: سازه‌های ثابت دریایی، تئوری موج نو، امواج تصادفی نا منظم، تحلیل حساسیت، ANSYS.

تاریخ دریافت مقاله :	۹۸/۰۱/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله :	۹۸/۱۰/۰۱

۱- مقدمه

به علت ماهیت تصادفی و نامنظم دریا، تخمین ارتفاع امواج با عدم قطعیت ذاتی همراه است. عدم قطعیت در تخمین ارتفاع موج و متعاقب آن نیروهای وارد بر سازه باعث عدم اطمینان در طراحی اعضای سازه‌های دریایی می‌شود. همچنین ضرابی که برای تعیین نیروهای درگ و اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز همواره از عدم قطعیت برخوردار هستند. هنگامی که پارامترهای موجود در مساله زیاد و به همراه عدم قطعیت در مقادیر باشند، تحلیل حساسیت اهمیت زیادی پیدا می‌کند [۱]. با استفاده از تحلیل حساسیت و تعیین دامنه‌های تغییر پارامترهای موثر با استفاده از توزیع‌های احتمالی و آماری تاثیر این پارامترها در تعیین پاسخ‌های سازه تعیین می‌شود تا طراحی با اطمینان هر چه بیشتر انجام شود [۲-۴].

از دیر باز تئوری‌های امواج منظم از قبیل ایری و استوکس جهت تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی استفاده می‌شوند [۶و۵] با این وجود، از آنجا که امواج دریا ماهیتی نامنظم و تصادفی دارند لذا استفاده از تئوری‌های امواج منظم و شبه دینامیکی در تعیین پارامترهای پایداری سازه‌های دریایی باید مورد بازنگری قرار گیرد [۷] بدیهی است که از دقیق‌ترین روش‌ها جهت برآورد نیروهای وارده و تحلیل و طراحی اعضای سازه، استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی امواج تصادفی در زمان طوفان (به عنوان مثال برای مدت سه ساعته طوفان) است. تئوری‌های امواج نامنظم و تصادفی، سطح دریا را مجموعه‌ای از امواج منظم در نظر می‌گیرند و در این راستا طیف موج تعریف و از آن استفاده می‌شود [۸ و ۹]. با این وجود با توجه به زمان بر بودن محاسبات تحلیل سازه به این روش، طراحان سازه‌های دریایی تمایلی به استفاده از این روش ندارند. در سال‌های اخیر تئوری موج نو<sup>۱</sup> به عنوان جایگزینی مناسب و معتبر برای تحلیل تاریخچه زمانی چند ساعته معرفی گردید. این تئوری با کاهش بسیار چشم گیر محاسبات تحلیل سازه، روشی نو در تحلیل دینامیکی سازه‌های دریایی می‌باشد [۱۰].

پس از ارائه مدل موج نو، محققین درصدد مقایسه‌ی این تئوری با دیگر تئوری موجود امواج و چگونگی کاربرد این

تئوری در تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی برآمدند. از جمله این محققین روزاریو<sup>۲</sup> و همکاران بودند که در سال ۱۹۹۳ به بررسی و مقایسه بین بارهای محاسبه شده وارد بر سازه‌های دریایی با استفاده از تئوری موج نو با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده شدند. در نهایت با مقایسه نتایج تئوری موج نو با نتایج اندازه گیری شده به طور کلی مشخص شد که تئوری موج نو مدلی مناسب برای طراحی و آنالیز سازه‌های دریایی و تخمین بارهای امواج وارد بر سکوها ثابت دریایی است [۱۱]. هم چنین میزان اعتبار نتایج تئوری موج نو تولید شده در تخمین پارامترهای موج، با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در تحقیق دیگری توسط نویسندگان تایید گردیده است [۱۲ و ۱۳].

در ادامه کاربردهای متنوع و گوناگون تئوری موج نو در تعیین پاسخ سازه‌های دریایی، در سال ۱۳۹۳ کتابداری و همکاران با ارائه ایده‌ای جدید به تحلیل حساسیت سکوها ثابت دریایی با استفاده از تئوری موج نو مقید شده پرداختند و تاثیرات ضریب درگ، ضریب اینرسی، و ارتفاع موج در تغییر مکان عرشه سکو با توجه به توزیع‌های آماری بررسی شدند [۱۴]. اما در پژوهش مذکور به اثر پارامترهای نامبرده بر شاخص‌های قابلیت اعتماد سازه پرداخته نشده است.

در این راستا در این پژوهش به تحلیل حساسیت پاسخ‌های سازه‌های ثابت دریایی شامل جابجایی حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی تحت بارگذاری دینامیکی موج به روش تئوری موج نو به پارامترهای ضریب درگ، ضریب اینرسی و ارتفاع موج پرداخته شده است. جهت رسیدن به یک نگرش کلی از رفتار سازه در برابر تئوری موج نو، و از طرفی جهت تعمیم نتایج حاصله روی هندسه‌های پیچیده، در این تحقیق هندسه‌های ابتدایی مورد بررسی قرار گرفته است. لذا دو هندسه ساده شامل سکوی تک پایه و سکوی چهار پایه بررسی شده‌اند.

جهت بررسی رفتار سازه دریایی ابتدا موج بر اساس طیف موج تولید شده است [۱۵-۱۷]. در پی تولید پروفیل سطح آب، پروفیل سرعت و شتاب ذرات آب نیز به روش موج نو تولید می‌گردد. با جاگذاری پروفیل سرعت و شتاب ذرات آب در معادله موریسون<sup>۳</sup>، نیروهای هیدرودینامیکی موج وارد بر ترازهای مختلف سازه تعیین می‌شود. با اعمال این

<sup>3</sup> Morison Equation

<sup>1</sup> New Wave Theory

<sup>2</sup> Rozario

عنوان روابط (۴) و (۵) به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$u(x, z, \tau) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \sum_1^N [S(\omega_n) \Delta \omega_n] \omega_n F_n(z) \cos(k_n x - \omega_n \tau) \quad (4)$$

$$\dot{u}(x, z, \tau) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \sum_1^N [S(\omega_n) \Delta \omega_n] \omega_n^2 F_n(z) \sin(k_n x - \omega_n \tau) \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)،  $F_n(z)$  تابع وابسته به عمق است که توسط رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$F_n = \frac{\cosh[K_n(d+z)]}{\sinh(K_n d)} \quad (6)$$

سری‌های زمانی سرعت و شتاب در رابطه موريسون که معادله آن به شرح زیر می‌باشد جایگذاری می‌شوند و نیروی موج در ترازهای مختلف بدست می‌آید.

