

تأثیر نسبت عمق روی رفتار شالوده‌های دامنه‌دار تحت بارگذاری ترکیبی در ماسه نیمه‌متراکم

ولی قاسمی نژاد^{۱*}، محمدعلی روشن ضمیر^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

*vghaseminejad@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۹۷/۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۵/۲۴]

چکیده

صندوقه‌های مکشی به شکل گسترده‌ای در صنعت نفت و گاز استفاده شده‌اند. به تازگی شالوده‌های دامنه‌دار به‌عنوان راه‌حل شالوده نوآورانه برای توربین‌های بادی فراساحلی مدنظر قرار گرفته است. شالوده‌های دامنه‌دار به شکل فزاینده‌ای در طراحی سازه‌ها و تجهیزات توربین بادی فراساحلی برای تحمل شرایط بارگذاری ترکیبی قائم، افقی و لنگر استفاده می‌شود. در این پژوهش، الگوهای المان محدود سه‌بعدی شالوده‌های دامنه‌دار در ماسه نیمه-متراکم تحت بارگذاری ترکیبی تحلیل شده است. الگوهای عددی با مقایسه نتایج تحلیل المان محدود اعتبارسنجی شدند. تحلیل‌های حساسیت، با استفاده از نرم‌افزار Plaxis در نسبت‌های عمق (نسبت عمق به قطر شالوده) مختلف، تحت بار ترکیبی با خروج از مرکزیت‌های بار مختلف انجام شد. پاسخ‌های بار ترکیبی از بار افقی خالص، لنگرهای واژگونی حاصل از ارتفاع‌های برج گوناگون و لنگر خالص با یکدیگر مقایسه شد. نتایج تحلیل، چگونگی ارتباط ظرفیت باربری ترکیبی شالوده‌ها را به نسبت عمق و شرایط بارگذاری بیان می‌کند. حالت‌های حدی نهایی به‌صورت ظرفیت‌های باربری بی بعد نشان داده شدند و روابطی از نتایج تحلیل ارائه گردید. افزایش خروج از مرکزیت بار، موجب کاهش ظرفیت باربری افقی به‌خصوص تا خروج از مرکزیت بار m شد. تأثیر نیروی قائم روی بار افقی و لنگر ارزیابی شد و مشخص گردید که افزایش بار قائم می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری ترکیبی شود.

واژگان کلیدی: شالوده‌دامنه‌دار، نسبت عمق، ظرفیت باربری ترکیبی، ماسه نیمه‌متراکم، نرم‌افزار Plaxis

۱- مقدمه

دینامیکی حساس هستند. بارها از توربین‌های بادی فراساحلی با شرایط بارگذاری منحصر به فرد شامل نیروهای افقی و لنگر واژگونی زیاد و بار قائم نسبتاً کم به‌علت ساختار لاغر آنها مشخص می‌شوند. شالوده دامنه‌دار مکشی^۱ مفهوم طراحی نسبتاً نوین برای مبدل‌های انرژی بادی فراساحلی است.

توان بادی فراساحلی به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر پاک، اهمیت ویژه‌ای برای تغییر ساختار انرژی و حفاظت از محیط زیست دارد. شرایط بارگذاری در توربین‌های بادی فراساحلی، نسبت به کاربردهای دیگر بسیار متفاوت است. توربین‌های بادی فراساحلی، سازه‌های سبک و به لحاظ

1 Suction bucket foundation

لنگر روی سطح دایره‌ای کوچک‌مقیاس و الگوهای شالوده دامنه‌دار نصب شده روی رس را در دانشگاه آلبورگ گزارش دادند. قاسمی‌نژاد و روشن‌ضمیر [17] روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری خالص را مقایسه نمودند و پاسخ شالوده دامنه‌دار را تحت بار خالص روی ماسه نیمه‌تراکم بررسی کردند. ژانگ و همکاران [18] ظرفیت باربری صندوقه‌های مکشی در ماسه نرم را با انجام آزمایش‌های بارگذاری جانبی ترکیبی کنترل بار و جابه‌جایی بررسی نمودند. زافیراکوس و گرولیموس [19] با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی، ظرفیت باربری شالوده صندوقه مکشی در خاک اصطکاکی را تحت بارگذاری ترکیبی بررسی نمودند.

شکل ۱. طرح کلی توربین بادی فراساحلی و فرآیند نصب شالوده دامنه‌دار

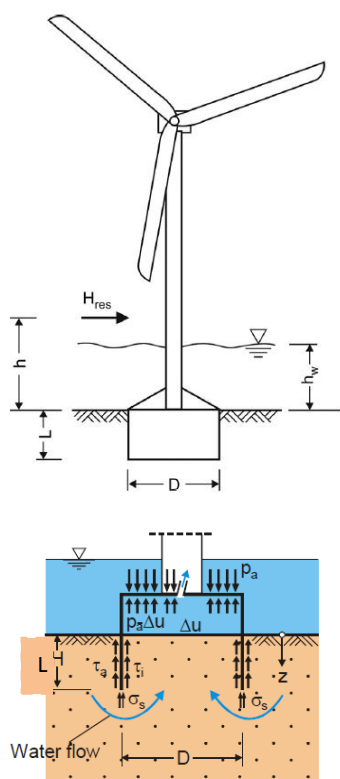


Fig. 1. Schematic sketch of an offshore wind turbine and installation process of a bucket foundation [1]

لیو و همکاران [20] ظرفیت باربری جانبی شالوده دامنه‌دار واقع بر ماسه نیمه‌تراکم همگن را با انجام آزمایش و همچنین روش اجزای محدود مطالعه نمودند و سازوکارهای گسیختگی و مرکز چرخش شالوده را تحت بار جانبی بررسی

شالوده دامنه‌دار مکشی از شالوده صندوقه‌ای مکشی که پیش‌تر در تکنولوژی دور از ساحل استفاده می‌شد توسعه پیدا کرد. در مقایسه با راه‌حل تک‌شمع^۱ سنتی، طراحی شالوده دامنه‌دار، وزن فولاد را تا نصف کاهش می‌دهد و نصب شالوده دامنه‌دار، بسیار آسان‌تر است و به تجهیزات نصب سنگین نیاز ندارد. شالوده‌های دامنه‌دار در شرایط خاکی مناسب (ماسه ریز یا مصالح رسی) قابل استفاده هستند و بیشتر در آب‌های کم‌عمق از نزدیک ساحل تا تقریباً ۵۵ متر استفاده می‌شود. شالوده دامنه‌دار شامل استوانه جدار نازک با قطر D ، عمق دامنه L و ضخامت جداره t_s با رویه بسته و انتهای باز است. در شالوده دامنه‌دار، نسبت عمق معمولاً کمتر از یک است. شالوده‌های دامنه‌دار ابتدا معمولاً تحت وزن خود به داخل بستر دریا نفوذ می‌کنند. نفوذ بعدی به وسیله پمپاژ آب به خارج شالوده دامنه‌دار با ایجاد فشار مکشی داخل آن حاصل می‌شود. وقتی که صفحه بالایی شالوده در تماس با بستر دریا قرار گیرد نفوذ متوقف می‌شود. منظر عمومی مبدل انرژی بادی فراساحلی روی یک شالوده دامنه‌دار و فرآیند نصب آن در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

