

(مقاله پژوهشی)

ارزیابی پاسخ مدل‌های اندرکنشی خاک-شمع-سازه در جاکت نگهدارنده توربین بادی

ناصر شابختی^۱، سید سعید طباطبائی^۲، کورش خداوردی^۳

shabakhty@iust.ac.ir

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
 ۲و۳- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

مدل‌های مختلفی برای بررسی رفتار اندرکنش خاک-سازه و شمع در سازه‌های نگهدارنده توربین‌های بادی استفاده می‌شود که می‌تواند بر روی پاسخ سازه دریایی تاثیر قابل توجهی بگذارد. در این تحقیق تلاش گردیده پاسخ سازه دریایی توربین بادی را برای سه مدل ساده‌سازی شده اندرکنش خاک-شمع-سازه شامل روش طول پایداری با طول‌های مختلف ۲، ۴، ۶ و ۸ برابر قطر شمع، ماتریس سختی و فنرهای مستقل بدست آورده و با مدل پیچیده تیر بر روی بستر غیر خطی وینکلر^۱ به عنوان مدل مرجع، مقایسه شود. نتایج بدست آمده از تحلیل سازه‌دریایی برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که از میان روش‌های مختلف اندرکنش خاک، شمع و سازه روش طول پایداری با عمق گیرداری هشت برابر قطر شمع بهترین تطابق را با مدل مرجع دارد و به عنوان روشی ساده با محاسباتی محدود می‌تواند کمک شایانی به مهندسی در طراحی و تحلیل سازه کند.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک-سازه-شمع، سازه‌های نگهدارنده توربین بادی، تیر بر روی بستر غیر خطی وینکلر.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۹/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۱۱/۲۲

صص ۹۷-۱۰۴

^۱ Winkler

۱ - مقدمه

بر مبنای بررسی‌های انجام شده تخمین زده می‌شود که جهان در سال ۲۰۳۰ حدود ۵۰٪ بیشتر از الان نیاز به انرژی داشته باشد که در صورت ادامه داشتن سیاست‌های موجود در مورد سوخت‌های فسیلی گازهای گلخانه‌ای آزاد شده حدود ۵۵٪ بیشتر خواهند شد و موجب تغییرات اقلیمی غیر قابل بازگشتی خواهند شد که این تغییرات در ادامه می‌تواند سبب ایجاد سیل‌های مخرب، گردبادها، و خشک سالی گردند [۱].

بنابراین به یک سیاست کلی برای تولید انرژی همراه با حفظ محیط زیست نیاز است. از میان منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر، استفاده از نیروی باد بسیار مورد توجه بوده و سازه‌های توربین بادی بخصوص فراساحلی می‌توانند بهترین گزینه برای تولید انرژی‌های سبز باشند. سازه‌های توربین بادی فراساحل را می‌توان به عنوان سازه دریایی لاغر با سختی دینامیکی پایین در نظر گرفت که تحت تاثیر اندرکنش پیچیده‌ای بین سازه، خاک، موج دریا و باد می‌باشد [۲].

اولین نوع از توربین‌های بادی فراساحلی ثابت که مورد استفاده قرار گرفته است معمولاً تا عمق ۳۰ متر قابل استفاده بوده‌اند. در مواقعی که عمق آب بیشتر از ۳۰ متر می‌باشد استفاده از سازه‌های تک شمع مقرون به صرفه نخواهد بود. بنابراین سازه‌های جاکت که دارای المان‌های لوله‌ای شکل هستند بهترین گزینه برای استفاده در این اعماق می‌باشند و حدود ۳۵ درصد از توربین‌های بادی نصب شده را تشکیل می‌دهند [۳].

آژانس بین‌المللی انرژی^۱ پروژه‌هایی را با هدف بررسی انواع مدل سازی توربین‌های بادی فراساحلی تعریف نمود. این پروژه‌ها با عناوین^۲ OC3 [۴] و OC4^۳ [۵] در کارگروه سی ام^۴ آژانس بین‌المللی انرژی بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت. در فاز اول پروژه OC4 توربین ۵ مگاواتی [۶] طراحی شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر^۵ وابسته به دپارتمان انرژی ایالات متحده که به وسیله سازه جاکت‌های فلزی در عمق آب ۵۰ متری دریا شمال نصب می‌شود مورد بررسی قرار گرفت [۷].