معادله موريسون از جمله روابط نیمه تجربی است که به علت سادگی خود توانسته است کاربرد گسترده‌ای پیدا کند و برای شرایطی حاکم است که رابطه  $D/L < 0.05$  برقرار باشد ( $D$  همان مونوپایل و  $L$  طول موج است). بر این اساس مطابق معادله موريسون، نیروی وارد بر المان‌های سازه افزوده به صورت جمع دو نیروی پسا و اینرسی به صورت زیر بیان می‌گردد [۸ و ۲۰]:

$$df = 0.5Cd \rho D u(t) \left| \dot{u}(t) \right| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}(t) \quad (7)$$

در تحلیل‌های دینامیکی، اثرات ارتعاش سازه نیز در برآورد نیروهای وارد بر سازه در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس در تحلیل‌های دینامیکی با احتساب ضریب جرم افزوده معادله موريسون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$df = \rho V \dot{u}(t) + \rho C_d V (\dot{u}(t) - \dot{v}(t)) + 0.5C_d A (u(t) - v(t)) \left| \dot{u}(t) - \dot{v}(t) \right| \quad (8)$$

در روابط فوق،  $df$  اندازه نیروی گسترده بر واحد طول عضو لوله‌ای است، هم چنین  $C_a$  و  $C_d$  ضرایب درگ و ضریب جرم افزوده هستند. رابطه ضریب جرم افزوده و ضریب اینرسی به صورت  $C_m = 1 + C_a$  که در این پژوهش بر اساس توصیه آیین نامه API ضرایب درگ و اینرسی به ترتیب ۰/۶۶ و ۱/۶ در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی  $D$  نیز قطر خارجی شمع و  $\rho$  نیز چگالی جرمی آب دریا است.

$V$  نیز حجم مقطع لوله و  $u$  و  $\dot{u}$  به ترتیب سرعت و شتاب جریان آب در امتداد عمود بر محور طولی عضو را بیان می‌کنند. هم چنین  $v$  و  $\dot{v}$  نیز به ترتیب برابر سرعت و شتاب جسم است.

نیروها در نرم افزار ANSYS APDL15 و انجام تحلیل دینامیکی خطی، پاسخ‌های سازه شامل جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی بدست می‌آیند.

## ۲- تئوری موج نو

این تئوری، برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط ترومانس و همکاران ارائه گردید. تئوری موج نو بدین صورت بیان می‌گردد که شرایط لازم و کافی برای تشکیل یک ارتفاع بیشینه در زمان و مکان مشخص مورد ارزیابی قرار گرفته و محتمل‌ترین نیمرخ ممکن بدست می‌آید که این محتمل‌ترین تراز سطح آب، یک مدل ساده شده برای سینماتیک ذرات آب نسبت به مدل واقعی پیچیده و زمانبر امواج تصادفی می‌باشد. در این تئوری معادله نیمرخ سطحی تولید شده توسط موج نو به صورت رابطه شماره ۱ بیان می‌گردد [۱۰، ۱۱ و ۱۸]:

$$\eta(x, \tau) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \sum_1^N [S(\omega_n) \Delta \omega_n] \cos(k_n x - \omega_n \tau) \quad (1)$$

در این رابطه  $k_n$ ،  $S(\omega_n) \Delta \omega_n$  و  $\sigma$  به ترتیب برابر عدد موج مربوط به موجک شماره  $n$  ام، سطح تراز طیف مربوط به موجک شماره  $n$  ام و انحراف استاندارد مطابق طیف موج می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت که عبارت  $\sigma^2$  برابر واریانس است که از طیف موج بدست می‌آید.

در این پژوهش جهت مدل‌سازی امواج به روش تئوری‌های امواج تصادفی و تئوری موج نو، از طیف جانسواپ استفاده گردیده است که رابطه آن به صورت زیر است [۹ و ۱۹]:

$$S_\eta(f) = \alpha H_s^2 f_p^4 f^{-5} \gamma^\beta e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^4} \quad (2)$$

در این رابطه پارامترهای  $\beta$  و  $\alpha$  به ترتیب صورت زیر ارائه گردیده است:

$$\beta = e^{\left[ \frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{.23 + .0336\gamma - \frac{.185}{1.9 + \gamma}}$$

$$\sigma = .07 \quad f \leq f_p$$

$$\sigma = .09 \quad f > f_p$$

که  $H_s$  ارتفاع موثر امواج و  $f_p$  فرکانس قله طیف مورد نظر است. در تئوری موج نو مولفه‌های افقی سرعت و شتاب ذرات آب که به ترتیب با  $u$  و  $\dot{u}$  نشان داده می‌شوند و تحت

<sup>1</sup> American Petroleum Institute

جدول (۱) توزیع آماری متغیرهای تصادفی موجود در تحلیل حساسیت [۱ و ۱۱].

دار	تابع توزیع احتمال	ضریب تغییرات
Hs	گامبل	۰/۱
CD	لگ نرمال	۰/۰۵
Cm	لگ نرمال	۰/۲۵

جدول (۲) مقادیر Case1 تا Case5 پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ [۱ و ۱۱].

Cm	Cd	Hs	مقدار	Case
۱/۳۲	۰/۴	۴/۸۲	$\mu - \sqrt{3}\sigma$	Case1
۱/۴۶	۰/۵۳	۵/۳۲	$\mu - \sqrt{3}\sigma/2$	Case2
۱/۶	۰/۶۶	۵/۸۳	$\mu$	Case3
۱/۷۴	۰/۸	۶/۳۳	$\mu + \sqrt{3}\sigma/2$	Case4
۱/۸۷	۰/۹۴	۶/۸۳	$\mu + \sqrt{3}\sigma$	Case5

در کاربرد تئوری موج نو، تعیین مدت زمان تحلیل سازه تحت تئوری موج نو نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲۱]. در این مطالعه، ضرایب مختلف دوره تناوب قله طیف ( $\alpha$ ) برای تولید موج نو مورد پژوهش قرار گرفته تا زمان بهینه آنالیز سازه توسط موج نو تعیین گردد. معیار پیشنهادی برای محاسبه زمان بهینه به صورت رابطه (۹) قابل تعریف است [۱۵].

$$\eta_{\min} = \frac{\text{Minimum amplitude of the crest}}{\eta_{\max} \text{ Maximum amplitude of the crest}} \quad (9)$$

$$t \in [0, \alpha * T_p]$$

برای تعیین مدت زمان بهینه تحلیل سازه‌های دریایی تحت نیروی موج به روش تئوری موج نو، پروفیل سطح آب تحت تئوری موج نو به طور کاملاً اختیاری، برای دو حالت دریایی موج شماره (۱) با مشخصات،  $H_s = 0.1m, T_p = 2s$  و موج شماره (۲) با مشخصات،  $H_s = 0.06m, T_p = 2.5s$  برای ضرائب مختلف دوره تناوب قله طیف تولید گردیده و نحوه تغییرات نسبت مینیمم به ماکزیمم ارتفاع موج بر اثر تغییرات در ضریب زمان تناوب قله طیف محاسبه شده که در شکل (۱) نیز ارائه گردیده است (نمودارها تقریباً بر هم منطبق هستند). با توجه به شکل (۱) مشاهده می‌گردد که ضریب زمان تناوب قله طیف برای مقادیر بین ۷ تا ۱۰، نسبت مینیمم قله موج به ماکزیمم قله موج به صفر میل می‌کند.

