



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





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



بررسی پاسخ تحلیل دینامیکی غیرخطی یقینی و تصادفی سکوی جک آپ با در نظر گرفتن

اندرکنش خاک- شالوده

ساقی سعید طهرانی ، دانشجوی کارشناسی ارشد ، مهندسین مشاور جواب ، saghy_saeid@yahoo.com
 بهروز عسگریان ، دانشیار ، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، asgarian@kntu.ac.ir
 محمد دقیق ، استادیار ، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، mdaghigh@gmail.com ، POGC Company
 فریدون کیایی ، مدیریت عامل ، مهندسین مشاور جواب ، javab_co@yahoo.com

کلید واژه: جک آپ، رفتار دینامیکی غیرخطی، پاسخ تصادفی، پاسخ یقینی، اندرکنش خاک- شالوده.

1-مقدمه

واحدهای جک آپ از دهه 1955 وارد عملیات اکتشاف و استخراج نفت و گاز شدند [1]. یک سکوی جک آپ سازه ای است مشتمل بر بدنه، سه یا چهار پایه خرپایی مشبک، نوعی شالوده و مکانیسمی برای بالا و پائین بردن پایه ها. این مجموعه در حالتی که پایه ها از بدنه افراشته هستند، به محل مورد نظر حمل می شود. سپس پایه ها با مکانیسمی ویژه به پایین رانده شده و پس از رسیدن به بستر با پمپاژ آب دریا درون مخازن شناوری تعبیه شده در داخل بدنه، پیش بارگذاری و به بستر دریا فرو می روند. آنگاه بدنه تا ارتفاع مورد نیاز که بر مبنای شرایط موضعی دریا تعریف و تعیین می گردد با کمک همان مکانیسم ویژه بالا برده شده و در تراز عملیاتی آن تثبیت می شود.

بر اساس آمارهای موجود، یک سوم از حوادث جک آپ ها ناشی از مشکلات شالوده هاست [2]. بهترین راه برای جلوگیری از اینگونه حوادث، ارزیابی دقیق داده های خاک بستر به منظور تعیین پارامترهای مورد نیاز برای پیش بینی رفتار خاک- شالوده و انتخاب مدل ریاضی مناسب و واقع گرایانه با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی کننده در این رفتار است. در این مقاله با استفاده از مشخصات خاک، ظرفیت باربری اسپاد کن محاسبه شده است. سپس با رسم نمودار ظرفیت باربری در برابر نفوذ، عمق نفوذ مورد نیاز پیش بارگذاری تعیین و بر اساس آن، مشخصات قائم نقطه استقرار تکیه گاه مشخص گردیده است. مدلسازی سازه با جزئیات کامل و رفتار غیرخطی تعاملی موج- سازه- شالوده- خاک با استفاده از نرم افزار USFOS انجام پذیرفته است. با انجام تحلیل های یقینی در مقابل موج حداکثر، مقادیر حداکثر پاسخ های تغییرمکان، برش و لنگر واژگونی یقینی بدست آمده است. سپس تحلیل های دینامیکی غیرخطی تصادفی بر روی سازه مورد نظر با مدل طیفی هم ارز موج حداکثر انجام شده است؛ پس از تحصیل پاسخ های سری زمانی، توزیع تابع چگالی والد و حداکثر از پاسخ های سری زمانی ترسیم و مدل توزیع ویبول به توزیع حداکثر پاسخ ها برازش یافته و سپس حداکثر پاسخ از روابط موجود تعیین گردیده است و در نهایت نتایج دو روش تحلیلی یقینی و تصادفی با یکدیگر مقایسه شده است. نشان داده می شود که به علت حساسیت پاسخ های سازه به رفتار دینامیکی و غیرخطی، مطالعات بر مبنای موج های تصادفی نامنظم که تصویر درستی از شرایط واقعی دریا می دهند نسبت به فرض موج معین شبیه سازی بهتری از رفتارهای غیرخطی دینامیکی سازه جک آپ ارائه می دهد.

مقالات مرتبط با جک آپ که مورد مطالعه قرار گرفته اند عبارتند از: کسیدی و همکاران که با استفاده از مدل 6 درجه آزادی پلاستیسیته سخت شونده برای شبیه سازی اندرکنش خاک- سازه، پاسخ دینامیکی سازه را بررسی و مدل ها و روش های پیشرفته تری برای ارزیابی جک آپ در نرم افزار SOS-3D ارائه کردند [3]. در مطالعاتی دیگر کسیدی و هالزی و همکاران (2002) برای ارزیابی پارامترهای سختی خاک، داده های سه سکو در هشت ساختمان مختلف را مورد بررسی قرار دادند. برای هر مورد، تغییر مکان افقی بدنه و مشخصات خاک در زمان بهره برداری تحصیل گردید. از مدل هم ارز پایه ها در تحلیل استفاده شده و اتصالات بدنه به پایه کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است با مدلسازی سکوها در نرم افزار جک آپ و مقایسه ی آن ها با داده های موجود، صحت مدلسازی شرایط تکیه گاهی مورد تحقیق قرار گرفت [4]. تمپرتون و همکاران (1999) در مقاله ای ضمن تعریف مفاهیم گیرداری و سودمندی وجود آن، با استفاده از طبقه بندی داده های سه جک آپ مستقر در