۲- مروری بر مطالعات انجام شده

میرهوف [2, 3]، هنس [4] و وسیک [5] در ابتدا رفتار شالوده‌ها را تحت شرایط هر دو بارگذاری افقی و قائم به همراه لنگرهای واژگونی زیاد بررسی نمودند. کسیدی و همکاران [6]، هولسبی و کسیدی [7] و کسیدی [8] یک الگوی سخت‌شونده خمیری برای رفتار شالوده‌های دایره‌ای صلب روی ماسه سست ارائه نمودند. کلی و همکاران [9] آزمایش‌های آزمایشگاهی با اعمال بارهای قائم و لنگر به صندوقه‌های مکشی قرار گرفته در ماسه و رس، برای شبیه‌سازی آزمایش‌های میدانی انجام دادند. گورونک و رندولف [10] و گورونک [11-13]، آثار شکل، عمق شالوده و سازوکارهای گسیختگی روی ظرفیت باربری در شالوده‌های دایره‌ای دامنه‌دار را در نهشته‌های رسی تحت بارگذاری عمومی براساس نتایج اجزای محدود بررسی نمودند. براری و ایسن [14-16] نتایج عددی و آزمایشگاهی بارگذاری قائم و

شد. آنان رفتار باربری شالوده‌های دامنه‌دار تحت بارگذاری زهکشی شده در ماسه خیلی متراکم را با روش اجزای محدود بررسی نمودند. آنان از شالوده دامنه‌دار با عمق دامنه $L=9\text{ m}$ و قطر $D=12\text{ m}$ ($L/D=0.75$) با ضخامت دیواره m $t_s=0.03$ در تحلیل عددی استفاده کردند. پارامترهای خاک برای ماسه خیلی متراکم توسط آچموس و همکاران در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای خاک ماسه خیلی متراکم توسط آچموس و همکاران

Property	Value	Unit
Buoyant unit weight (γ')	11	[kN/m ³]
Oedometric stiffness parameter (κ)	600	[-]
Oedometric stiffness parameter (λ)	0.55	[-]
Poisson's ratio (ν)	0.25	[-]
Internal friction angle (ϕ')	40	[°]
Dilation angle (ψ)	10	[°]
Cohesion (C')	0.1	[kN/m ²]

Table 1. Soil parameters considered by Achmus et al. [26] for very dense sand

در شکل (۳) نمودار لنگر-زاویه چرخش برای خروج از مرکزیت $h=20\text{ m}$ با مدل مصالح و پارامترهای مشابه، به منظور مقایسه با نتایج تحلیل آچموس و همکاران آمده است که مشاهده می‌شود نتایج تحلیل‌های المان محدود با نتایج آچموس و همکاران در توافق خوبی است.

شکل ۳. نمودارهای لنگر-زاویه چرخش تحلیل اجزای محدود در

مقایسه با تحلیل آچموس و همکاران [26] برای $h=20\text{ m}$

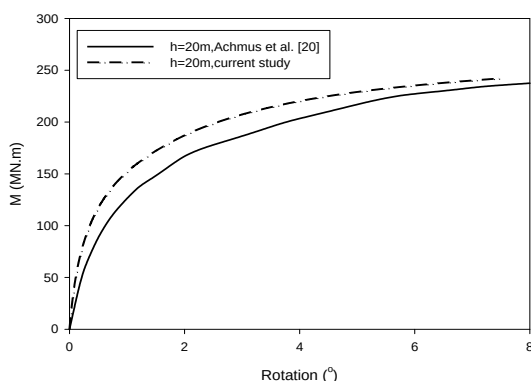


Fig. 3. Comparison of moment-rotation curves, numerical simulations and results of reference model for $h=20\text{ m}$ (Achmus et al. [26])

کردند. ونگ و همکاران [21] پاسخ جانبی شالوده دامنه‌دار ارتقاء یافته را با استفاده از الگوسازی سانتیفریوژ ارزیابی نمودند. آنان هر دو بار استاتیکی و دوره‌ای را به شالوده اعمال کردند و منحنی‌های سختی-جابه‌جایی را ارائه دادند. ژانگ و همکاران [22, 23] تراوش و مقاومت نفوذ را در طول فرآیند نصب بررسی کردند و آزمایش‌های مدلی مقیاس شده را برای تعیین فشار آب حفره‌ای انجام دادند. هیرایی [24] با استفاده از مدل وینکلر، رفتار شالوده دامنه‌دار را تحت بار جانبی در ماسه بررسی کرد و رابطه بین جابه‌جایی جانبی، زاویه چرخش، لنگر و نیروی برشی را به صورت معادله بازگشتی بدست آورد.

در مطالعه حاضر، یک مجموعه تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی برای ارزیابی تأثیر نسبت عمق شالوده دامنه‌دار روی ظرفیت باربری ترکیبی شالوده دامنه‌دار نصب شده روی ماسه با تراکم متوسط انجام شد و نتایج بررسی‌های عددی رفتار بار-تغییرشکل شالوده‌های مکشی تحت بارهای استاتیکی ارائه شد. شکل (۲) قرارداد علامت را برای بارهای افقی، قائم و لنگر خمشی و جابه‌جایی‌های افقی، قائم و زاویه چرخش نشان می‌دهد.

شکل ۲. قرارداد علامت برای بارها و جابه‌جایی‌ها

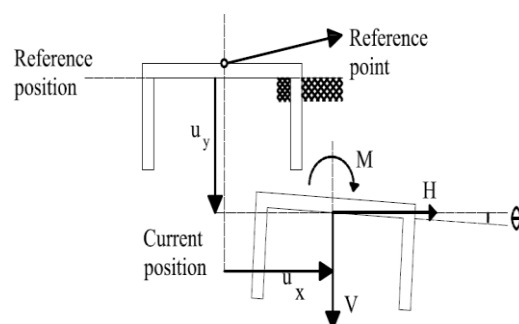


Fig. 2. Sign conventions of loads and displacements

۳- اعتبارسنجی مدل عددی

پیش از انجام تحلیل پارامتریک، روش‌های الگوسازی این پژوهش با استفاده از تحلیل اجزای محدود Plaxis [25] از طریق استناد به متون فنی معتبر، مورد تأیید قرار گرفت. به همین منظور، از پژوهش آچموس و همکاران [26] استفاده