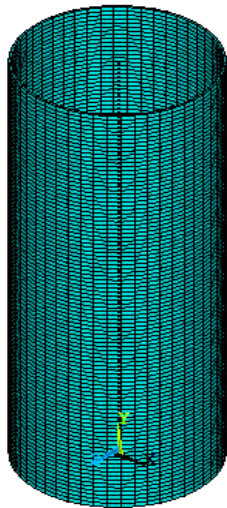
با محاسبه و اعمال این نیروها در ترازهای مختلف سازه به صورت نیروی خارجی در نرم اجزا محدود بکارفته در این تحقیق و انجام آنالیزهای دینامیکی، پاسخ‌های سازه‌ای شامل جابجایی سازه، برش پایه و لنگر واژگونی تعیین می‌گردند.

### ۳- تحلیل حساسیت

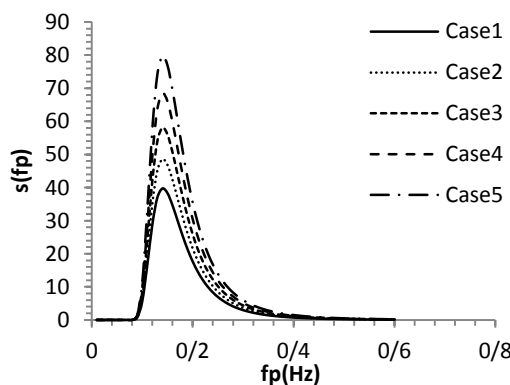
از جمله مهم‌ترین عدم قطعیت‌های تاثیر گذار در سازه‌های دریایی، عدم قطعیت برآورد نیروهای ناشی از امواج است. مطابق آنچه در معادله (۷) و در بخش‌های قبل بیان شد محاسبه نیروی موج به شدت به پارامترهای ارتفاع موج، ضریب نیروی پسا و ضریب اینرسی وابسته است. با توجه به اینکه پارامترهای مذکور دارای عدم قطعیت بوده، در پی آن برآورد نیروی موج نیز دارای عدم قطعیت است. از این روست که تحلیل حساسیت برای یافتن پارامترهای تاثیر گذار بر برآورد نیرو و پاسخ‌های سازه‌ای از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. برای این منظور توابع توزیع احتمال تغییرات پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ به همراه ضریب تغییرات این توابع احتمال در جدول (۱) ارائه گردیده است [۱ و ۱۴].

ضریب تغییرات نیز بیان کننده پراکندگی مقادیر هر متغیر در اطراف میانگین می‌باشد. بنابراین جهت تحلیل حساسیت برای هر پارامتر علاوه بر مقدار میانگین، دو مقدار  $\mu \pm \sqrt{3}\sigma$  که  $\mu$  مقدار میانگین پارامتر مذکور مطابق جدول و  $\sigma$  برابر انحراف معیار پارامتر مطابق توزیع آماری مربوطه مندرج در جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود [۱ و ۱۴] و میزان تغییرات پاسخ‌های سازه به ازای تغییرات پارامترهای ارتفاع موج، ضریب درگ و ضریب اینرسی مطابق جدول (۲) سنجیده می‌شود.

جهت بررسی روند تغییرات پاسخ سازه به تغییرات پارامترها، علاوه بر مقادیر کمینه و بیشینه از دو نقطه میانی که نقطه اول حد وسط مقدار کمینه و میانگین و نقطه دوم حد وسط مقدار میانگین و بیشینه است، استفاده می‌شود. مقادیر کمینه تا بیشینه پارامترهای ارتفاع موج، ضریب درگ و ضریب اینرسی جهت تحلیل حساسیت با نام‌های Case1، Case2، Case3، Case4 و Case5 بیان می‌شوند که در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

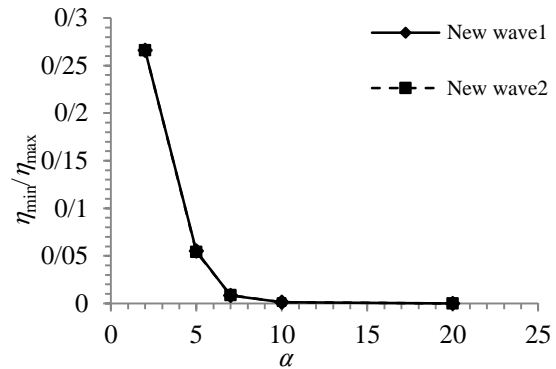


شکل (۲) مدل مونوپایل در نرم افزار انسیس.



شکل (۳) طیف انرژی جانسوپ برای حالات Case1 تا Case5 ارتفاع موج.

در این راستا طیف انرژی جانسوپ برای Case1 تا Case5 به شرح شکل (۳) استخراج می‌شود. پس از استخراج طیف انرژی جانسوپ برای حالات امواج case1 تا case5، پروفیل‌های تراز سطح آب، سرعت و شتاب برای حالات امواج مذکور بر اساس تئوری موج نو بدست می‌آید. سپس با استفاده از معادله موریسون، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه تعیین می‌گردد. با اعمال این نیروها در ترازهای مختلف سازه در نرم افزار انسیس و انجام آنالیز دینامیکی، پاسخ‌های سازه‌ای نیز تعیین می‌گردند. نمودار تاریخچه زمانی تراز سطح آب، جابجایی حداکثر سازه، برش پایه لنگر واژگونی سازه تحت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها به شرح اشکال (۴) تا (۷) ارائه گردیده است. برای سایر حالات Case1 تا Case5 ارتفاع موج، ضریب درگ و ضریب اینرسی نیز نیروهای وارد بر سازه در نرم افزار متلب تعیین شد.



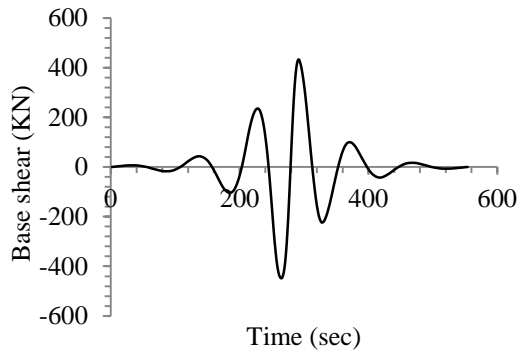
شکل (۱) تعیین مدت زمان شبیه‌سازی تحت تئوری موج نو.