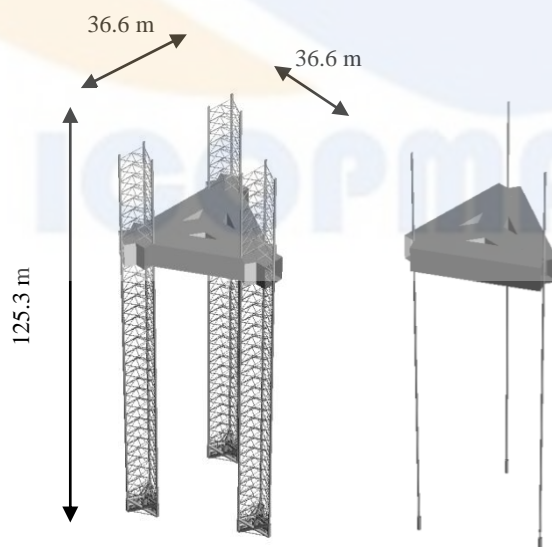
هفت ساختگاه در دریای شمال، پریود آن ها را تعیین و سپس با پریود مدل سازه با سه مدل تکیه گاهی گیردار، مفصلی و فدر مقایسه کردیم. میزان گیرداری با استفاده از پریود های بدست آمده محاسبه شد. ضمن بررسی ها مشخص گردید که پریود طبیعی این جک آپ ها به گیرداری شالوده بیش از اتصال پایه به بدنه و یا جرم افزوده حساسیت دارد [5]. امدهل (1994) و همکاران تحلیل استاتیکی با کنترل تغییر مکان را برای جک آپ با مدل تکیه گاهی با فنر های غیرخطی و تکیه گاه های مفصلی انجام دادند. در این مطالعات اثرات تغییر مقدار پیش بارگذاری بر تغییر مکان بدنه مورد بررسی قرار گرفته است [6].

2- مدل سازه جک آپ و شرایط محیطی

به طور خلاصه پایه ها، خرپای واسط و اسپادکن با جزئیات کامل و بدنه با المان معادل مدل شده اند. تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی و روئیدنی های گیاهی در عمق در نظر گرفته شده است. چون هدف این مقاله بررسی پاسخ کلی سیستم بوده است مدل معادل پایه ها، خرپای واسط و اسپادکن با استفاده از روابط ارائه شده در مراجع [7 و 8] ساخته شده و سازگاری دو مدل با انجام تحلیل های دینامیکی و استاتیکی بررسی گردیده است. در شکل (1) دو روش مدل سازی سازه در نرم افزار USFOS با استفاده از روش المان محدود نشان داده شده است. جرم شامل جرم سازه، جرم افزوده و جرم غیر سازه ای است. میرایی شالوده و میرایی سازه با استفاده از روش ریلی در نظر گرفته شده اند. بدنه یک منشور با قاعده مثلث متساوی الاضلاع به طول ضلع 73 متر و ارتفاع 7.316 متر می باشد. در مدل رایانه ای، مرکز پایه ها روی یک مثلث متساوی الاضلاع محاطی هم مرکز با بدنه با فاصله های 36.6 متری از یکدیگر قرار می گیرند. ارتفاع کلی پایه ها 125.3 متر است. قطر اسپادکن 12.24 متر و ارتفاع آن 4.572 متر است. پایه ها از شبکه های خرپایی K شکل با سه وتر اصلی تشکیل می شوند (جدول 1). ارتفاع هرچشمه 3.658 متر است.

جدول 1) مشخصات اعضای جک آپ نمونه

D (mm)	T (mm)	L (mm)	اعضا
800	50	3658	وتر
219.1	20	6157.37	مهاربندی های K
168.3	10	4953	دهنه شکن
219.1	20	9906	اعضای افقی



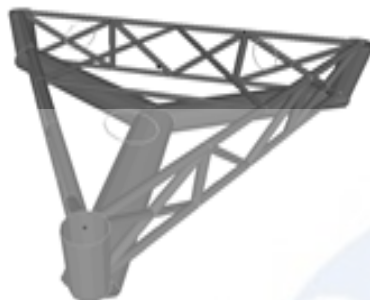
شکل 1) مدل سازه در نرم افزار USFOS

2-1 اتصال پایه به بدنه

این جک آپ از تولیدات فرید و گلدمن است که اطلاعات مربوط به سیستم بالابر آن از طریق اختراعات ثبت شده ی موجود بدست آمده است. با توجه به نوع اتصال و هدف مطالعات، اتصال پایه به بدنه گیردار فرض شده است.

2-2 اتصال پایه به اسپادکن

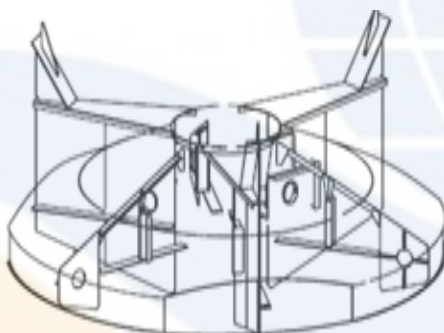
به منظور اجتناب از تمرکز تنش در اثر تغییر ناگهانی سختی پایه به سختی اسپادکن یک چشمه ی واسط در انتهای پایه در نظر گرفته می شود که سختی بیشتری نسبت به مقطع پایه دارد. در این مطالعات، این چشمه عیناً در مدل با جزئیات کامل، مدل شده است (شکل 2).



شکل 2) اتصال پایه به اسپادکن

2-3 اسپادکن

المان های اسپادکن تقریباً با سختی های متناظر با مدل فیزیکی آن در مدل با جزئیات کامل ارائه شده است (شکل 3).



شکل 3) اسپادکن

2-4 شرایط محیطی

تحلیل ها با استفاده از داده های شرایط محیطی منطقه ای در خلیج فارس انجام گردیده است. تراز های مختلف آب در جدول 2 ارائه شده است.

تحلیل های دینامیکی یقینی با استفاده از پارامترهای موج حداکثر انجام شده است (جدول 3). سرعت حداکثر جریان در جدول 4 ارائه شده است. اندرکنش موج و جریان در نظر گرفته شده است.

تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی و روئیدنی های گیاهی در عمق بر اساس اطلاعات جمع آوری شده، لحاظ گردیده است (جدول 5 و 6). بر اساس داده های خاک و استفاده از جداول طبقه بندی موجود در مرجع [9]، خاک در طبقه ی رس های سخت قرار می گیرد. نسبت تخلخل 0.6 و وزن مخصوص خشک $17 \frac{kN}{M^3}$ است.

جدول 2) ترازهای آب

Water levels	
lowest astronomical tide (LAT)	75.37
Mean See Level	76.37
Highest Astronomical Tide(HAT)	77.37

جدول 3) پارامترهای موج

مشخصات موج		
پریود بازگشت	موج حداکثر	
	ارتفاع	پریود
100 سال	12.2	11.0

جدول 4) سرعت جریان

عمق	100 سال
سطح آب	1.28
وسط عمق	1.28
1.0 m بالای کف	0.78
0.5 m بالای کف	0.71

جدول 5) روئیدنی های گیاهی

روئیدنی های گیاهی	
افزایش ضخامت روی شعاع	تراز نسبت به تراز Lat
75 mm	+2.00 m
	-6.00 m
50 mm	از -6.00 m تا بستر

جدول 6) ضرایب هیدرو دینامیکی

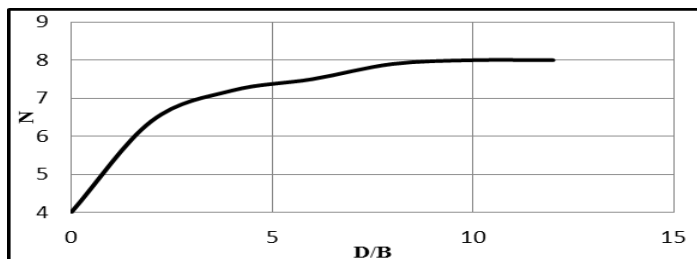
ضرایب هیدرو دینامیکی برای اعضای استوانه ای		
شرایط سطح	C_{Di}	C_{Mi}
نرم	0.65	2.0
زبر	1.00	1.8

3- اندرکنش خاک- شالوده

در این مطالعات ابتدا با استفاده از مشخصات خاک، ظرفیت باربری اسپادکن محاسبه شده است. رابطه ی ظرفیت باربری، رابطه ی مایر هوف است که با انجام اصلاحاتی برای در نظر گرفتن وزن خاک بر روی آن در SNAME آورده شده است [2]. با رسم ظرفیت باربری در برابر نفوذ، عمق نفوذ مورد نیاز پیش بارگذاری تعیین گردیده و بر اساس آن، مختصات قائم نقطه استقرار تکیه گاه مشخص شده است [1]. سختی هم بسته فنرهای الاستوپلاستیکی غیرخطی برای مدلسازی اندرکنش خاک- شالوده در نرم افزار USFOS با استفاده از یک قانون جریان، یک قانون سخت شوندگی و یک سطح تسلیم محاسبه گردیده است [10].

3-1 نفوذ پایه طی پیش بارگذاری

اگر $D \leq \frac{NS_u}{\gamma}$ ، می توان از سرریز خاک در رس ها صرف نظر کرد.



شکل 5) ضریب پایداری برای رس [2]

بر اساس مقادیر S_u و با استفاده از رابطه ی (3) مدول برشی خاک رس به دست می آید.

(3)

$$G = S_u \times \frac{600}{OCR^{0.25}}$$

در روابط فوق :

OCR: ضریب پیش تحکیم

S_u : مقاومت برشی زهکشی نشده ی خاک

q_u : ظرفیت باربری خاک

γ' : وزن مخصوص غوطه ور خاک

B : قطر سطح تماس

D_F : عمق نفوذ

A : سطح تماس اسپادکن با خاک

V : حجم خاک جابه جا شده

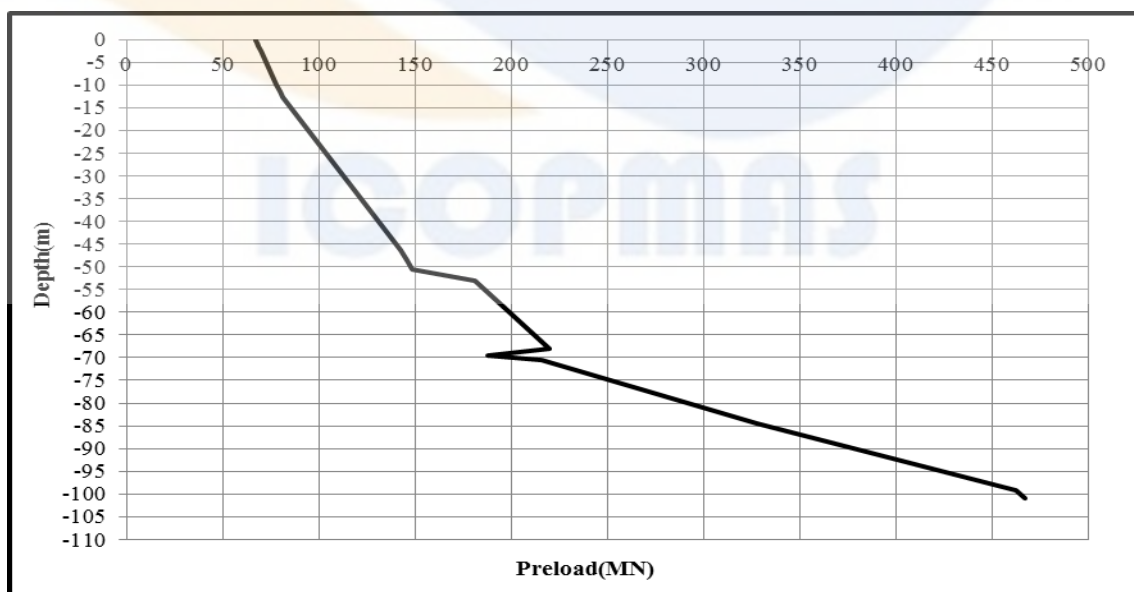
L : طول شالوده ی نواری

S_c : ضریب شکل

N_c : ضریب ظرفیت باربری

d_c : ضریب عمق نفوذ

با استفاده از رابطه ی (1) ، منحنی ظرفیت باربری در برابر عمق رسم می شود (شکل 6).