۴- تحلیل اجزای محدود

در این مطالعه، رفتار شالوده‌های مکشی به‌وسیله مدل اجزای محدود سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis با هدف مطالعه پارامتریک ارزیابی شد. تحلیل‌های مقدماتی برای تعیین ریزی مش برای کمینه کردن خطای گسسته‌سازی برای هر حالت و تعیین ابعاد مدل برای رسیدن به دقت مناسب نتایج و اجتناب از تأثیر شرایط مرزی انجام شد. در نهایت پهنای مدل، شش‌برابر قطر شالوده و مرز پایین مدل به سه‌برابر عمق دامنه شالوده امتداد یافت. شکل (۴) مش اجزای محدود مربوط به نسبت عمق $L/D=1$ را نشان می‌دهد. چندین تحلیل حساسیت برای نسبت‌های عمق $L/D=0,0/25,0/50,0/75$ و قطرهای شالوده ۱۲ و ۱۶ متر برای بررسی رفتار زهکشی شده شالوده‌های دامنه‌دار روی ماسه با تراکم متوسط انجام شد و پاسخ‌ها برای بار ترکیبی مقایسه شد. بارگذاری ترکیبی با در نظر گرفتن خروج از مرکزیت‌های مختلف در تحلیل‌های گوناگون اعمال شد و تأثیر نسبت L/D روی ظرفیت باربری به دقت تحلیل شد. در مدل‌سازی شالوده فولادی ضخامت دیواره $t_s=0,04$ m در نظر گرفته شد. مشخصات تغییرشکل واقعی فولاد $E=210$ GPa و $\nu=0,3$ در تحلیل‌ها استفاده شد که E و ν به ترتیب ضریب کشسانی و نسبت پواسون مصالح فولادی هستند. وزن مخصوص فولاد برای بدنه شالوده $\gamma=78$ kN/m³ در نظر گرفته شد. زبری اندرکنش بین سطوح دیواره شالوده و خاک با انتخاب مقداری مناسب برای ضریب کاهش مقاومت در سطح مشترک (R_{inter}) الگوسازی شد. این ضریب به مقاومت سطح مشترک نسبت به مقاومت خاک مربوط می‌شود که مقدار آن $R_{inter}=0,7$ در نظر گرفته شد. در این پژوهش از آثار مکش ابتدایی در هنگام نصب شالوده، بر تراکم نسبی و تنش‌های اعمالی به خاک صرف‌نظر شد و فرض شد تأثیر ناچیزی بر عملکرد شالوده و رفتار درازمدت خاک بستر دریا داشته باشد. تحلیل‌ها در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست تنش‌های ژئواستاتیک در مدل شامل المان‌های خاک تنها، به‌وسیله اعمال بارگذاری ثقلی انجام شد. در مرحله دوم المان‌های از پیش تعریف شده هندسه شالوده به‌وسیله مدل‌سازی المان‌های فولادی شالوده در خاک

جایگزین شدند. در مرحله سوم بار قائم ثابت به میزان MN ۱۰ و بار افقی تحت خروج از مرکزیت‌های گوناگون اعمال شد. گره‌های پایین مرز نسبت به جابه‌جایی قائم و گره‌های کناری مرز نسبت به جابه‌جایی افقی ثابت بودند. در برنامه Plaxis قانون مصالح الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی مورکولن^۱ برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ غیرخطی خاک، مدول الاستیسیته ادنومتریک وابسته به تنش با معادله زیر استفاده شد:

$$E_s = \kappa \cdot \sigma_{at} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}} \right)^2 \quad (1)$$

که در این معادله $\sigma_{at}=100$ kN/m² تنش مرجع و σ_m تنش اصلی متوسط موجود در المان خاک مورد نظر است. پارامترهای κ و λ سختی خاک را در حالت تنش مرجع تعیین می‌کند. جدول (۲) پارامترهای مصالح ماسه نیمه‌متراکم را ارائه می‌دهد.

شکل ۴. مش اجزای محدود استفاده شده در تحلیل

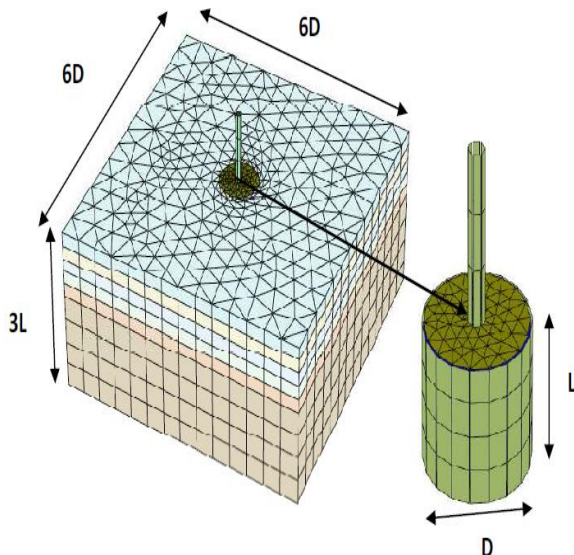


Fig. 4. Finite element mesh used in the analysis

۵- نتایج عددی

منحنی‌های بار افقی- جابه‌جایی افقی و لنگر- زاویه چرخش برای بارگذاری ترکیبی شالوده دامنه‌دار روی ماسه

جدول ۲. ویژگی‌های مصالح ماسه نیمه‌تراکم در تحلیل عددی

Property	Value	Unit
Unsaturated unit weight (γ)	16	[kN/m ³]
Saturated unit weight (γ_{sat})	19	[kN/m ³]
Oedometric stiffness parameter (κ)	400	[-]
Oedometric stiffness parameter (λ)	0.6	[-]
Poisson's ratio (ν)	0.25	[-]
Internal friction angle (ϕ')	35	[°]
Dilation angle (ψ)	5	[°]
Cohesion (C')	0.1	[kN/m ²]

Table 2. Material Properties used in the numerical analysis for medium dense sand

شکل ۶. منحنی‌های بار افقی - جابجایی افقی در $D=16$ m در L/D های گوناگون، الف) $h=0$ m، ب) $h=100$ m

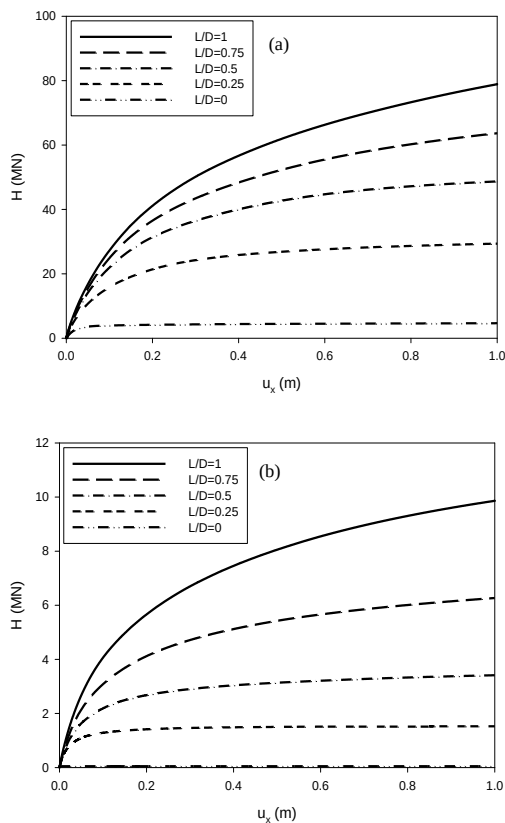


Fig. 6. Horizontal load-displacement curves at $D=16$ m and various L/D ratios, (a) $h=0$ m, (b) $h=100$ m