لذا در این پژوهش مدت زمان لازم برای رکوردهای تئوری موج نو، ۷ برابر دوره تناوب قله طیف در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش از امواجی با دوره تناوب ۷/۱ ثانیه استفاده شده است. لذا سازه‌ها برای زمان ۴۹/۷ ثانیه تحلیل دینامیکی خطی می‌شوند. بنابراین توزیع‌های آماری مربوط به هر کدام از این متغیرهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ به همراه مقادیر متغیرهای تصادفی مذکور به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که مقادیر میانگین ارتفاع موج و دوره تناوب مذکور مربوط به امواج با دوره بازگشت صد ساله خلیج فارس هستند.

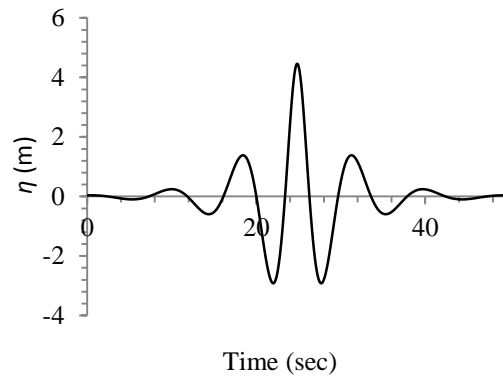
برای تحلیل حساسیت دو نوع سازه مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مدل شماره ۱ یک شمع منفرد بررسی گشته است. شرایط محیطی و هندسی این سازه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که شباهت ابعادی این سازه به پایه توربین های بادی متعارف تامین گردد [۲۲]. مدل شماره ۲ نیز یک سکوی چهار پایه بوده که هدف از نظر گرفتن این مدل رسیدن به یک نگرش کلی پاسخ سازه در برابر موج نو است.

#### ۴- مدل شماره ۱: مونوپایل یا سکوی تک پایه

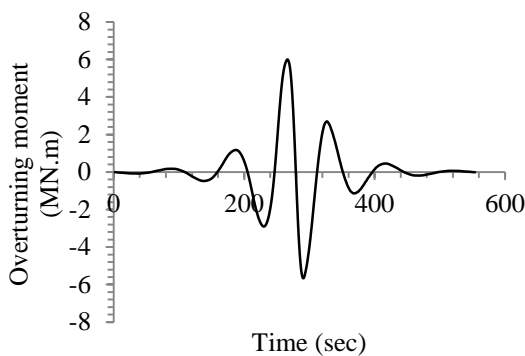
این سازه تک پایه دارای قطر ۳ متر، ضخامت جداره ۲/۵ سانتی متر، ارتفاع ۳۰ متر و مدول الاستیسیته  $2/1 \times 10^{11}$  نیوتن بر متر مربع می‌باشد. در شکل (۲) نمای این سازه به صورت یک لوله شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس ارائه گردیده است. به منظور تعیین پاسخ‌های سازه‌ای مدل شماره ۱ شامل جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی سازه، ابتدا پاسخ‌های سازه‌ای سازه تحت حالات Case1 تا Case2 ارتفاع موج تعیین می‌شود.



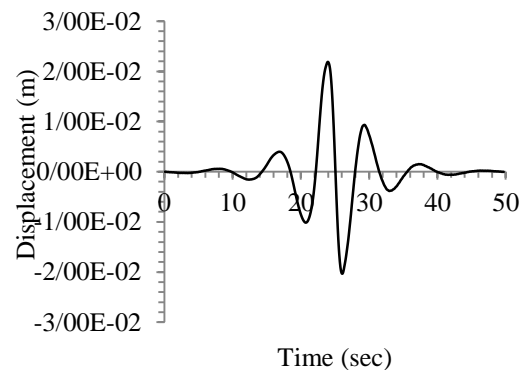
شکل (۶) تاریخچه زمانی برش پایه سازه مدل ۱ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.



شکل (۴) تاریخچه زمانی تراز سطح آب برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.



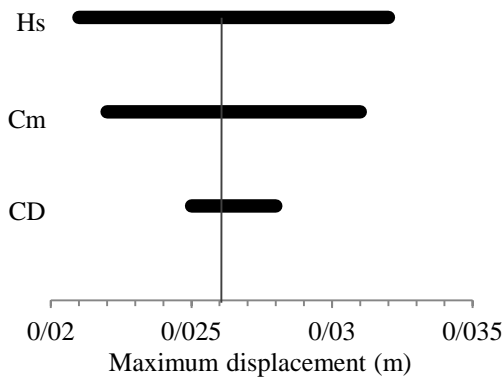
شکل (۷) تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مدل ۱ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.



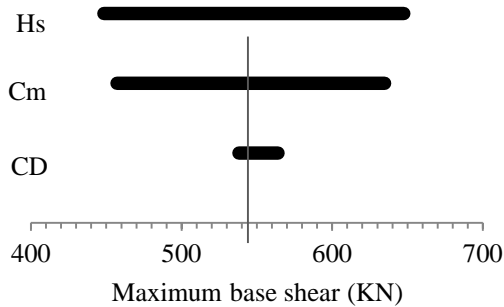
شکل (۵) تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر سازه مدل ۱ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.

بر اساس نتایج بدست آمده تغییرات ارتفاع موج از Case1 تا Case5، باعث ایجاد تغییرات در پاسخهای سازه‌ای شامل جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی به ترتیب با مقادیر ۴۰/۸۹، ۴۴/۳۹ و ۴۶/۲۵ درصد می‌شود. از طرفی درصد تغییرات پاسخهای سازه‌ای مذکور به ازای تغییرات از Case1 تا Case5 ضرائب اینرسی و درگ به ترتیب برابر ۳۶/۰۹، ۳۸/۸، ۳۶/۸۸ و ۱۰/۲۷، ۴/۸، ۸/۲۹ می‌باشند. لذا می‌توان گفت که در مدل شماره ۱، ارتفاع موج با تغییراتی بیش از ۴۰ درصد، بیشترین تاثیر را بر مقادیر پاسخهای سازه‌ای دارا بوده و پس از آن ضرائب اینرسی و درگ به ترتیب با تغییراتی در حدود ۳۵ و ۱۰ درصد، باعث ایجاد تغییرات در پاسخهای سازه‌ای به شرح جدول (۴) ارائه گردیده است. در این جدول Ed، Ev و Em به ترتیب برابر درصد تغییرات جابجایی حداکثر سازه، درصد تغییرات برش پایه و درصد تغییرات لنگر واژگونی سازه با ازای تغییرات از Case1 تا Case5 هر کدام از پارامترها است.