بارهای دینامیکی و تناوبی حاصل از حرکت چرخشی دواره^۶ توربین در حین حرکت، عدم تقارن جرم، تغییرات در شدت باد، نیروی امواج و جریان‌های دریایی سبب ایجاد بارهای دینامیکی مختلفی در سازه و به تبع آن در فونداسیون این سازه‌ها می‌گردد که طراحی فونداسیون این نوع از سازه‌های دریایی هنوز یک چالش بزرگ برای مهندسان به حساب می‌آید. معمولاً برای اتصال سازه به خاک از شمع کوبی استفاده می‌شود. ابهامات بسیاری در زمینه رفتار جانبی دینامیکی شمع‌ها و سازه‌های آنها و اندرکنش خاک و شمع و سازه باقی است و لازم است کارهای تحقیقاتی بیشتری در این زمینه صورت گیرد [۸].

برای این تحقیق از سازه جاکت OC4 و بر مبنای مشخصات و اطلاعات ارائه شده در گزارش فنی توسط آژانس بین‌المللی انرژی استفاده شده است. سازه نگهدارنده توربین بادی مورد بررسی در این تحقیق برای آب تا عمق ۵۰ متری طراحی شده است. جاکت چهار پایه و در چهار سطح مختلف دارای مهاربندی ضربدری می‌باشد.

در انتهای هر پایه یک شمع با عمق نفوذ ۴۵ متر و قطر خارجی ۲,۰۸۲ متر و ضخامت ۶۰ میلی‌متر که به وسیله گروت به پایه‌های اصلی متصل شده است قرار می‌گیرد. بر روی جاکت یک بلوک بتنی قرار دارد که برج مخروطی شکل به ارتفاع ۶۸ متر داخل آن مهار شده است. ارتفاع سازه از بستر دریا تا بالای این بلوک ۷۰,۱۵ متر است. فاصله مرکز تیغه‌ها از سطح دریا ۹۰,۵۵ متر است. خاک بستر دریا از چند لایه مختلف ماسه تشکیل شده است که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه گردیده است. شکل شماتیک سازه جکت در شکل (۱) و مشخصات اجزای مختلف آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات لایه‌های خاک.

Depths(m)	γ (N/m ³)	ϕ (Deg)
0-3	10000	38
3-5	10000	35
5-7	10000	38
7-10	10000	38
10-15	10000	42
15-50	10000	42.5

⁴ Task 30⁵ National Renewable Energy Laboratory (NREL)⁶ Rotor¹ International Energy Agency (IEA)² Offshore Code Comparison Collaboration³ Offshore Code Comparison Collaboration

Continued

الف) مدل تیر بر روی بستر غیر خطی وینکلر(مدل مرجع)

این مدل که در این تحقیق به عنوان مدل مرجع نیز نامیده شده بر اساس تئوری وینکلر بیان می‌گردد که در آیین نامه API به عنوان مدل مینای اندرکنش خاک-سازه-شمع معرفی شده است. با توجه به ضوابط ارایه شده در آیین نامه [۱۱] API(RP 2A-WSD) منحنی های نیرو - تغییر مکان خاک براساس روابط زیر است.

$$p_{us} = (C_1 * H + C_2 * D) * \gamma * H \quad (1)$$

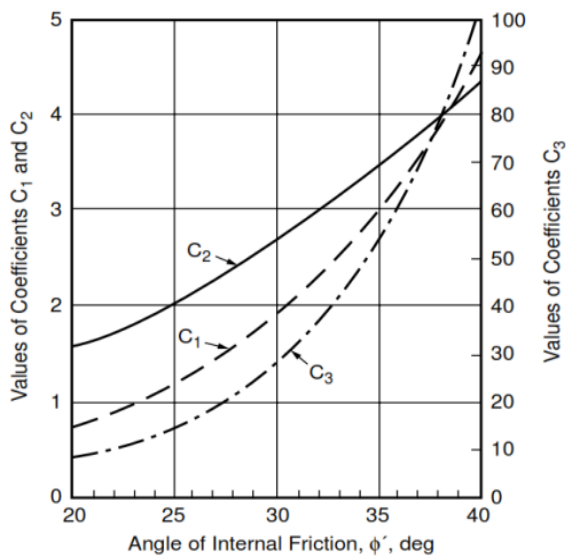
$$p_{ud} = C_3 * D * \gamma * H \quad (2)$$

$$P_u = \min(p_{us}, p_{ud}) \quad (3)$$

P_u مقاومت نهایی خاک، γ وزن مخصوص موثر خاک، H عمق، D قطر شمع، C_1 ، C_2 ، C_3 ضرایب ثابتی بوده که تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک هستند و از روی شکل (۳) بدست می‌آید. و در نهایت رابطه مقاومت جانبی- تغییر مکان ($P-y$) خاک که غیر خطی است در هر عمق از رابطه زیر بدست می‌آید

$$P = A * p_u * \tanh \left[\frac{k * H * y}{A * p_u} \right] \quad (4)$$

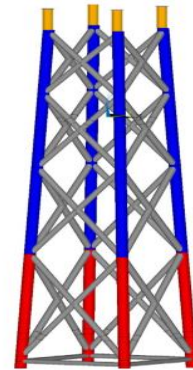
K مدول واکنش بستر است و تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک است. در نهایت در برنامه با استفاده از المان COMBIN39 که یک فنر غیرخطی می‌باشد مقادیر مختلف منحنی های $P-y$ به مدل اضافه شده است.