شکل 6) نمودار ظرفیت باربری در برابر عمق

مقدار پیش بارگذاری حدود 1 تا 2 برابر بار کل وارده بر سازه تخمین زده می شود [9 و 8]. سهم بار هر اسپادکن حدود 40 MN است. بنابراین مقدار پیش بارگذاری برای هر پایه تقریباً برابر با 60-80 MN می شود.

3-2 تعیین محل نقطه اثر عکس العمل تکیه گاهی

محل این نقطه بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی و میزان نفوذ تعیین و هر نوع مدل تکیه گاهی در این نقطه مستقر می شود. [1] موقعیت آن در امتداد قائم نسبت به نوک اسپادکن به تقریب عبارت است از:

- نصف نفوذ پیش بینی شده، اگر نفوذ اسپادکن کامل نباشد.

- نصف ارتفاع اسپادکن، اگر اسپادکن کاملاً در خاک فرو رود.

بر اساس منحنی شکل (6)، عمق نفوذی تقریباً برابر با ارتفاع اسپادکن مورد نیاز است. بنابراین مدل تکیه گاهی در نصف ارتفاع اسپادکن تعریف می شوند.

3-3 مدل تکیه گاهی مورد بررسی در این مطالعات

مدلسازی اندرکنش خاک-سازه با فنرهای غیرخطی انجام می شود که با یک سطح تسلیم و یک قانون جریان و یک قانون سخت شوندگی تعریف می گردد.

سطح گسیختگی یک ترکیب خطی از سطح جاری شدن اولیه f_y و سطح مرزی f_u است. تابع G به زاویه ی دوران پلاستیکی بستگی دارد. قانون جریان اندازه نسبی بردار جابه جایی پلاستیکی در هر گام افزایش را نشان میدهد. قانون جریان می تواند هم بسته⁵ یا نایسته⁶ استفاده شود. [11]

$$f(H, V, M) = \sqrt{\left(\frac{M}{2R_E V_P}\right)^2 + \left(\frac{H}{V_P}\right)^2} - 0.5 \left(\frac{V}{V_P}\right) \left(1 - \left(\frac{V}{V_P}\right)\right) \leq 0 \quad (4)$$

$$f = f_y + (f_u - f_y)G \quad (5)$$

$$G = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\theta_p}{\theta_p}\right)^2}, \bar{\theta}_p = 1.4 \frac{2R_E V_P}{k_{\theta}^{elastic}} \quad (6)$$

V_P : پیش بارگذاری

H : برش پایه

M : لنگر واژگونی

V : بار قائم

Re : شعاع سطح تماس

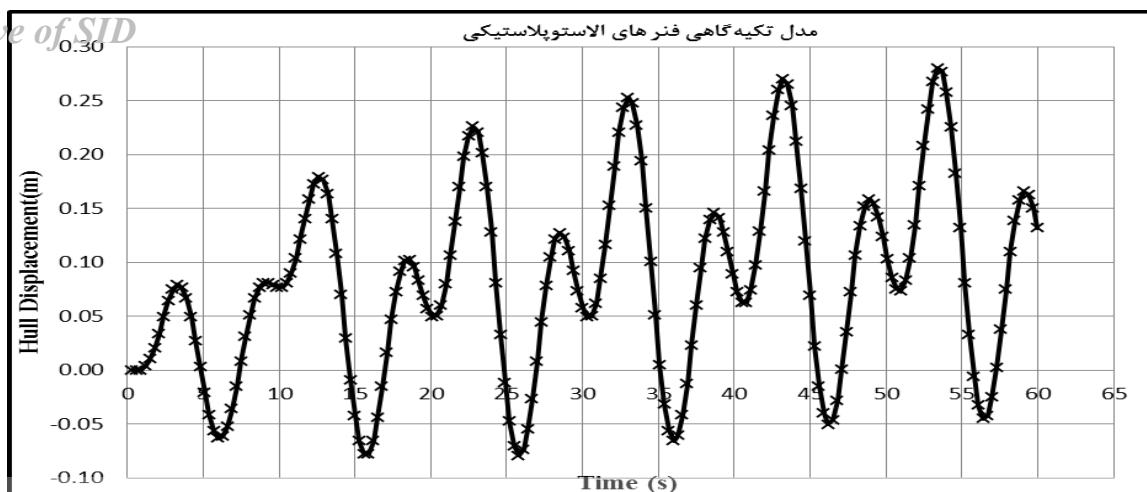
4- تحلیل های دینامیکی غیرخطی یقینی در مقابل موج حداکثر

در این قسمت، تحلیل دینامیکی غیرخطی یقینی روی مدل سه بعدی اجزای محدود هم ارز، در مقابل موج حداکثر انجام پذیرفته و مقدار حداکثر پاسخ سری زمانی تغییر مکان، برش و لنگر واژگونی مشخص شده است.