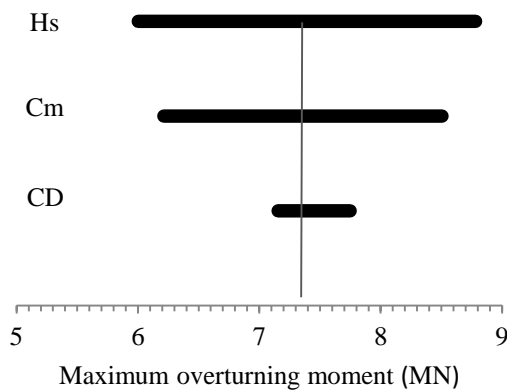
پس از اعمال این نیروها در نرم افزار انسیس به سازه و انجام آنالیز دینامیکی، پاسخهای سازه‌ای شامل جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه و در جدول (۳) ارائه گردیده است. در این جدول پاسخهای سازه در ۱۵ ترکیب پارامترهای مختلف ارائه گردیده است. به صورتی که تغییرات هر پارامتر با مقدار متوسط پارامترهای دیگر در نظر گرفته شده است. مهم ترین پاسخهای سازه ای در سازه‌های دریایی، برش پایه و لنگر واژگونی می‌باشند که ماکزیمم تاریخچه زمانی این پاسخها در برابر امواج، تاثیر گذارترین نقش در طراحی سازه را ایفا می‌کند. لذا با استفاده از تحلیل حساسیت، تاثیر پارامترهای دارای عدم قطعیت در این گونه پاسخها ستجیده می‌شود. لازم به ذکر است که پاسخهای سازه ای برش پایه و لنگر واژگونی در مدل های ۱ و ۲ در یک نقطه خاص بلکه برای کل سازه محاسبه گردیده اند و در یک نقطه در این مقاله ارائه گردیده است.



شکل (۸) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف در جابجایی حداکثر مدل شماره ۱.



شکل (۹) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف در برش پایه مدل شماره ۱.



شکل (۱۰) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف در لنگر واژگونی مدل شماره ۱.

به عبارت بهتر در دامنه معقول تغییرات محتمل ارتفاع موج میزان تغییرات پاسخ‌های سازه نسبت به سایر پارامترها بیشتر است.

جدول (۳) پاسخ‌های سازه‌ای برای Case1 تا Case5 پارامترهای ضریب درگ، ضریب اینرسی و ارتفاع موج برای مدل ۱.

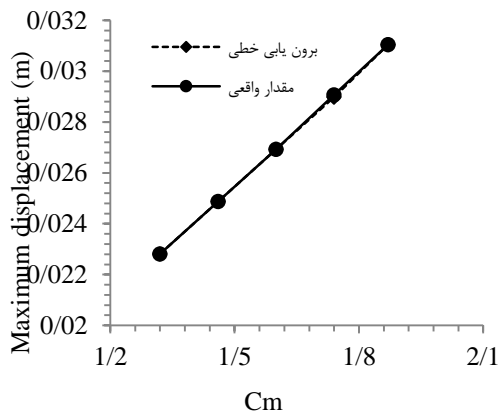
	Cm	Cd	Hs	
۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۵۹	۰/۰۲۱۹	Case1	
۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۶۴	۰/۰۲۴۳	Case2	جابجایی حداکثر
۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۶۹	Case3	سازه
۰/۰۲۹	۰/۰۲۷۶	۰/۰۲۹۵	Case4	(m)
۰/۰۳۱	۰/۰۲۸۶	۰/۰۳۲۲	Case5	
۴۵۷/۱	۵۳۸	۴۴۸/۳	Case1	
۵۰۱/۷	۵۴۱/۷	۴۹۶/۸	Case2	برش پایه سازه
۵۴۶/۶	۵۴۶/۶	۵۴۶/۶	Case3	(KN)
۵۹۲/۲	۵۵۴/۲	۶۶۵/۵	Case4	
۶۳۴/۶	۵۶۳/۹	۴۵۸/۶	Case5	
۶/۲	۷/۱	۶	Case1	
۶/۷	۷/۲	۶/۶	Case2	لنگر واژگونی
۷/۳	۷/۳	۷/۳	Case3	سازه
۷/۹	۷/۵	۸	Case4	(MN)
۸/۵	۷/۷	۸/۷	Case5	

جدول (۴) درصد تغییرات پاسخ‌های سازه بر اثر تغییرات ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ از Case1 تا Case5.

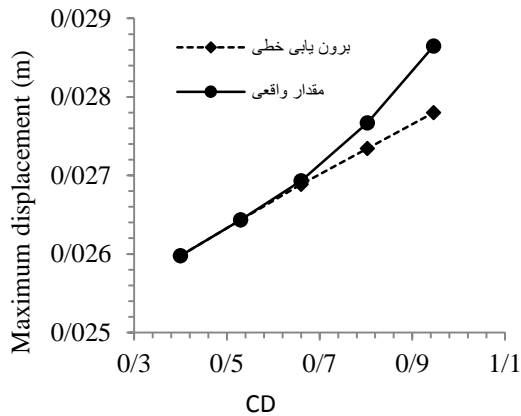
	Em	Ev	Ed	
۴۶/۲۵	۴۴/۳۹	۴۰/۸۹	Case1	ارتفاع موج
۳۶/۸۸	۳۸/۸	۳۶/۰۹	Case2	ضریب اینرسی
۸/۲۹	۴/۸	۱۰/۲۷	Case3	ضریب درگ

به منظور بررسی حساسیت پاسخ‌های سازه به پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ از نمودار موسوم به Tornado استفاده می‌شود. این نمودار که در آنالیز حساسیت کاربرد فراوانی دارد، اثر پارامترهای مختلف را با توجه به انحراف معیار در نظر گرفته شده برای آنها و مقادیر پاسخ‌های بدست آمده را نمایش می‌دهد [۱۱] با استفاده از مقادیر پاسخ‌های سازه‌ای بدست آمده از آنالیز دینامیکی مدل شماره ۱ برای Case1 تا Case5 پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ، می‌توان این نمودار را ترسیم کرد. نمودار حساسیت پاسخ‌های سازه به پارامترهای مورد بررسی در اشکال (۸) تا (۱۰) ارائه گردیده‌اند. همان‌طور که در اشکال مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات پاسخ‌های مختلف سازه به ارتفاع موج از سایر پارامترها بیشتر است.





شکل (۱۲) نحوه تغییرات جابجایی حداکثر مدل ۱ در اثر تغییرات ضریب اینرسی از Case1 تا Case5.



شکل (۱۳) نحوه تغییرات ارتفاع موج از Case1 تا Case5 در اثر تغییرات ارتفاع موج از Case1 تا Case5.