شکل (۳) تعیین ضرایب C [۷]

۲- معرفی مدل‌های مختلف اندرکنش خاک-شمع-سازه

برخلاف شمع‌های موجود در خشکی که عموماً باید بارهای قائم و گرانشی را تحمل کنند، شمع‌های به کار برده شده در سازه‌های دریایی باید علاوه بر بارهای قائم بارهای جانبی ناشی از زلزله، موج، جریان و باد را نیز تحمل کنند. مطابق بیان ولف^۱ اندرکنش خاک-شمع-سازه پدیده‌ای است که در آن رفتار خاک بر پاسخ سازه موثر است و بلعکس رفتار سازه بر پاسخ خاک به نیروهای خارجی نیز می‌تواند موثر باشد [۹]. بارگذاری خارجی وارد بر سازه دریایی با توجه به نوع خاک و ماهیت سازه می‌تواند پاسخ سازه را تشدید یا کاهش دهد و تنش‌های موجود در هر نقطه از خاک می‌تواند به نیرو و کرنش‌های سایر نقاط وابسته باشد. در نظر گرفتن این اثر در محیط پیوسته الاستیک به حدی سبب پیچیده شدن توزیع تنش بین خاک و شمع و سازه می‌شود که عملاً ارزیابی دقیق آن کاری سخت و مشکل خواهد بود. وینکلر در سال ۱۸۶۷ فرض کرد که کرنش خاک در هر نقطه فقط ناشی از تنش‌های موجود در همان نقطه است و تحت تاثیر سایر نقاط نیست و نیز هیچ تنش برشی بین لایه‌های خاک منتقل نمی‌شود بر اساس همین فرضیات او محیط پیوسته خاک را با فنرهای مستقل مدل کرد [۱۰].



شکل (۱) شکل جاکت.

جدول (۲) مشخصات اعضای جاکت.

Set	Component	Color	Outer diameter (m)	Thickness (mm)
1	X and mud braces	grey	0.8	20
2	leg at lowest level	red	1.2	30
3	leg2 to 4 level	blue	1.2	25
4	leg crossing TP	orange	1.2	40

¹ Wolf

ب) مدل طول پایداری

این روش در واقع ساده‌ترین روش برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع-سازه است که در مدلسازی شمع‌های اسکله‌های شمع و عرشه بسیار رایج است. در این روش مقاومت خاک در طول شمع حذف شده و فرض می‌شود که شمع تنها در طول محدودی حضور دارد و در انتهای آن طول، شمع کاملاً صلب و بدون هیچ گونه تغییر مکانی است. برای تعیین این طول محدود، روشی در مرجع [۱۲] ارائه شده است که با توجه به اینکه پروفیل خاک در محل نصب سکو مورد مطالعه، کاملاً غیریکنواخت است و جنس آن از لایه‌ای به لایه دیگر مرتباً در حال تغییر است، برای برآورد مقدار طول گیرداری، از این دیدگاه استفاده شده است که "رفتار خمشی شمعی با طول گیرداری مشخص که ضریبی از قطر شمع می باشد باید معادل رفتار خمشی مدل مرجع باشد". با استفاده از این دیدگاه، مقدار طول گیرداری برای شمع‌ها تابعی از قطر شمع به صورت 6D, 4D, 2D و در نهایت 8D در نظر گرفته شده است.

ج) مدل فنرهای مستقل

در این مدل سختی شمع در نوک آن توسط فنرهای مستقل از هم شبیه‌سازی می‌شود که سختی این فنرها تابع مشخصات خاک است. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط فلمینگ^۱ و همکاران سختی انتقالی در راستای افق و دورانی نوک شمع در بستر دریا را می توان از روابط زیر بدست آورد [۱۳]

$$K_r = \frac{k}{\sqrt{2}} \left(\frac{4}{L_c}\right)^{-3} \quad (5)$$

$$K_t = \frac{k}{\sqrt{2}} \left(\frac{4}{L_c}\right)^{-1} \quad (6)$$

$$L_c = 4 \left(\frac{EI_P}{4k}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

که در آن $k(N/m^2)$ مدول واکنش بستر و L_c طول بحرانی شمع می‌باشد. برای مدل سازی این فنرها در برنامه اجزا محدود انسیس از المان COMBIN14 که یک فنر خطی دو گره‌ای است استفاده شده است.