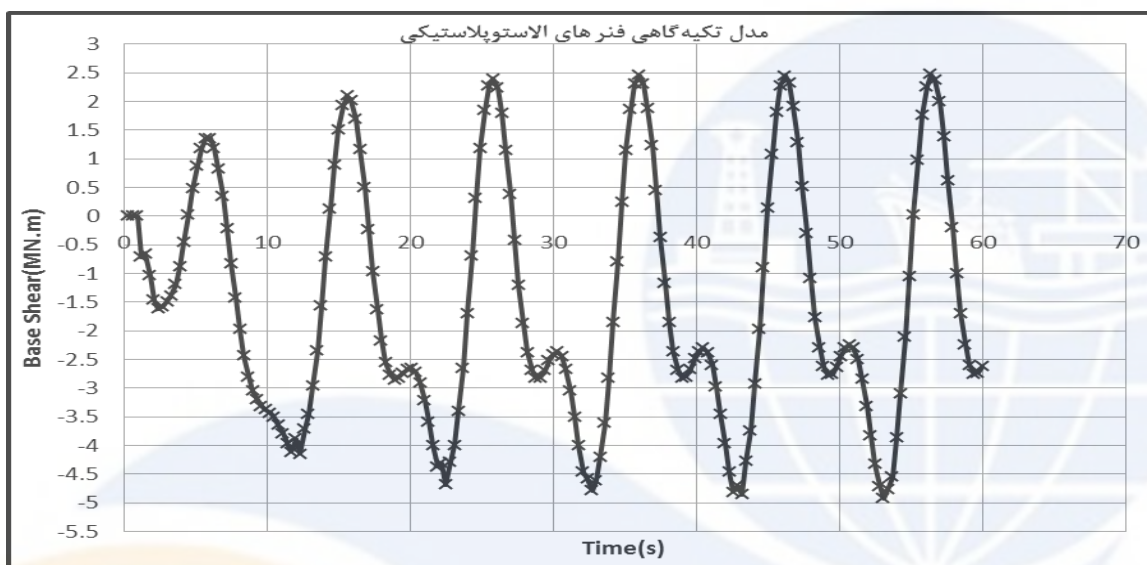
سری های زمانی پاسخ در شکل های 7 و 8 و 9 ارائه شده است. با افزایش زمان تحلیل مشاهده می شود که در سری زمانی پاسخ کل، پاسخ پایا غالب و پاسخ گذرا اثر زیادی بر پاسخ کل ندارد (جدول 7).

⁵ -Associated Flow rule

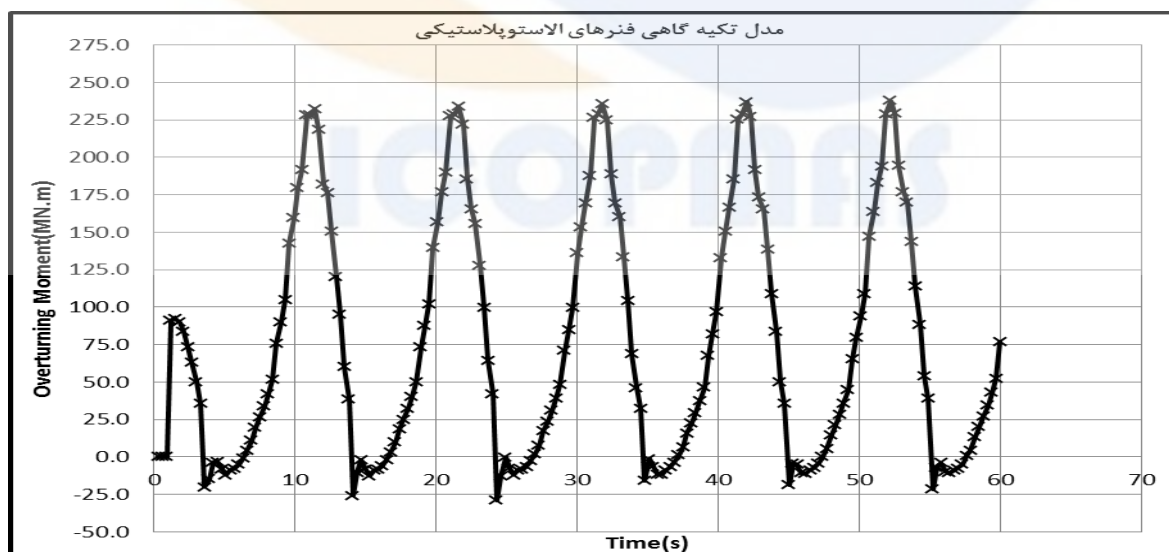
⁶ -Nonassociated Flow rule



شکل 7) پاسخ تغییر مکان دینامیکی در مقابل موج $H=12.20\text{ m}$, $T=11.0\text{ s}$



شکل 8) پاسخ برش پایه دینامیکی در مقابل موج $H=12.20\text{ m}$, $T=11.0\text{ s}$



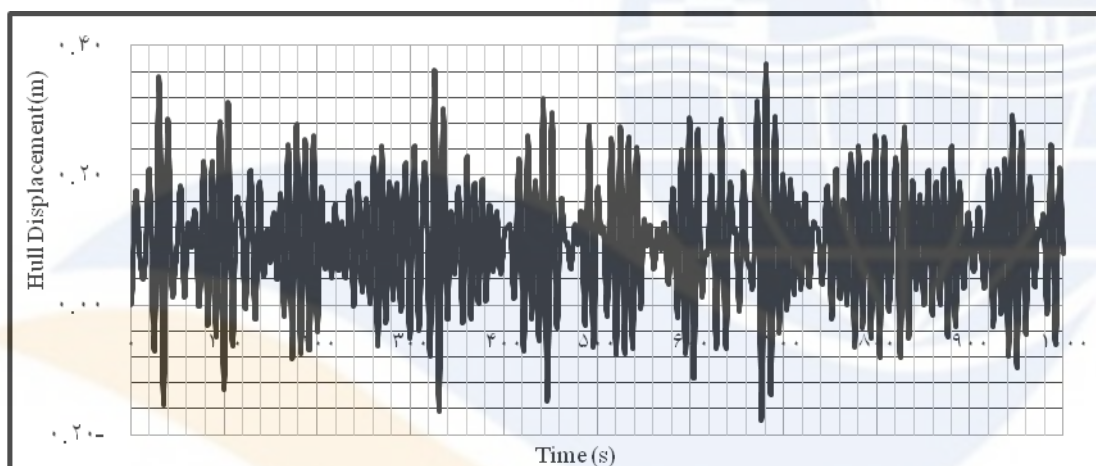
شکل 9) پاسخ لنگر واژگونی دینامیکی در مقابل موج $H=12.20\text{ m}$, $T=11.0\text{ s}$