قابل توجه است که مقادیر جدول برای هر کدام از پاسخ‌ها، از میانگین گیری اختلاف پاسخ‌های مربوطه از برون یابی خطی آن پاسخ برای Case1 تا Case5 بدست آمده‌اند. در جدول (۴) میانگین درصد‌های غیر خطی پاسخ‌های سازه‌ای برای Case1 تا Case5 ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ برای برش پایه و لنگر واژگونی نیز برای مدل ۱ ارائه گشته است.

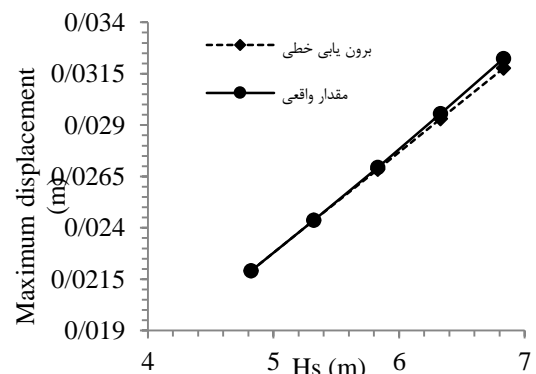
در جدول (۴) دیده می‌شود که میانگین درصد غیر خطی پاسخ‌های سازه‌ای برای Case1 تا Case5 پارامتر ارتفاع موج، در حدود ۱ درصد بوده و این مقدار برای ضریب اینرسی کمتر از یک درصد و ضریب درگ حداکثر ۱/۵ درصد است که در هر صورت مقادیر ناچیزی هستند. بنابراین نتایج بدست آمده نشام می‌دهد که برون یابی خطی مشخصات پایداری سازه کاملاً قابل اطمینان است.

#### ۱-۴- بررسی تغییرات پاسخ سازه در مدل شماره ۱

بر اساس روابط موریسون، مقدار نیرو و در نتیجه نسبت پاسخ سازه به پارامترهای ارتفاع موج و ضرایب درگ و اینرسی غیر خطی است. در این شرایط و در حالت کلی برون یابی مقادیر پاسخ سازه به تغییرات پارامتر مذکور پیچیده و توأم با خطا خواهد بود. شناسایی نحوه تغییرات پاسخ‌های سازه در اثر پارامترهای موثر در تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی و انحراف آن از تغییرات خطی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این مرحله از کار با توجه به نتایج حاصل شده از آنالیز دینامیکی برای مدل شماره ۱، نمودارهای جابجایی حداکثر ناشی از ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ از Case1 تا Case5 برای مدل شماره ۱ در اشکال (۱۱) تا (۱۳) ارائه گردیده است.

در این نمودارها، مقدار واقعی (خط پر) بیان کننده پاسخ دقیق محاسبه شده سازه توسط آنالیز دینامیکی می‌باشد. همچنین برون یابی خطی حاصل از نتایج تخمین پاسخ‌های سازه‌ای شامل جابجایی حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی سازه پس از تعیین Case1 و Case2 نیز به صورت خط چین نشان داده شده است. بدین منظور پاسخ‌های سازه‌ای مذکور با رفتار خطی با شیب حاصل از مقدار روند Case1-Case2 افزایش می‌یابند.

با توجه به نتایج حاصل شده از تحلیل حساسیت مدل شماره ۱ مطابق جدول (۳) مقادیر میانگین درصد‌های انحراف از برون یابی خطی جابجایی حداکثر سازه برای Case1 تا Case5. پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ به ترتیب برابر ۰/۸۷، ۰/۱۶ و ۱/۴۲ می‌باشد.



شکل (۱۱) نحوه تغییرات جابجایی حداکثر مدل ۱ در اثر تغییرات ارتفاع موج از Case1 تا Case5.



### ۵- مدل شماره ۲: سکوی چهار پایه

همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است در این بخش سکوی چهار پایه مورد بررسی قرار می گیرد. قطر پایه ها ۲ متر و ضخامت جداره ۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع پایه ها ۸۰ متر و در قسمت بالای این سازه عرشه قرار می گیرد که به منظور مهار پایه ها و ایجاد یک دیافراگم صلب در عرشه از المان های افقی و مورب استفاده گردیده است. فولاد مورد استفاده دارای مدول الاستیسیته  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  و چگالی  $7850 \text{ N/m}^3$  می باشد. فاصله پایه ها در دو جهت برابر و معادل ۲۵ متر و عمق آب ۷۰ متر در نظر گرفته شده است.

### ۵-۱- تحلیل حساسیت مدل شماره ۲

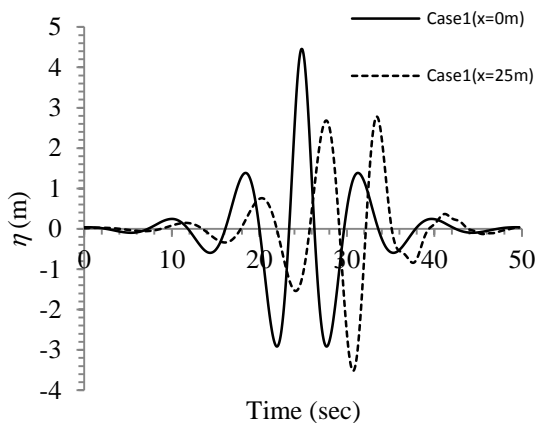
در این مدل نیز پس از تعیین پروفیل موج نو در محل پایه ها با مختصات  $x=25 \text{ m}$  و  $x=0 \text{ m}$  برای امواج با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) و هم چنین پروفیل سرعت و شتاب در محل پایه ها در ترازهای مختلف، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر اعضای سازه تولید و با توزیع این نیروها بر اعضای سازه در نرم افزار انسیس، و انجام آنالیز دینامیکی برای مقادیر Case1 تا Case5 هر کدام از پارامترهای ارتفاع موج، ضریب درگ و ضریب اینرسی، پاسخ های سازه ای مدل ۲ تعیین می گردند.

در شکل (۱۵) پروفیل تراز سطح آب در محل پایه ها برای Case1 ارتفاع موج ارائه گردیده است. هم چنین نمودار سری زمانی جابجایی، برش پایه و لنگر واژگونی کل سازه در شکل های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است. نتایج حاصله از تحلیل حساسیت مدل شماره ۲ در جدول (۶) ارائه گردیده است.