نیمه‌تراکم در قطر $D=16$ m و نسبت عمق $L/D=1$ در خروج از مرکزیت‌های مختلف در شکل (۵) مشاهده می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود که خروج از مرکزیت بار به‌طور قابل ملاحظه‌ای روی ظرفیت باربری نهایی تأثیر می‌گذارد. بیشترین مقدار ظرفیت باربری افقی نهایی در $h=0$ m (بار افقی خالص) و بیشترین مقدار ظرفیت لنگر نهایی در $h=\infty$ (لنگر خالص) حاصل شد. شکل (۶) منحنی‌های بار افقی - جابه‌جایی افقی برای خروج از مرکزیت‌های بار $h=0$ m و $h=100$ m در نسبت‌های عمق گوناگون را نشان می‌دهد.

شکل ۵. منحنی‌های بار - تغییر شکل تحت بارگذاری‌های ترکیبی در $L/D=1$ و $D=16$ m با خروج از مرکزیت‌های گوناگون، الف) بار افقی - جابجایی، ب) لنگر - زاویه چرخش

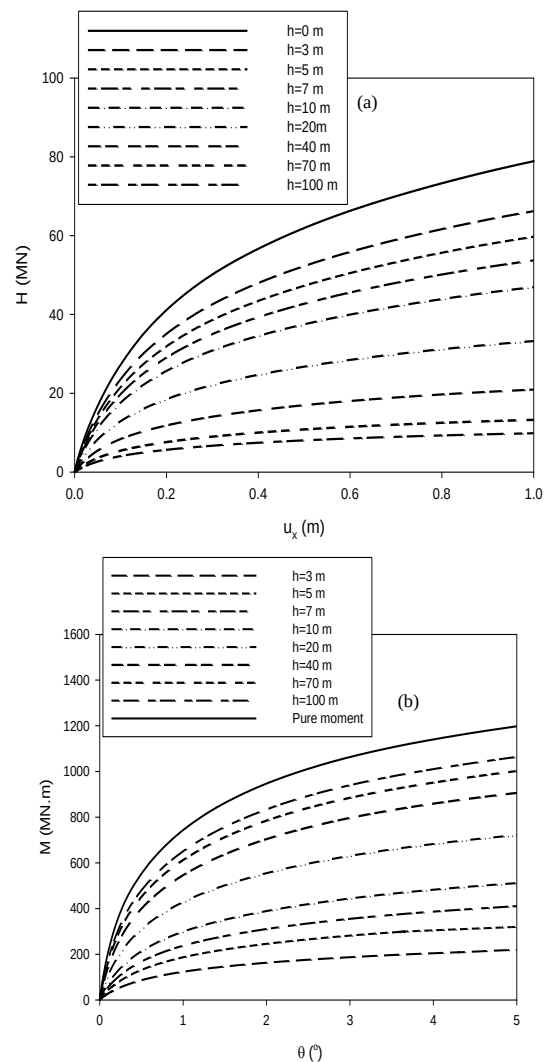


Fig. 5. Load-deformation curves under combined loadings at $D=16$ m and $L/D=1$, (a) horizontal load-displacement, (b) moment-rotation

شکل ۷. منحنی‌های لنگر-زاویه چرخش در $D=16$ m در L/D های گوناگون، الف) $h=3$ m، ب) $h=100$ m

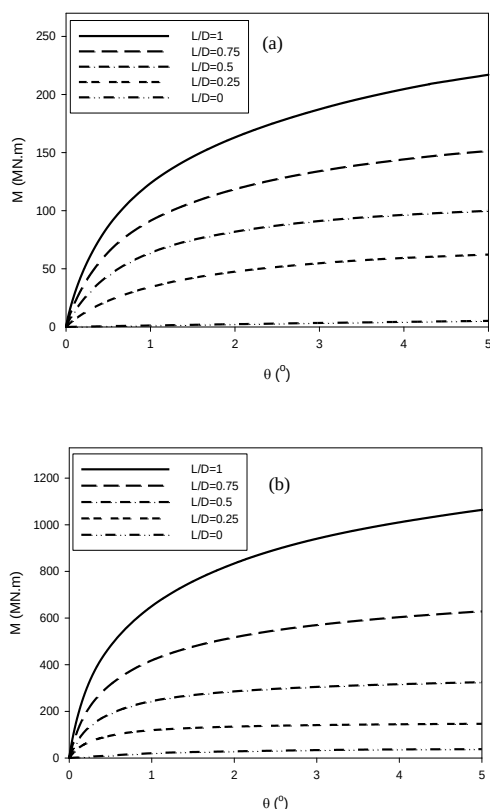
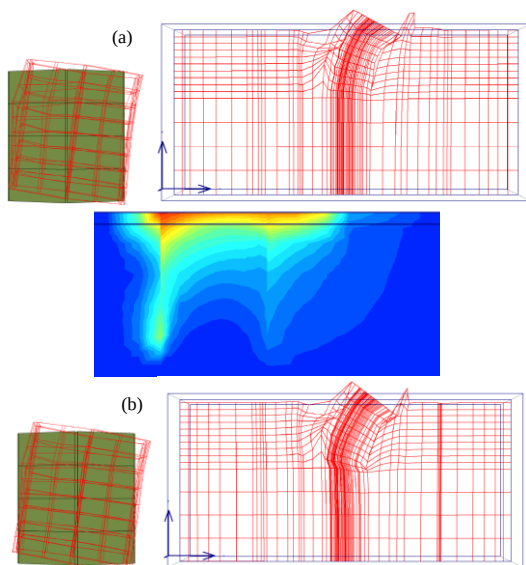


Fig. 7. Moment-rotation curves at $D=16$ m and different L/D ratios, (a) $h=3$ m, (b) $h=100$ m

شکل ۸. مش اجزای محدود تغییرشکل یافته شالوده، خاک اطراف و نمایه رنگی جابجایی تحت بارگذاری ترکیبی برای $D=16$ m و $L/D=1$ الف) $h=0$ m، ب) $h=\infty$ m



با کاهش قطر شالوده از ۱۶ به ۱۲ متر و در خروج از مرکزیت $h=0$ m، ظرفیت باربری افقی بین $2/1$ تا $2/3$ برابر و در $h=100$ m بین $2/8$ تا $3/2$ برابر در نسبت‌های عمق گوناگون کاهش می‌یابد. شکل (۷) منحنی‌های لنگر-زاویه چرخش را برای خروج از مرکزیت‌های بار $h=3$ m و $h=100$ m در نسبت‌های عمق گوناگون نشان می‌دهد. با کاهش قطر شالوده از ۱۶ به ۱۲ متر و در خروج از مرکزیت $h=3$ m، میزان لنگر بین ۲ تا $2/5$ برابر و در $h=100$ m بین $2/8$ تا $3/2$ برابر در نسبت‌های عمق گوناگون کاهش پیدا می‌کند. شکل (۸) نمایی از مش اجزای محدود تغییرشکل یافته و نمایه رنگی جابجایی را تحت بارگذاری ترکیبی برای $D=16$ m، $L/D=1$ و $h=0$ و ∞ m نشان می‌دهد.