د) مدل ماتریس سختی

زندولف^۲ [۱۴] در سال ۱۹۸۱ یک آنالیز ابعادی و تحلیل

اجزا محدود بر روی شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی انجام داد. وی شمع را در محیط پیوسته الاستیک در نظر گرفت و با فرض افزایش خطی مدول برشی خاک در عمق رابطه‌ای برای انعطاف پذیری راس شمع ارائه کرد.

$$K_{x\theta} = K_{\theta x} = -2.4m^* r_0^3 \left[\frac{E_P}{m^* r_0} \right]^{\frac{5}{9}} \quad (8)$$

$$K_{\theta\theta} = 2.16m^* r_0^4 \left[\frac{E_P}{m^* r_0} \right]^{\frac{7}{9}} \quad (9)$$

$$K_{xx} = 4.52m^* r_0 \left[\frac{E_P}{m^* r_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$m^* = m \left(1 + \frac{3}{4} \nu\right) \quad (11)$$

$$E_P = \frac{EI}{\frac{1}{64} \pi D^4} \quad (12)$$

با تخصیص ماتریس حاصل به جای شمع و محیط خاک مدل سازی تکمیل می شود و در نهایت اعمال بارگذاری هیدرودینامیکی و تحلیل دینامیکی سازه انجام شده است.

۳- نیروی موج

نیروی موج، عموماً با معادله متداول موریسون که در رابطه (۱۳) داده شده بدست می آورند. معادله موریسون نیروی موج را به صورت مجموع دو نیروی اینرسی و نیروی دراگ، در واحد طول بیان می‌کند. نیروی اینرسی، با شتاب نسبی سیال و سطح مقطع عضو سازه‌ای و نیروی دراگ با توان دوم سرعت نسبی سیال و قطر عضو سازه‌ای متناسب است. ضرایب پسا و اینرسی به صورت تجربی مشخص می‌گردند و به پارامترهای بسیاری مثل اعداد رینولدز و کیلیگان-کارپنتر، نسبت زبری سطح، پیکربندی سازه وابسته هستند [۱۵]. معادله موریسون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = F_D + F_M = \frac{1}{2} \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_D Du |u| dz + \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz$$

که در آن F نیروی موج عمود بر محور عضو سازه‌ای، F_D بردار نیروی دراگ، F_M بردار نیروی اینرسی، ρ چگالی آب، C_D ضریب دراگ (پسا)، C_M ضریب اینرسی، U سرعت ذرات آب در داخل موج و D قطر عضو سازه‌ای است. باید توجه داشت که در سازه‌هایی که قطر اعضا بزرگتر از ۲۰٪ طول موج است و یا برای سازه‌های که به طور اساسی

^۱ Fleming^۲ Randolph

شده است. همانگونه که در شکل ۲ قابل رویت است کلیه روش‌ها جابجایی سازه را کمتر از مدل مرجع تخمین زده‌اند که با توجه به مقدار فرکانس‌های طبیعی تخمین زده شده قابل توجیه است. از آنجایی که فرکانس طبیعی سازه با ریشه دوم سختی سازه متناسب است؛ هرچه فرکانس طبیعی سازه بیشتر باشد نشان می‌دهد که سازه سخت‌تر خواهد بود و در نتیجه سازه جابجایی کمتری خواهد داشت. نتایج حاصل شده نیز به خوبی این اصل را تأیید می‌کند زیرا روش طول پایداری که بهترین تطابق را از نظر تخمین بسامد طبیعی سازه داشت در این مرحله نیز بهترین تخمین را از جابجایی سازه دارد. از طرف دیگر هرچه سازه بلند تر فرض شود سختی کمتری خواهد داشت و میزان جابه جایی بیشتری خواهد داشت که این قاعده نیز در مقایسه پاسخ سازه در روش طول پایداری با طول‌های مختلف به خوبی قابل رویت است به گونه‌ای که با افزایش عمق گیرداری از 2D به 8D سختی سازه کمتر شده و پاسخ سازه به مدل مرجع نزدیک‌تر شده است.

۴-۲- نیروی موجود در اعضای سازه

نیروی برشی و محوری در دو گره از عضو سازه‌ای محاسبه شده و در این قسمت ارایه شده است. گره اول در بادبند شماره ۵۹ و گره دوم در شمع شماره ۱ در بستر دریا در نظر گرفته شده است. اشکال (۶) تا (۹) به ترتیب نیروی محوری در مهاربند، نیروی محوری در شمع، نیروی برشی در مهاربند و نیروی برشی در شمع را در مدل‌های مختلف اندرکنشی نشان می‌دهند.