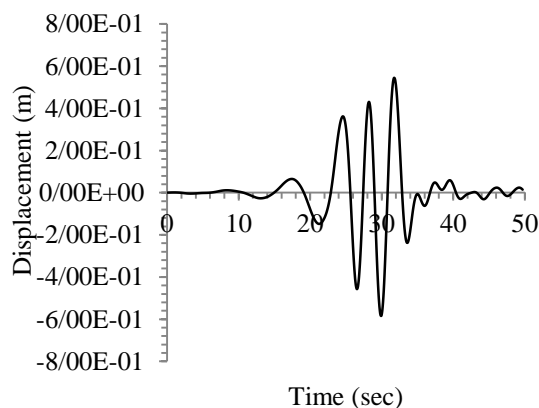
چنان که ملاحظه می گردد مشابه مدل شماره ۱ حساسیت سازه به ارتفاع موج بیشتر از ضریب اینرسی و سپس کمتر به ضریب درگ می باشد. هم چنین درصد تغییرات این پاسخ ها از Case1 تا Case5 برای هر کدام از پارامترهای ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ به شرح جدول (۶) ارائه گردیده است.

جدول (۴) میانگین درصدهای غیر خطی پاسخ های سازه ای برای Case1 تا Case5 ارتفاع موج، ضریب اینرسی و درگ مدل ۱.

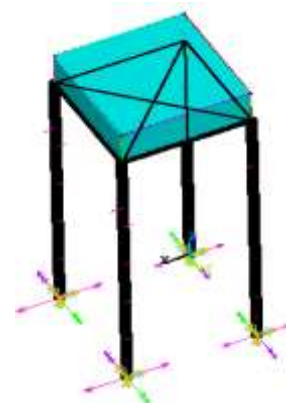
متغیر	جابجایی	برش پایه	لنگر واژگونی
ارتفاع موج	۰/۸۷	۰/۵۱	۰/۶۵
ضریب اینرسی	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۶
ضریب درگ	۱/۴۲	۱	۱/۵۲



شکل (۱۵) پروفیل تراز سطح آب در محل پایه ها در مدل شماره ۲.



شکل (۱۶) تاریخچه زمانی جابجایی حداکثر سازه مدل ۲ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.



شکل (۱۴) نمای مدل ۲ در نرم افزار انسیس.

جدول (۶) درصد تغییرات پاسخ‌های سازه‌ای بر اثر تغییرات

ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ برای مدل ۲.			
درصد تغییرات	درصد تغییرات	درصد تغییرات	
جابجایی	برش پایه	لنگر واژگونی	
۵۳	۵۲/۲	۵۲/۳۶	ارتفاع موج
۳۱/۷	۳۱/۷۷	۳۱/۵۲	ضریب اینرسی
۱۹/۴	۱۷/۹۴	۱۸/۴	ضریب درگ

جدول (۷) میانگین درصدهای غیرخطی پاسخ‌های سازه‌ای برای

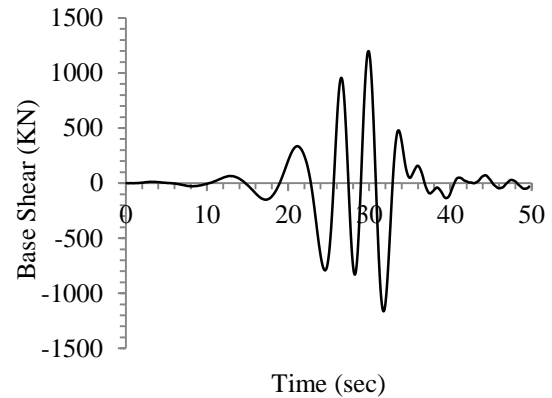
Case1 تا Case5 ارتفاع موج، ضریب اینرسی و درگ مدل ۲.

متغیر	جابجایی	برش پایه	لنگر واژگونی
ارتفاع موج	۱/۰۳	۰/۶۵	۰/۸۷
ضریب اینرسی	۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۴
ضریب درگ	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۱۲۳

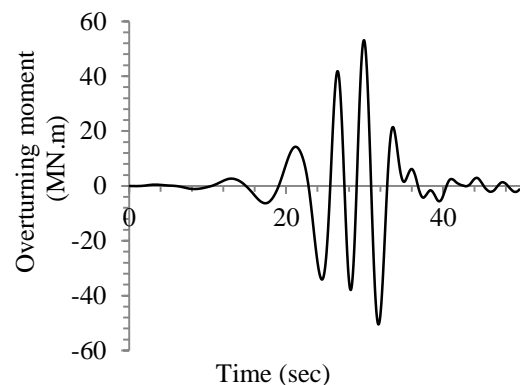
در این پژوهش به تحلیل حساسیت سازه‌های ثابت دریایی تحت بارگذاری دینامیکی موج به روش تئوری موج نو پرداخته شده است. تحلیل حساسیت این امکان را می‌دهد که تاثیر عدم قطعیت‌ها در مقادیر مختلف متغیرهای تصمیم‌گیری لحاظ شود. از آنجایی که امواج دریا ماهیتی تصادفی و نامنظم دارند، لذا عدم قطعیت در برآورد پارامترهای مهم در تعیین نیروی هیدرودینامیکی وارد بر سازه مانند ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ انکار ناپذیر است. از آنجایی که تئوری موج نو در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین معتبر برای شبیه‌سازی امواج تصادفی معرفی گردیده، لذا در این پژوهش برای برآورد نیروی موج از روش تئوری موج نو استفاده شده است.

تاثیر پارامترهای مورد مطالعه بر مقادیر پاسخ‌های سازه‌ای مانند جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی برای دو مدل سازه دریایی شامل یک مونوپایل (مدل ۱) و مدل چهار پایه (مدل ۲) مورد سنجش قرار گرفت. برای مشخصات موج و سازه از شرایط حاکم محیطی خلیج فارس استفاده شده است. نتایج حاصله از تحلیل حساسیت را به شرح زیر می‌توان خلاصه نمود:

- ارتفاع موج با تغییراتی بیش از ۴۰ درصد، در هر دو سازه بیشترین اثر را بر مقادیر پاسخ‌های سازه‌ای همچون جابجایی حداکثر سازه، برش پایه و لنگر واژگونی دارد.



شکل (۱۷) تاریخچه زمانی برش پایه سازه مدل ۲ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.



شکل (۱۸) تاریخچه زمانی لنگر واژگونی سازه مدل ۲ برای حالت Case1 ارتفاع موج و مقادیر میانگین دیگر پارامترها.

۵-۲- بررسی تغییرات پاسخ‌های سازه‌ای مدل ۲

با توجه به نتایج حاصل شده از آنالیز دینامیکی برای مدل شماره ۲، میزان انحراف از رفتار خطی برای پاسخ‌های سازه‌ای شامل جابجایی حداکثر، برش پایه و لنگر واژگونی سازه، ناشی از تغییرات ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ در حالت Case1 تا Case5 به شرح جدول (۷) می‌باشد. چنانکه ملاحظه می‌گردد میانگین انحراف از برون یابی خطی مقادیر پاسخ‌ها در بدترین شرایط (ضریب دراگ) کمتر از ۲ درصد است.