در مقایسه با بارگذاری قائم خالص که بیشتر نشست در آن حاکم است، در حالت بارگذاری ترکیبی، مشابه با بارگذاری افقی و لنگر خالص، زاویه چرخش به همراه جابجایی افقی حاکم است. در بار افقی خالص، اثر جابجایی افقی و در لنگر خالص، اثر زاویه چرخش غالب است اما در حالت بار ترکیبی، بسته به اندازه بار افقی و لنگر و اندرکنش بین آنها، تغییرشکل به صورت انتقال از حالت جابجایی افقی بیشتر، به سمت زاویه چرخش بیشتر صورت می‌گیرد. در خروج از مرکزیت‌های خیلی زیاد ($h=\infty$) که لنگر بیشتری به سیستم اعمال می‌شود، زاویه چرخش بیشتر و جابجایی افقی کمتری اتفاق می‌افتد و در خروج از مرکزیت نزدیک به بار افقی خالص ($h=0$ m)، جابجایی افقی بیشتر و زاویه چرخش کمتری رخ می‌دهد. در خروج از مرکزیت کم، شکل گسیختگی بیشتر به وسیله لغزش ایجاد می‌شود و چرخش حول نقطه‌ای در پایین شالوده صورت می‌گیرد و در خروج از مرکزیت‌های زیاد، شکل گسیختگی به وسیله چرخش حول نقطه‌ای که داخل شالوده دامنه‌دار قرار دارد ایجاد می‌شود. شکل (۹) تغییرات ظرفیت‌های باربری افقی و لنگر را به صورت تابعی از نسبت عمق در $D=16$ m و خروج از مرکزیت‌های بار گوناگون نشان می‌دهد.

روابط ظرفیت باربری را می‌توان به صورت بی بعد با نسبت ظرفیت باربری در مقادیر گوناگون L/D به ظرفیت باربری در $L/D=0$ ($\frac{M_{ult(L/D)}}{M_{ult(L/D=0)}}, \frac{H_{ult(L/D)}}{H_{ult(L/D=0)}}$) ارائه داد. شکل (۱۰) نمودار تغییرات ظرفیت‌های باربری بی بعد افقی و لنگر را به صورت تابعی از نسبت‌های عمق در $D=16$ m نشان می‌دهد. ظرفیت‌های باربری بی بعد افقی و لنگر در خروج از مرکزیت‌های بار زیاد بزرگتر بودند. پراکندگی در نتایج نمودارها به محدوده زیاد خروج از مرکزیت بار مربوط می‌شود. ظرفیت باربری افقی بی بعد در $h=0$ m در مقایسه با $h=100$ m بین ۱ تا ۱/۶ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون افزایش می‌یابد. میزان لنگر بی بعد در $h=3$ m در مقایسه با $h=\infty$ نیز بین ۱ تا ۱/۹ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون کاهش یافت.

شکل ۱۰. ظرفیت‌های باربری بی بعد به صورت تابعی از نسبت عمق در $D=16$ m (الف) بار افقی، (ب) لنگر

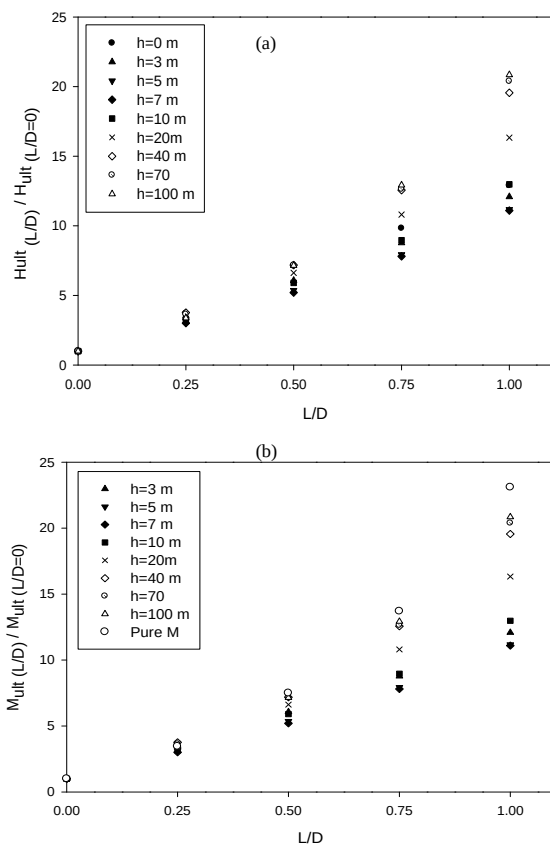


Fig. 10. Normalized bearing capacities as a function of aspect ratios at $D=16$ m, (a) horizontal, (b) moment

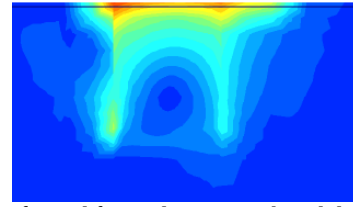


Fig. 8. Deformed finite element mesh and deformation shading under combined loading at $D=16$ m, $L/D=1$ (a) $h=0$ m, (b) $h=\infty$

روند افزایشی واضحی در ظرفیت‌های باربری افقی و لنگر، با افزایش نسبت عمق در ماسه نیمه متراکم مشاهده شد. ظرفیت باربری افقی در $h=0$ m در مقایسه با $h=100$ m، بین ۷/۷ تا ۱۳/۷ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون کاهش می‌یابد که بیشینه مقدار کاهش در $L/D=0/25$ مشاهده شد. میزان لنگر در $h=3$ m در مقایسه با $h=\infty$ نیز بین ۳ تا ۵/۸ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار افزایش در $L/D=1$ مشاهده شد.