همانطور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود روش طول پایداری با عمق گیرداری 8D مقدار نیروی محوری در مهاربند سازه را تنها با یک درصد کمتر از مدل مرجع ارایه می‌نماید. به همین ترتیب و با توجه به شکل شماره (۷) در مدل طول پایداری با عمق گیرداری 8D نیروی محوری در شمع با اختلاف ۳ درصد کمتر از مدل مرجع ارایه نموده است. این در حالی است که دو روش فنرهای مستقل و ماتریس سختی این مقدار را با اختلاف ۱۵ درصد کمتر ارایه کرده که بیشترین اختلاف را با مدل مرجع دارد. بدین ترتیب در تخمین نیروی محوری در اعضای انتخابی روش طول پایداری با عمق 8D بهتر از سایر روش‌ها عمل کرده و کمترین اختلاف را با مدل مرجع دارا می‌باشد.

جریان در محل را تغییر می‌دهند، نیروهای تفرق و اندرکنش هیدرودینامیکی مابین اعضای سازه بایستی در نظر گرفته شود. مقادیر انتخابی برای ضرایب پسا و اینرسی در این تحقیق به ترتیب برابر ۱ و ۲ است. با قرار دادن این داده‌ها در رابطه مقادیر نیرو در پایه‌ها و مهاربندها محاسبه می‌شود و به مدل اعمال می‌شود.

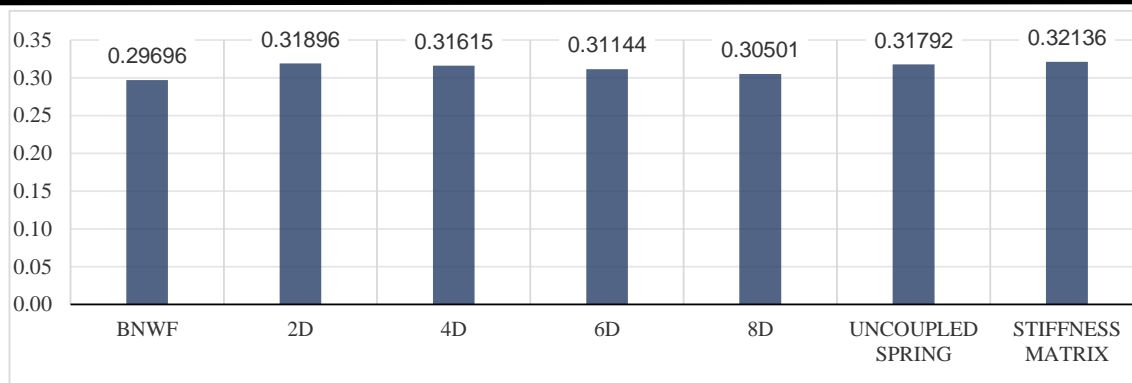
۴- نتایج و تفسیر آن‌ها

از آنالیز مودال برای تعیین خصوصیات ارتعاشی سازه که فرکانس طبیعی و شکل مودی می‌باشد، استفاده می‌شود. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است از میان روش‌های موجود روش طول پایداری که طول پایداری را ۸ برابر قطر شمع در نظر می‌گیرد بهترین تطابق را با مدل مرجع ارایه نموده و تنها ۲ درصد بیشتر از مدل مرجع مقدار فرکانس طبیعی سازه را تخمین می‌زند

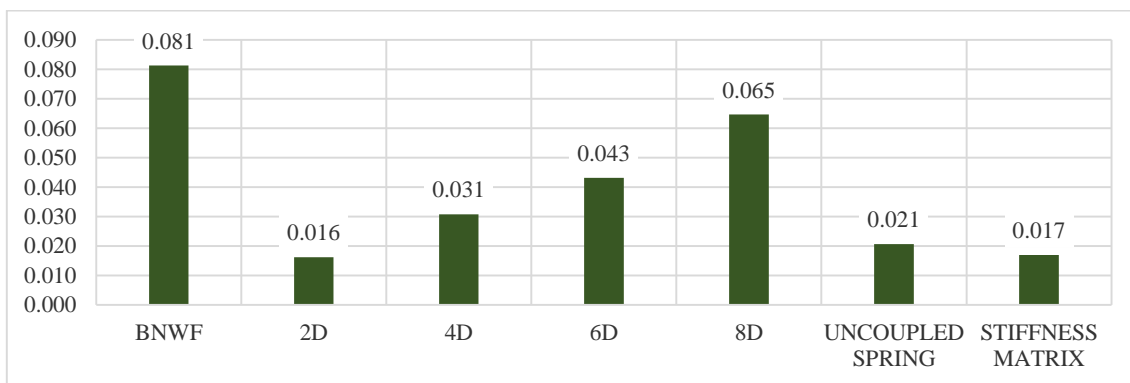
در روش طول پایداری هر چقدر طول بیشتری از شمع به عنوان طول آزاد در نظر گرفته شود میزان سختی سازه کمتر خواهد شد و هرچه مقدار سختی سازه کمتر شود میزان فرکانس طبیعی سازه کمتر خواهد شد که این مساله به خوبی در مقادیر محاسبه شده قابل رویت است. روش فنرهای مستقل و ماتریس سختی مقادیر اولین فرکانس طبیعی سازه را به ترتیب ۷ و ۸ درصد بیشتر ارایه می‌کنند و این نشان می‌دهد که سختی بیشتری را برای اندرکنش شمع و خاک در نظر گرفته‌اند. باید توجه داشت که این دو روش تابعی از خصوصیات ذاتی خاک هستند در حالی که روش طول پایداری تابعی از جنس خاک نیست و تنها تابعی از قطر شمع است. در تعیین مشخصات فنی خاک از روابط تجربی استفاده شده است و این خود یک عامل اختلاف می‌تواند باشد. همچنین با توجه به همسان نبودن خاک و لایه بندی خاک نحوه تعیین مقادیر مدول برشی معادل و ضریب واکنش بستر معادل خود می‌تواند عاملی تعیین کننده در جواب‌های به دست آمده باشد.