جدول 7) پاسخ حداکثر دینامیکی سازه با مدل تکیه گاهی فنرهای الاستوپلاستیکی در مقابل موج $H=12.2$ m , $T=11.0$ s

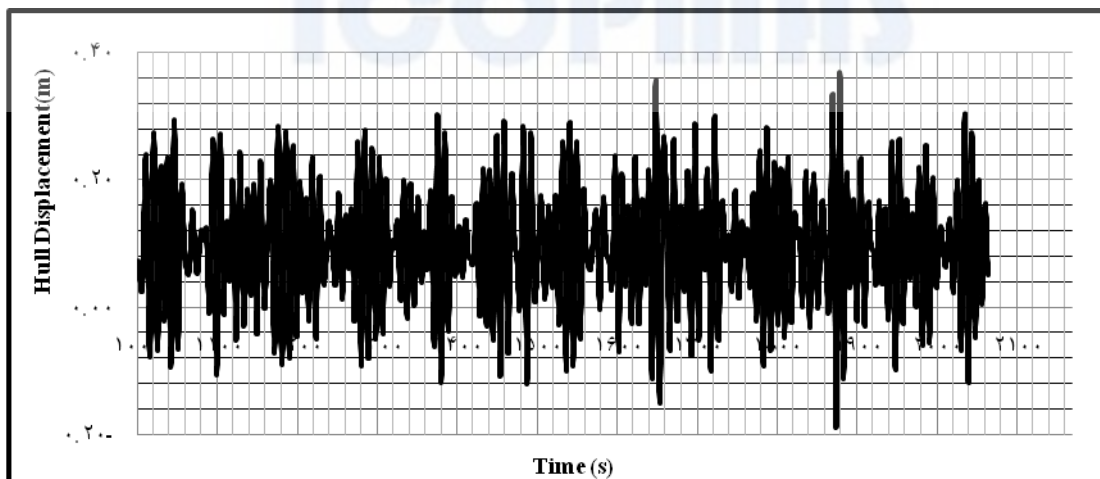
پاسخ های حداکثر		نوع پاسخ
پایا	جمع گذرا و پایا	
0.3021	0.2884	تغییر مکان (m)
2.47	2.49	برش پایه (MN)
237	238	لنگر واژگونی (MN.m)

5- تحلیل های دینامیکی غیرخطی تصادفی

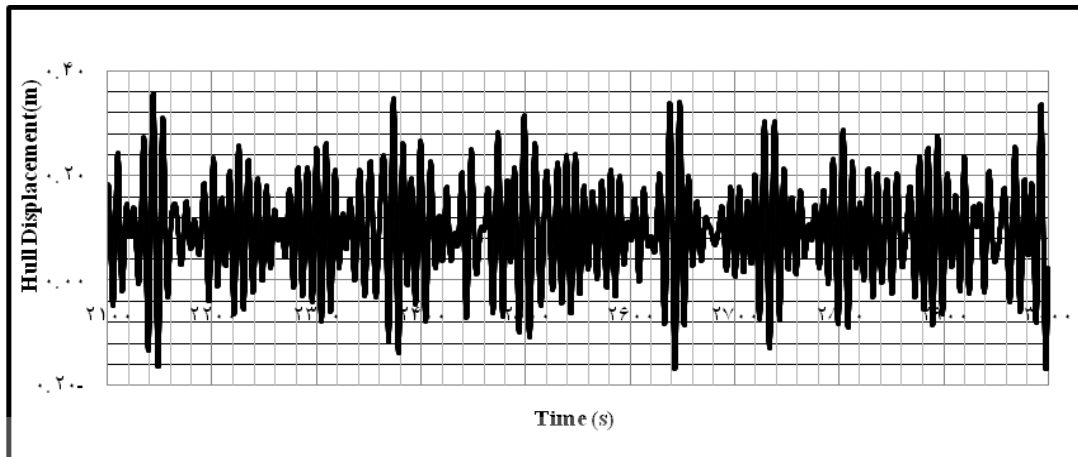
در این قسمت، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تصادفی بر روی سازه مورد نظر با مدل طیفی هم ارز موج حداکثر انجام شده است با مطالعه و بررسی توزیع های آماری گوناگون، توزیع ویبول برای برازش نتایج پاسخ ها مناسب ترین تشخیص داده شد و مبنای تعیین پاسخ های حداکثر قرار گرفت؛ در شکل (10)، مراحل انجام کار برای پاسخ تغییر مکان به عنوان نمونه دیده می شود. اولین مرحله، تحصیل پاسخ های سری زمانی است، شکل (10-الف) دیده شود. سپس توزیع تابع چگالی والد و حداکثر از پاسخ های سری زمانی ترسیم شده است. شکل (10-ب) دیده شود. مدل توزیع ویبول به توزیع حداکثر پاسخ ها برازش یافته است