۶- نتیجه‌گیری

هنگامی که پارامترهای موجود در مساله زیاد و به همراه عدم قطعیت در مقادیر همراه باشند تحلیل حساسیت اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

- Probabilistic Incremental Wave Analysis", Journal Of Constructional Steel Research, Vol.67, pp.759-769, 2011.
- [6] Golafshani, A. A., Ebrahimian, H., Bagheri, V., and Holmas, "Incremental Wave Analysis And Its Application To Performance-Based Assessment Of Jacket Platforms", Journal Of Constructional Steel Research, Vol.67, pp.1649-1657, 2011.
- [7] Liu, Z., Frigaard, p., "Generation and Analysis of Random Wave", Aalborg University, pp.20-50, 1999.
- [8] Chakrabarti, S., "Handbook of Offshore Engineering", Elsevier Science, Vol.2, PP.914-916, 2005.
- [9] Sorensen, R. M., Basic Coastal Engineering Vol.10, 2006.
- [10] Tromans, P.S., Anaturk, A.R., Hagemeyer, P., "A New Model for the Kinematics of Large Ocean Waves-Application as a Design Wave", First International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.111, No.1, pp.64-71, 1990.
- [11] Rozario, J., Tromans, P., Taylor, P., Efthymiou, M., "Comparison of Loads Predicted Using New Wave and other Wave Models with Measurements on the Tern Structure", Wave Kinematics and Environmental Forces, Vol.29, No.1, pp.143-159, 1993.
- [۱۳] میلاد شاکرمی، احمد شانه ساز زاده، ناصر شایختی، "اعتبار سنجی تئوری موج نو در تعیین پارامترهای پایداری سازه‌های دریایی" دهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۳۰ و ۳۱ فروردین ۱۳۹۶.
- [12] Shakarami, M., Shanehsazzadeh, A., Shabakhty, N., "Validation of New Wave Theory in Determining Stability of Offshore Wind Turbines", Modares Mechanical Engineering, Vol.20, No.1, pp.77-86, 2020.
- [۱۴] محمد جواد کتابداری، علی محمد افشار، حسین موسوی زادگان، "آنالیز حساسیت سکوی ثابت دریایی با استفاده از تئوری موج نو مقید شده" اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، ۲۷ آذرماه ۱۳۹۳.
- [15] Mohajernassab, S., Dastan, M., M.R., Tabeshpour, Seif, M.S., and Mehdigholi, H., "Application of New-wave Theory In The Endurance Wave Method to Assess offshore Structures Under The Persian Gulf Wave Conditions", Journal of Marine Engineering, Vol.9, No.18, pp.71-82, 2013.
- [16] ITTC Seakeeping Committee, Report of the Seakeeping Committee, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Towing Tank Conference, pp.457-534, 1984.
- [17] Cassidy, M., R. Taylor, E., and Houslyby, G., "Analysis of Jack-up Units Using a Constrained

- تغییرات ضریب اینرسی در دامنه مورد انتظار برای عدم قطعیت، باعث تغییراتی بیش از ۳۰ درصد در پاسخ‌های سازه‌ای مذکور می‌شود.
- ضریب درگ با کمترین تغییرات نسبت به ارتفاع موج و ضریب اینرسی، تغییراتی کمتر از ۲۰ درصد در پاسخ‌های سازه‌ای ایجاد می‌کند.
- با توجه به اینکه نتایج بدست آمده در خصوص میزان حساسیت هر دو سازه به پارامترهای مورد مطالعه روند یکسانی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در هندسه سازه تغییر عمده‌ای در حساسیت سازه‌ها به پارامترهای مختلف ندارد.

در این پژوهش همچنین نحوه تغییرات پاسخ سازه در اثر تغییر در مقادیر ارتفاع موج و ضرایب دراگ و اینرسی مورد توجه قرار گرفت. در این تحلیل معلوم گردید اگرچه تغییرات پارامترهای پایداری سازه‌های دریایی از جمله جابجایی سازه، برش پایه و لنگر واژگونی به ازای تغییرات پارامترهایی چون ارتفاع موج، ضریب اینرسی و ضریب درگ ذاتاً خطی نیست ولی برای هر دو سازه با تغییرات خطی اختلاف ناچیزی دارد و لذا برون یابی خطی پارامترهای پایداری در شرایطی خارج از محدوده طراحی و در شرایط حدی<sup>۱</sup> خطای قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت.

## ۷- مراجع

- [1] Hezarjaribi, M., Bahaari, M. R., Bagherei, V. "Sensitivity Analysis of Jacket- Type Offshore Platforms under Extreme Waves", Journal of Constructional Steel Research, Vol.83, pp.147-155, 2013.
- [2] Eldim, M. N, Kim, J., "Sensitivity Analysis on Seismic life-Cycle Cost of a Fixed-Steel Offshore Platform Structure", Ocean Engineering, Vol.121, pp.323-340, 2016.
- [3] Zeinodini, M., Golpour, H., Matin nikoo, H., Khalili, H., Ahmadi, I., "Sensitivity Analysis Of Selected Random Variables Of Existing Offshore Jacket Structures in Persian Gulf", Coastal And Offshore Engineering, Vol.5, pp.15-24, 2017.
- [4] Eldim, M.N., Kim, J., "Sensitivity Analysis of Pile - Founded Fixed Steel Jacket Platforms Subjected to Seismic Loads", Ocean Engineering, Vol.85, pp.1-11, 2014.
- [5] Golafshani, A. A., Ebrahimian, H., Bagheri, V., and Holmas, T., "Assessment of Offshore Platforms Under Extreme Waves by

<sup>1</sup> Extreme

- New Wave Methodology", Applied Ocean Research, Vol.23, No.4, pp.221-234, 2001.
- [18] Alves, G. M., Banner, L., "Revisiting The Pierson – Moskowitz Asymptotic Limits for Fully Developed Wind Waves", Journal Of Physical Oceanography, Vol.33, No.7, pp.1301-1323, 2002.
- [19] Dastan Diznad, M.A., Mohajernassab, S., Seif, M.S., Tabeshpour, M.R., and Mehdigholi, H., Assessment Of Offshore Structures Under Extreme Wave Conditions By Modified Endurance Wave Analysis", Marine structures, Vol.39, No.1, pp.50 -69, 2014.
- [20] Chakrabarti, S.K., Hydrodynamics of Offshore Structures, WIT Press, pp.86-125, 1987.
- [21] Det Norske Veritas, DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental loads. Høvik, Norway, Det Norske Veritas, DNV, 2010.
- [22] Bhardwaj. U, Teixeir. A. P, Guedes Soares. C. "Reliability Prediction of an Offshore Wind Turbine Gearbox", Renewable Energy, Vol.141, pp.693-703, 2019.