شکل ۹. ظرفیت باربری افقی و لنگر در برابر نسبت عمق در $D=16$ m و خروج از مرکزیت‌های بار گوناگون، (الف) بار افقی، (ب) لنگر

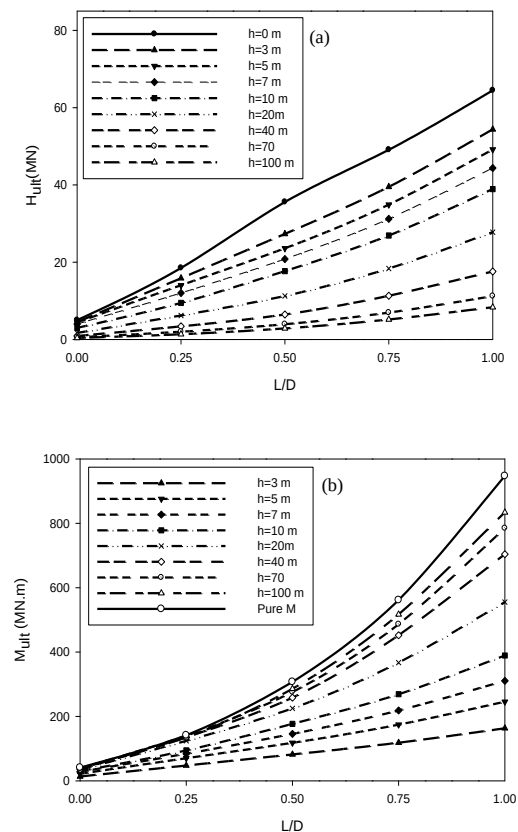


Fig. 9. Horizontal and moment bearing capacities at $D=16$ m and various load eccentricities, (a) horizontal, (b) moment

شکل ۱۲. ظرفیت باربری بی بعد در برابر h/L (الف) بار افقی، (ب) لنگر

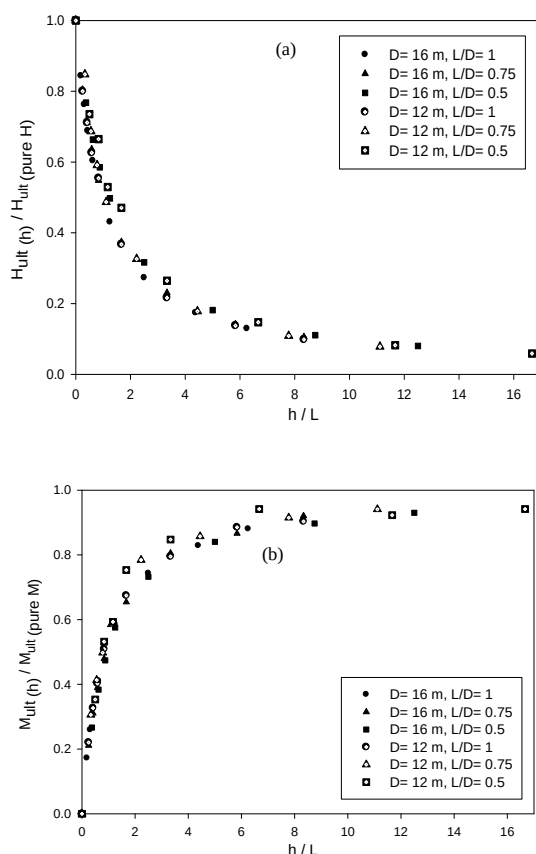


Fig. 12. Normalized bearing capacities as a function of h/L , (a) horizontal, (b) moment

از شکل نتیجه می‌شود که با بی بعدسازی ظرفیت باربری لنگر و بار افقی نسبت به لنگر و بار افقی خالص در برابر h/L ، برای قطرهای شالوده و نسبت‌های عمق گوناگون، می‌توان روند یکنواختی را مشاهده نمود. نتایج نمودار نشان داد که نسبت ظرفیت باربری افقی در مقادیر گوناگون h به ظرفیت باربری در $h=0$ m $\left(\frac{H_{ult(h)}}{H_{ult(pure H)}}\right)$ و نسبت ظرفیت باربری لنگر در مقادیر مختلف h به ظرفیت باربری در $h=0$ m $\left(\frac{M_{ult(h)}}{M_{ult(pure M)}}\right)$ می‌تواند به صورت توابع زیر با در نظر گرفتن عمق دامنه و خروج از مرکزیت بار بیان شود:

$$\frac{H_{ult(h)}}{H_{ult(pure H)}} = 0.55^{(h/L)} \quad R^2=0.94 \quad (2)$$

$$\frac{M_{ult(h)}}{M_{ult(pure M)}} = h/L^{(0.16)} - 0.4 \quad R^2=0.91 \quad (3)$$

شکل (۱۱) ظرفیت‌های باربری افقی و لنگر را برای خروج از مرکزیت‌های بار گوناگون در $D=16$ m نشان می‌دهد. ظرفیت باربری افقی در $h=0$ m در مقایسه با $h=40$ m بین $3/7$ تا $5/6$ برابر و در $h=40$ m در مقایسه با $h=100$ m بین $2/1$ تا $2/5$ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون کاهش می‌یابد. میزان لنگر نیز در $h=3$ m در مقایسه با $h=40$ m بین $2/7$ تا $4/3$ برابر و در $h=40$ m در مقایسه با $h=\infty$ بین $1/1$ تا $1/3$ برابر در نسبت‌های عمق و قطرهای گوناگون افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که تا خروج از مرکزیت بار حدود 16 m $h=40$ ، شیب تغییرات ظرفیت باربری افقی و لنگر تند بود اما در خروج از مرکزیت‌های بار بیشتر، نرخ تغییرات آن ملایم شد. همین نتیجه برای ظرفیت باربری افقی و لنگر بی بعد نیز مشاهده شد. شکل (۱۲) ظرفیت‌های باربری افقی و لنگر بی بعد را در برابر h/L نشان می‌دهد.

شکل ۱۱. ظرفیت باربری به صورت تابعی از خروج از مرکزیت بار در

$D=16$ m (الف) بار افقی، (ب) لنگر

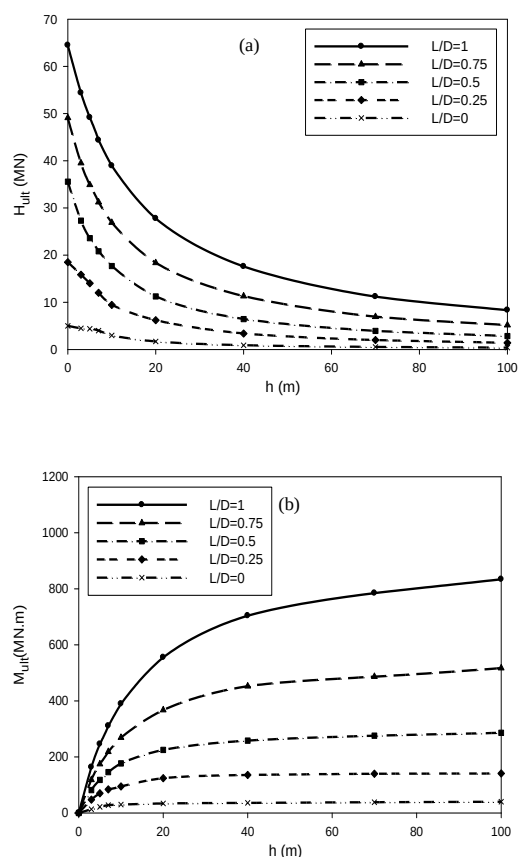


Fig. 11. Bearing capacities as a function of load eccentricities at $D=16$ m, (a) horizontal, (b) moment