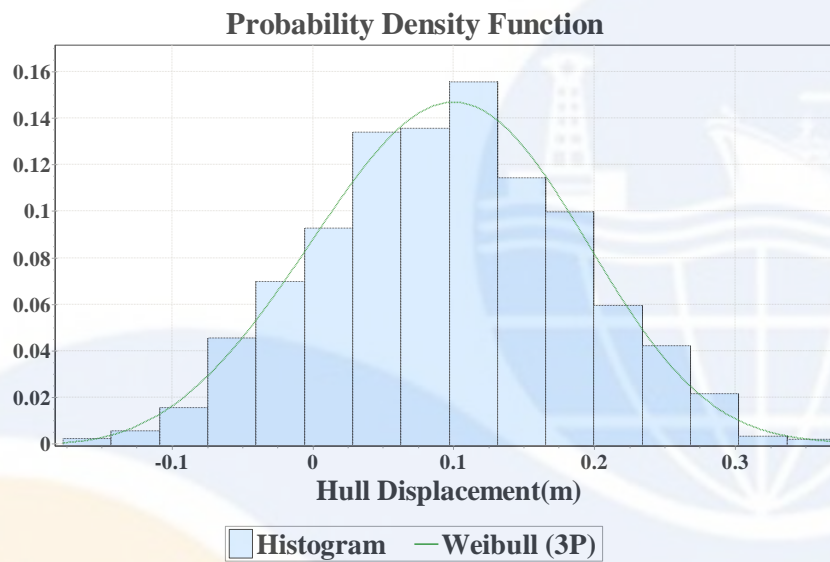
شکل 10-الف) سری پاسخ در مدت زمانی 1000 ثانیه اول



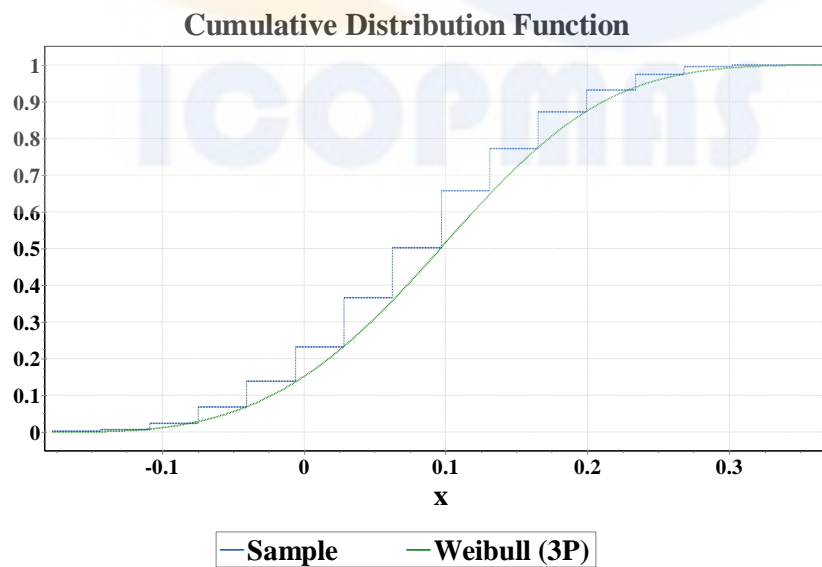
شکل 10-ب) سری پاسخ در مدت زمانی 1000 ثانیه دوم



شکل 10-الف) سری پاسخ در مدت زمانی 1000 ثانیه سوم



شکل 10-ب) برازش توزیع ویبل



شکل 10-ج) تعیین محتملترین پاسخ حداکثر از توزیع تجمعی

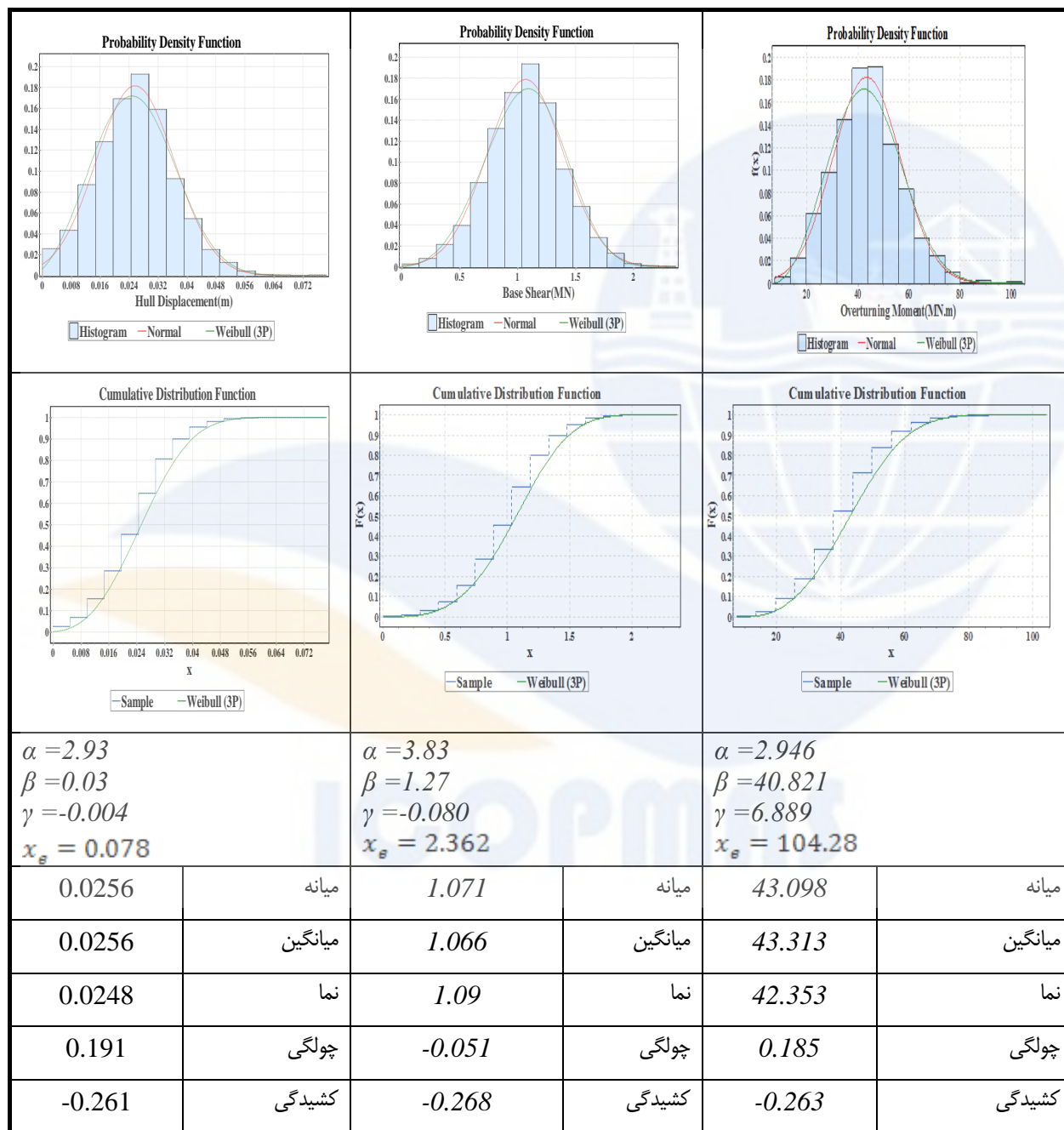
سپس ضرایب منحنی توزیع ویبول برای هر یک از مجموعه پاسخ‌ها تعیین گردیده و مقدار حداکثر پاسخ‌ها با استفاده از پارامترهای توزیع برازش یافته محاسبه شده است (رابطه 7 و 8).