۴-۱- پاسخ سازه به نیروی موج

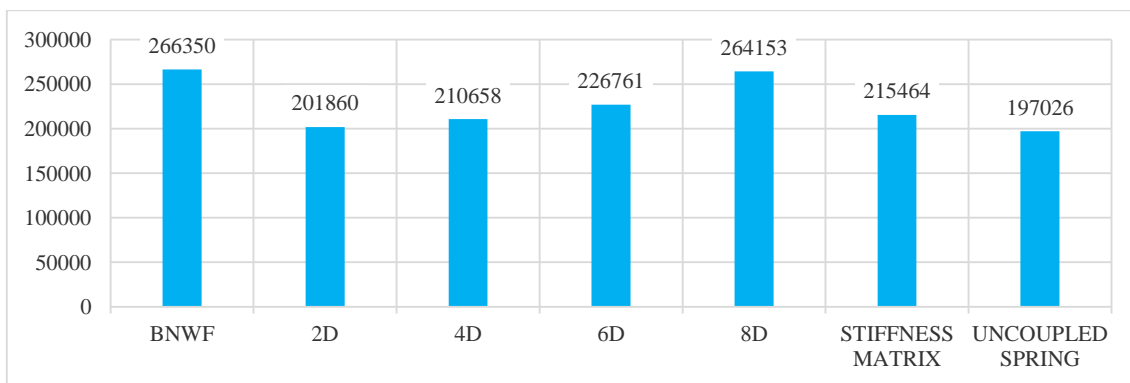
در این بخش به بررسی نحوه عملکرد سازه در مقابل نیروی حاصل از موج پرداخته می‌شود. برای این منظور حداکثر جابجایی سازه در عرشه بدست آمده و در شکل (۵) حداکثر این جابجایی در روش‌های مختلف با مدل مرجع مقایسه



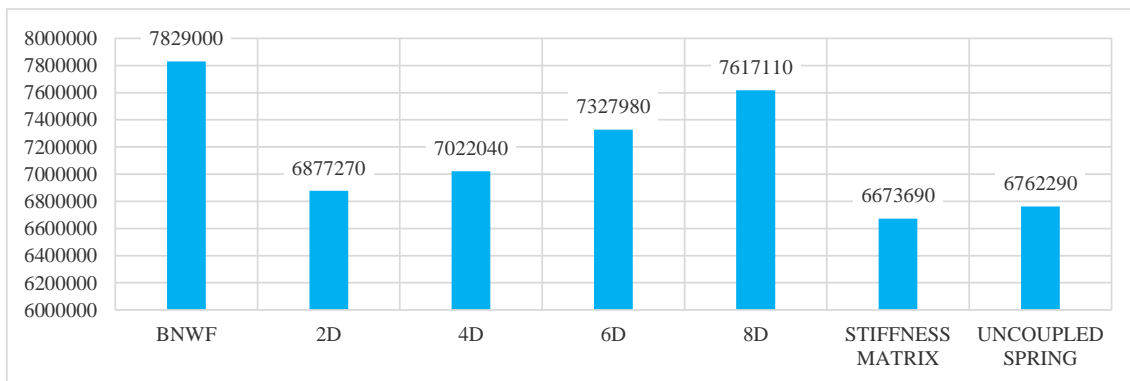
شکل (۴) فرکانس طبیعی سازه (برحسب هرتز) در مدل‌های مختلف.