این شکل، تأثیر بارهای قائم گوناگون را بر پوش گسیختگی در خروج از مرکزیت‌های مختلف از $h=0$ m تا $h=\infty$ نشان می‌دهد. از تحلیل‌های بارگذاری لنگر ترکیبی با بار قائم ملاحظه شد که تمایل به نشست در شالوده تحت بار قائم زیاد، باعث تثبیت شالوده در برابر بارهای افقی و لنگر می‌شود و افزایش ظرفیت باربری ترکیبی را به دنبال خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

تحلیل‌های عددی سه‌بعدی تحت بارگذاری ترکیبی برای شالوده‌های دامنه‌دار روی ماسه نیمه‌متراکم انجام شد و شالوده‌های دامنه‌دار به قطرهای ۱۲ و ۱۶ متر نسبت‌های عمق $L/D=0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 75$ بررسی شد. ظرفیت باربری ترکیبی نهایی شالوده‌های مکشی در معرض بارگذاری‌های افقی و لنگر از طریق تحلیل‌های اجزای محدود ارزیابی شد. در بارگذاری ترکیبی، افزایش خروج از مرکزیت بار منجر به افزایش در میزان لنگر و کاهش ظرفیت باربری افقی می‌شود. تا خروج از مرکزیت بار $h=40$ m، میزان تغییرات ظرفیت باربری، زیاد و در خروج از مرکزیت‌های بار بیشتر، به تدریج نرخ تغییرات ظرفیت باربری ملایم شد. ظرفیت افقی و لنگر نهایی با افزایش نسبت عمق افزایش یافت. برای تعیین ظرفیت باربری تحت بارگذاری ترکیبی، روابط تقریبی به صورت تابعی از خروج از مرکزیت و عمق دامنه در نسبت‌های عمق مختلف ارائه شد (روابط ۲ و ۳). در اثر بارگذاری ترکیبی، به‌طور همزمان جابه‌جایی افقی و چرخش اتفاق می‌افتد. در خروج از مرکزیت‌های زیاد که لنگر بیشتری به سیستم اعمال می‌شود زاویه چرخش بیشتر و جابه‌جایی افقی کمتری اتفاق می‌افتد و در خروج از مرکزیت کم، جابه‌جایی افقی بیشتر و زاویه چرخش کمتری رخ می‌دهد. در خروج از مرکزیت کم، چرخش حول نقطه‌ای در پایین شالوده صورت می‌گیرد و در خروج از مرکزیت‌های زیاد، شکل گسیختگی به‌وسیله چرخش حول نقطه‌ای که داخل شالوده دامنه‌دار قرار دارد، ایجاد می‌شود. تغییرات بار قائم مورد بررسی قرار گرفت

این معادلات می‌تواند برای $0 \leq L/D \leq 1$ و $m < h \leq 100$ استفاده شود. یادآور می‌شود معادله (۳) باید برای $m > h$ مورد استفاده قرار گیرد و در $h=0$ m نسبت $h=0$ = $\frac{M_{ult(h)}}{M_{ult(pure M)}}$ می‌شود. روابط بالا می‌تواند پیش‌بینی ظرفیت‌های باربری افقی و لنگر در خروج از مرکزیت‌ها و نسبت‌های عمق گوناگون را با داشتن ظرفیت باربری افقی و لنگر خالص ارائه دهد. برای ارزیابی تأثیر بار قائم، رفتار شالوده تحت بارهای V_{ult} و $V_{ult} \cdot 0.75, V_{ult} \cdot 0.5, V_{ult} \cdot 0.25$ که $V=0$ ظرفیت قائم خالص است شبیه‌سازی شد. در شکل (۱۳) پوش گسیختگی در صفحه $M-H$ برای نسبت‌های عمق ۱ و $L/D=0.5$ در $D=16$ m مشاهده می‌شود.

شکل ۱۳. پوش گسیختگی در صفحه بار $M-H$ برای بارهای قائم مختلف $L/D=1$ (ب) $L/D=0.5$ (الف)

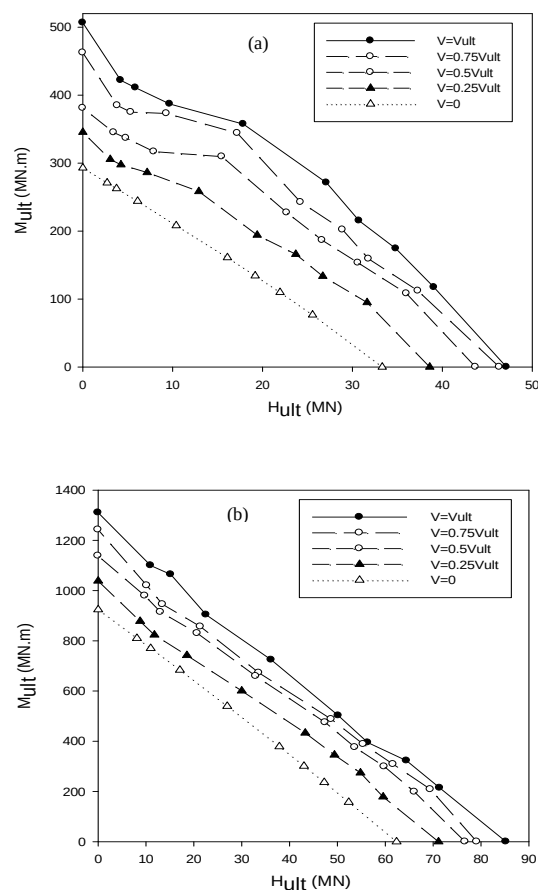


Fig. 13. Failure envelope in $M-H$ load plane for different vertical loads at (a) $L/D=0.5$, (b) $L/D=1$

[14]. Barari A. & Ibsen L. B. 2011 Effect of embedment on the vertical bearing capacity of Bucket foundations in clay. *64th Canadian Geotechnical Conference and 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Engineering, 5th Pan-American Conference on Teaching and Learning of Geotechnical Engineering*, Toronto, Ont, Canada.

[15]. Barari A. & Ibsen L. B. 2012 Undrained response of bucket foundations to moment loading. *Applied Ocean Research*, 36, 12–21.

[16]. Barari A. & Ibsen L.B. 2013 Vertical capacity of bucket foundations in undrained soil. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3), 360-371.

[17]. Ghaseminejad V. & Rowshanzamir M. A. 2017 Evaluation of behavior of bucket foundations under pure loading. *Journal of Scientia Iranica*, 24(6), 2803-2816.

[18]. Zhang Y. K., Li D. Y. & Gao Y. F. 2016 H-M Bearing Capacity of A Modified Suction Caisson Determined by Using Load-/Displacement-Controlled Methods. *China Ocean Engineering*, 30(6), 926–941.