$$x_{ext} = \gamma + \beta(\ln N)^{1/\alpha} \quad (7)$$

$$N = d \times \frac{n_s}{T} \quad (8)$$

شاخص‌های جامعه‌ی آماری پاسخ‌های تحلیل دینامیکی تصادفی برای نتیجه‌گیری و قضاوت درباره‌ی وضع توزیع جامعه آماری محاسبه شده‌اند که در جدول 8 ارائه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توزیع پاسخ تغییر مکان غیر گوسی بوده و نسبت به سایر پاسخ‌ها چولگی بیشتری دارد.

جدول 8) پاسخ تغییر مکان



α : پارامتر شکل

β : پارامتر اندازه

γ : پارامتر موقعیت

در تحلیل تصادفی، تفسیر نتایج زمان بر و دارای اهمیت زیادی است و کاملاً متفاوت از نحوه ی تفسیر نتایج در تحلیل یقینی است. پس از انجام تحلیل ها، بایده سری های زمانی پاسخ ها را که همان فضاهای نمونه ی پاسخ هستند، مرتب و طبقه بندی کرد. بعد از انجام این کار می توان ارزش های مورد نظر را از آن جدول مورد محاسبه قرار داده تا بتوان از آن ها بعنوان معیارهایی جهت مقایسه، تعبیر و یا تفسیر نتایج استفاده کرد. از مقایسه پاسخ های تحلیل های تصادفی و یقینی نتیجه میشود که در تحلیل های یقینی به علت تعریف موجی معین و ثابت در زمان، پاسخ ها در مقایسه با پاسخ های تحلیل های تصادفی مقادیر متفاوت و عموماً بیشتری دارند و تفاوت مقادیر پاسخ های تغییرمکان، (که بیش از پاسخ های دیگر متأثر از رفتار تعاملی خاک- شالوده است) بیشتر از سایر پاسخ هاست که نشانگر تغییر حوزه رفتار مدل شالوده از خطی در تحلیل تصادفی به غیرخطی در تحلیل یقینی است. بنابراین برای بررسی پاسخ دینامیکی به امواج مختلف، پارامترهای وابسته ای هم چون ارتفاع یا پرید موج به تنهایی نمی توانند منعکس کننده ی تعامل موج وسازه و خاک باشند، استفاده از پارامترهای جامع تری نظیر انرژی طیفی موج منطقی تر به نظر می رسد.

7- مراجع

- [1] "Strength Analysis of main Structures Of Self Elevating Units", DetNorsekVeritas Classification, 1992
- [2] MSL Engineering Limited, "Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity", Health and Safety Executive 2004
- [3] B. Bienen, M. Cassidy "Simulation of the soil-structure-fluid interaction of offshore jack-up structures ", 2005
- [4] M.J. Cassidy, G.T. Houlsby, M. Hoyle, M.R. Marcom "Determining Appropriate Stiffness Levels For Spudcan Foundations Using JACK-UP Case Records ", OMAE2002
- [5] I. Temperton, R.W.P. Stonor, C.N. Springett "Measured spudcan fixity: analysis of instrumentation data from three North Sea jack-up units and correlation to site assessment procedures", Marine Structures 12, 1999
- [6] Jorgen Amdahl, AtleJohansen ,GeirSvano "Ultimate Capacity of Jack ups Considering Foundation Behaviour", Marine Structure, 1989
- [7] "Dynamic Analysis Procedure For Self Elevating Drilling Units", American Bureau of Shipping, 2004.
- [8] M.Daghigh , "A New Formulation For Equivalent Hydrodynamic Modeling of The Jack-up Legs", OMAE, 2002
- [9] Braja. M. Das "Principles Of Foundation Engineering", 1941
- [10] USFOS- A Computer program for Progressive Collapse Analysis of Steel Offshore Structures, Theory Manual
- [11] Jorgen Amdahl, AtleJohansen ,GeirSvano "Ultimate Capacity of Jack ups Considering Foundation Behaviour", Marine Structure, 1989