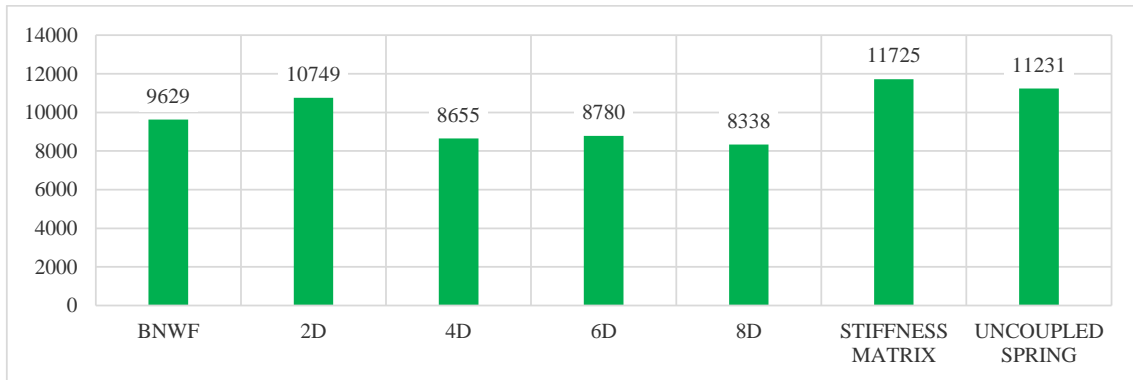
شکل (۵) حداکثر جابجایی سازه (برحسب متر) در روش‌های مختلف.



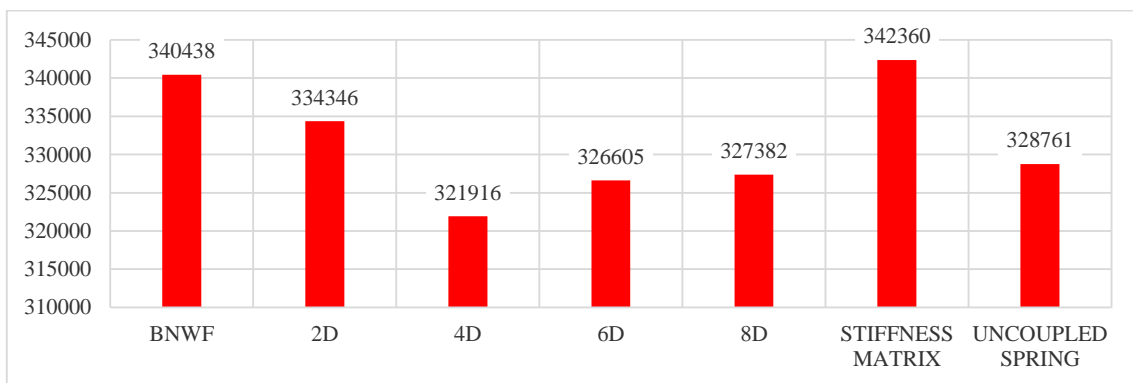
شکل (۶) نیروی محوری (برحسب نیوتن) در مهاربند در مدل‌های مختلف.



شکل (۷) نیروی محوری (برحسب نیوتن) در شمع در مدل‌های مختلف.



شکل (۸) نیروی برشی (برحسب نیوتن) در مهاربند در مدل های مختلف.



شکل (۹) نیروی برشی (برحسب نیوتن) در شمع در مدل های مختلف.

است که سایر روش‌ها مقدار نیروی برشی در راس شمع را با اختلافاتی زیادی ارائه می‌نمایند. طول پایداری با عمق گیرداری 8D نیروی برشی در راس شمع سازه را تقریباً ۴ درصد کمتر از مدل مرجع ارائه کرده که باید توجه داشت که میزان نیروی برشی در راس شمع تابعی از میزان نیروی اعمالی به سازه است و با توجه به یکسان بودن نیروی اعمالی خارجی در تمامی مدل‌ها می‌توان توقع داشت که این نیرو باید در مدل‌ها مختلف نزدیک به هم باشد.

۵- نتیجه‌گیری

۱- از میان مدل‌های ساده سازی شده روش طول پایداری ساده‌ترین روش موجود است که نیازی به محاسبات خاص ندارد و به هیچ عنوان تابعی از جنس و مشخصات فنی خاک و مشخصات مصالح شمع نیست و عمق پایداری تنها تابعی از قطر شمع است که این خود نقطه ضعفی برای این مدل است در حالی که در روش فنرهای مستقل و ماتریس سختی مشخصات فنی شمع و نوع خاک در تعیین سختی مدل موثر هستند.