[19]. Zafeirakos A. & Gerolymos N. 2016 Bearing strength surface for bridge caisson foundations in frictional soil under combined loading. *Acta Geotechnica*, 11, 1189–1208.

[20]. Liu M., Lian J. & Yang M. 2017 Experimental and numerical studies on lateral bearing capacity of bucket foundation in saturated sand. *Ocean Engineering*, 144, 14-20.

[21]. Wang X., Yang X. & Zeng X. 2017 Lateral response of improved suction bucket foundation for offshore wind turbine in centrifuge modelling. *Ocean Engineering*, 141, 295-307.

[22]. Zhang P., Hu R., Ding H., Guo Y. & Xiong K. 2017 Comparative analysis of seepage field characteristics in bucket foundation with and without compartments. *Ocean Engineering*, 143, 34-49.

[23]. Zhang P., Wei W., Jia N., Ding H. & Liu R. 2018 Effect of seepage on the penetration resistance of bucket foundations with bulkheads for offshore wind turbines in sand. *Ocean Engineering*, 156, 82-92.

[24]. Hirai H. 2018 Analysis of laterally loaded bucket foundation with external skirt in sand using a Winkler model approach. *Ocean Engineering*, 147, 30-44.

[25]. Plaxis User's Manual, 2005, Version 1.6.

[26]. Achmus M., Akdag C. T. & Thieken K. 2013 Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand. *Applied Ocean Research*, 43, 157–165.

و مشخص شد که افزایش بار قائم می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری افقی و لنگر شود. منحنی‌ها و روابط ارائه شده می‌توانند در طراحی مقدماتی شالوده‌های دامنه‌دار برای تخمین ابعاد هندسه شالوده در ماسه نیمه‌متراکم و برای نسبت عمق حدود یک استفاده شوند. همچنین برای استفاده از این روابط و نمودارها در سایر خاک‌ها و نسبت‌های عمق بیشتر از یک باید با احتیاط عمل نمود.

References

مراجع

[1]. Abdel-rahman K.H. & Achmus M. 2006 Behavior of monopile and suction bucket foundation systems for offshore wind energy plants. *5th International Engineering Conference*, Sharm El-sheikh, Egypt.

[2]. Meyerhof G. G. 1951 The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301-332.

[3]. Meyerhof G. G. 1953 The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads. *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Fndn Engng*, Vol.1, Zurich, 440-445.

[4]. Hansen B. 1975 The Bearing Capacity of Footings. *First Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering Gdansk, Poland*, 22-25.

[5]. Vesic A. S. 1975 Bearing capacity of shallow foundations. *Foundation Engineering Handbook*, Eds Winterkorn & Fang, Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147.

[6]. Cassidy M. J., Byrne BW. & Houlsby GT. 2002 Modelling the behavior of circular footings under combined loading on loose carbonate sand. *Geotechnique*, 52(10), 705–712.

[7]. Houlsby G. T. & Cassidy MJ. 2002 A plasticity model for the behaviour of footings on sand under combined loading. *Geotechnique*, 52(2), 117–129.

[8]. Cassidy M. J. 2007 Experimental observations of the combined loading behavior of circular footings on loose silica sand. *Geotechnique*, 57(4), 397–401.

[9]. Kelly R. B., Houlsby G. T. & Byrne B. W. 2006 A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay. *Geotechnique*, 56(9), 617–626.

[10]. Gourvenec S. & Randolph M. 2002 Effect of strength non-homogeneity on the bearing capacity of circular skirted foundations subjected to combined loading. *proceedings of the twelfth international offshore and polar engineering conference*, Kitakyushu, Japan.

[11]. Gourvenec S. 2007 Shape effects on the capacity of rectangular footings under general loading. *Geotechnique*, 57(8), 637–646.

[12]. Gourvenec S. 2007 Failure envelopes for offshore shallow foundations under general loading. *Geotechnique*, 57(9), 715–728.

[13]. Gourvenec S. 2008 Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading. *Geotechnique*, 58(3), 177–185.

Effect of aspect ratio on behavior of bucket foundations under combined loading in medium dense sand

V. Ghaseminejad^{1*}, M.A.Rowshanzamir²

1 Ph.D student, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2 Assoc. Prof., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

vghaseminejad@gmail.com *

Abstract

Suction caissons have been extensively used in oil and gas industry. Recently bucket foundations are considered an innovative foundation solution to offshore wind turbines. Skirted foundations are increasingly used in the design of offshore wind turbine structures and facilities to withstand combined vertical, horizontal and moment loading conditions. In this study, three-dimensional finite element models of bucket foundations in medium dense sand were analyzed under combined loading. Numerical models were validated by comparing the results of finite element analysis. Sensitivity analyses were performed at different length-to-diameter aspect ratios under combined load with different load eccentricities. The responses of combined load, from pure horizontal load to overturning moments with varying tower heights, to pure moments were compared. Results showed how combined bearing capacity of foundations would depend on aspect ratio and loading conditions. Ultimate limit states were represented as normalized capacities, and the expressions were derived from the results of analysis. Offshore applications of shallow foundations are not limited to the oil and gas industry. In fact, they are recently being used as a new solution to wind turbines. Offshore wind turbines are relatively sensitive to deformations, particularly tilting. In order to withstand against tilting due to wind and wave loads and large lateral and overturning forces, the foundations of offshore wind turbines are setup with peripheral steel skirts which transmit the seabed, trapping a soil plug. Foundations of offshore structures require carrying a very small vertical load, but large horizontal loads and overturning moments. Suction buckets are circular shallow foundations with large diameter, closed at top and open at bottom. Bucket foundations penetrate into the seabed by its self-weight to provide a seal between the skirt tip and the soil and then penetrate by applying an under-pressure inside the skirt compartment until full contact with the soil is obtained. The bearing capacity of the bucket foundations under combined loads increases due to embedment by comparison with a surface foundation ($L/D = 0$). The bearing capacity behavior of the bucket foundations can be expressed through failure envelopes that expand with increasing aspect ratio. In the literature, it is not clearly and quantitatively clarified how the bearing capacity depends on bucket embedment length but can be stated with increasing aspect ratio, failure mechanisms are forced deeper within the soil mass. In November 2002 the first Suction bucket foundation for using of the wind energy converter was installed at the large scale test facility in Frederikshavn. The project was at the time being the largest wind turbine in Denmark. It's total height of turbine was equal 125 m with a bucket diameter of 12 m and skirt length of 6 m (i.e. $L/D = 0.5$). In this report, the effect of aspect ratio on combined bearing capacity of bucket foundations installed in saturated medium dense sand was evaluated. Load-deformation behavior of suction buckets under loads was investigated and compared. The analysis was carried out by loading bucket foundations with a load that allowed the bucket to move freely. When considering the design of the foundations of offshore wind turbines, it is important to understand their elastoplastic deformation behavior as well as ultimate capacities.

Keywords: Bucket foundation, Aspect ratio, Combined bearing capacity, Medium dense sand, Plaxis software