نحوه جابجایی و دوران سازه در تعیین مقدار نیروهای محوری در اعضای سازه مهم و تعیین کننده است به عبارتی سختی و ماهیت دینامیکی سازه و در نتیجه نحوه پاسخدهی سیستم سازه ای به بارهای دینامیکی در تعیین نیروی موجود در اعضای سازه بسیار مهم است. همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده برای نیروی برشی در مهاربندی سازه، روش طول پایداری با طول گیرداری 6D بهتر از سایر روش‌ها عمل نموده و اختلافی نزدیک به ۹ درصد کمتر از نتایج مربوط به مدل مرجع را ارائه نموده است. بعلاوه در روش طول پایداری با افزایش عمق گیرداری از 2D به 4D میزان نیروی برشی در مهاربند به شدت کاهش پیدا نموده اما از 4D تا 8D تغییرات زیادی را به همراه ندارد. این درحالی است که در روش ماتریس سختی و فنرهای مستقل میزان نیروی برشی به ترتیب ۲۲ و ۱۷ درصد بیشتر از مدل مرجع به دست آمده است. از مقایسه مدل‌های مختلف در شکل (۹) مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده برای روش ماتریس سختی بهتر از سایر مدل‌ها برای ارزیابی نیروی برشی در راس شمع بوده و اختلافی در حدود ۱ درصد را ارائه می‌نماید این در حالی

- CO, Technical Report No. NREL/TP-500-3806, 2009.
- [7] T. Fischer, W. De Vries and B. Schmidt, UpWind Design Basis (WP4: Offshore Foundations and Support Structures), 2010
- [8] W. Shi, H. C. Park, C. W. Chung, H. K. Shin, S. H. Kim, S. S. Lee, "Soil-Structure Interaction on the Response of Jacket-Type Offshore Wind Turbine," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.2, pp.148-139, 2015.
- [9] F. Vorpahl, W. Popko, and D. Kaufer, "Description of a Basic Model of the" UpWind Reference Jacket" for Code Comparison in the OC4 Project under IEA Wind Annex XXX," Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES), Germany, 2011.
- [10] Winkler, Die Lehre von Elasticitaet und Festigkeit; Prag 1867 (H. Dominicus), pp.182-184.
- [11] A.RP2A-WSD, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design-," in Twenty-, ed, 2007.
- [12] N.D. Barltrop and A. J. Adams, Dynamics of Fixed Marine Structures Vol.91: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [13] W. G. K. Fleming, A. J. Weltman, M. F. Randolph, and W. K. E., Piling Engineering, 2nd edition ed.: Halsted Press;, 1992.
- [14] M. F. Randolph, "The Response of Flexible Piles to Lateral Loading," Geotechnique, Vol.31, pp.259-247, 1981.
- [15] M. M. Memarpour, M. Kimiaei, M. Shayanfar, and M. Khanzadi, "Cyclic Lateral Response of Pile Foundations in Offshore Platforms," Computers and Geotechnics, Vol.42, pp.192-180, 2012.
- ۲- روش ماتریس سختی برای تعیین سختی مدل به مقدار مدول برشی خاک نیاز دارد که این ویژگی تابعی از فشار محصور کننده و مقدار کرنش برشی است بنابراین در هر عمق و در هر میزان از تغییر مکان مقدار آن متغیر خواهد بود و برای مدل سازی نیاز به یک مقدار متوسط دارد که با روابط تجربی تخمین زده شده است که این خود یک عدم اطمینان به مدل می دهد.
- ۳- در روش فنرهای مستقل برای تعیین سختی فنرها به ضریب واکنش بستر خاک نیاز است که با کمک نمودارهای آیین نامه ای تعیین می شود و مقدار عدم قطعیت کمتر خواهد بود.
- ۴- در میان مدل های ساده سازی شده در زمینه فرکانس طبیعی روش طول پایداری با عمق گیرداری 8D بهترین تطابق را با مدل مرجع دارد و می توان توقع داشت که رفتار دینامیکی این دو مدل تشابه بیشتری نسبت به سایر مدل ها داشته باشد. سایر مدل ها مقدار فرکانس طبیعی سازه را بیشتر از مدل مرجع در نظر گرفته اند به عبارتی سازه را سخت تر از مدل مرجع در نظر گرفته اند.
- ### ۶ - مراجع
- [1] G. L. WindEnergie, "Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines," Germanischer Lloyd Rules and Guidelines, IV—Industrial Services, Part, 2005.
- [2] S. Adhikari and S. Bhattacharya, "Dynamic Analysis of Wind Turbine Towers on Flexible Foundations," Shock and Vibration, Vol.19, pp.56-37, 2012.
- [3] M. Karimirad, Offshore Energy Structures: for Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms, Springer, 2014.
- [4] J. Jonkman, "Overview of the ElastoDyn Structural-Dynamics Module", NREL Wind Turbine Modeling Workshop, EWEA Offshore, Frankfurt, Germany, 2013.
- [5] W. Popko, F. Vorpahl, A. Zuga, M. Kohlmeier, J. Jonkman, A. Robertson, T. J. Larsen, A. Yde, K. Saetetro, and K. M. Okstad, "Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4), Phase 1-Results of Coupled Simulations of an Offshore Wind Turbine With Jacket Support Structure", The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012.
- [6] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", National Renewable Energy Laboratory, Golden,