## شبیهسازی سهبعدی پی باکت توربین بادی فراساحلی تحت شرایط بارگذاری یکنواخت

پویان باقری'، مسیح ذوالقدر'، سیّدمحمدعلی زمردیان\*"

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد گروه مطالعات و طراحی، مهندسین مشاور آب و عمران فجر، شیراز <sup>۲</sup>استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه جهرم <sup>۳</sup>دانشیار گروه سازههای آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

دریافت: ۱۳۹۸/۸/۸۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۵/۲۶

### چکیدہ

نیروی باد فراساحلی، یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، قابل اطمینان و رو به رشد در دنیا میباشد. یکی از محدودیتهای اساسی استفاده از توربینهای بادی فراساحلی، هزینه بسیار زیاد ساخت پی این سازهها میباشد که مستلزم شمع کوبیهای عمیق و پرهزینه است. یک راهحل کمهزینه و قابل اعتماد برای رفع این مشکل، استفاده از باکتهای (Bucket) مکشی بهعنوان جایگزین پیهای رایج است که علاوه بر هزینه کم ساختار سادهای نیز دارند. هدف مقاله حاضر بررسی پی از نوع باکت با روش اجزاء محدود سهبعدی میباشد که در توربینهای بادی فراساحلی مورداستفاده قرار می گیرد. ظرفیت باربری و گشتاور واژگونی باکتهایی با ابعاد مختلف و تحت بارگذاری استاتیکی در ارتفاعات مختلف که در خاک ماسهای متراکم و نیمهمتراکم کارگذاری گردیدهاند موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد که ابعاد پی، تراکم خاک و ارتفاع بارگذاری مهمترین عواملی هستند که جابهجایی و چرخش سازه را تحت تأثیر قرار میدهند. بهطوریکه با دو برابر شدن طول پایه باکت، ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی اکت ولیه با افزایش میباید. بهعلاوه این تحت تأثیر قرار میدهند. بهطوریکه با دو برابر شدن طول پایه باکت، ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی اکت در بایر افزایش میباید. بهعلاوه این طرفیتها با جایگذاری باکت در بستر متراکم نسبت به بستر با تراکم متوسط ۵۰٪ بیشتر میشود. همچنین، سختی اولیه با افزایش ابعاد باکت افزایش یو فرفیتها با جایگذاری باکت در بستر متراکم نمان را تراکم متوسط ۵۰٪ بیشتر میشود. همچنین، سختی اولیه با افزایش ابعاد باکت افزایش یو فر فیته و با کاهش ارتفاع اعمال بار کاهش میباید. به منظور ارائه نتایج عملی، منحنیهای نرمال ظرفیت بار افقی و گشتاور واژگونی ارائه شدهاند.

**کلیدواژهها:** توربین بادی فراساحلی، شبیهسازی عددی، پی باکت تکپایه، ماسه، روش اجزاء محدود.

### ۱– مقدمه

تأمین انرژی یکی از دغدغههای مهم کشورهای دنیا میباشد. افزایش جمعیت، گرمایش زمین و نیاز روزافزون به منابع انرژی، انگیزههای مهمی در جهت سوق دادن جوامع به استفاده از انرژی-های پاک مثل انرژی خورشیدی، بادی، موج و غیره میباشد. یکی از روشهای تأمین انرژی از منابع پاک، استفاده از توربینهای بادی فراساحلی بوده که موضوع اصلی این مقاله است. از آنجاکه سرعت باد بهطور متوسط در دریا بیشتر از خشکی میباشد، امکان تولید برق بیشتری در این نوع نیروگاهها فراهم می گردد. همچنین در این نیروگاهها بهعلت عدم وجود موانعی که در خشکی وجود دارند امکان پیش بینی دقیق تر باد و برنامه ریزی جهت اتصال به شبکه برق سراسری حاصل می گردد. با توجه به این که هزینه اولیه این سازهها نسبتاً زیاد میباشد، ساخت آنها در ابعاد بزرگ تر مقرون

بهصرفه است. بهمنظور استحصال انرژی بیشتر نیز، ابعاد این توربینها روز به روز افزایش یافته است. درنتیجه افزایش ابعاد، تنش بیشتری به پی وارد می گردد. بنابراین بررسی رفتار پی، یکی از اجزای مهم طراحی این نوع توربینها میباشد. در خلال یک دهه گذشته مطالعات آزمایشگاهی و میدانی متعددی در مورد رفتار استاتیکی و دورهای پیهای باکت در بستر رسی (Hung همکاران، ۲۰۱۸) و ماسهای (Houlsby و همکاران، ۲۰۱۶) انجام شده است. و همکاران، ۲۰۱۷ انجام شده است. نمای شماتیک توربین بادی فراساحلی با پی باکت در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در یک مطالعه آزمایشگاهی کوچکمقیاسکوچکمقیاس، واکنش پیهای باکت تحت ترکیب بارگذاری قائم، افقی و گشتاور در حالتهای مختلف بارگذاری ازجمله استاتیکی و تناوبی

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۳۲۲۸۶۱۳۰-۷۱۱

آدرس ایمیل: pouyan.bagheri@gmail.com (پ. باقری)، zolghadr.masih@jahromu.ac.ir (م. ذوالقدر)، mzomorod@shirazu.ac.ir (س. م. ع. زمردیان).

موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اعمال نرخهای مختلف بارگذاری تأثیر کمی بر جابهجایی سازه دارد. درحالی که همبستگی زیادی بین شرایط بارگذاری قائم و واکنش باکت دیده شد (Byrne و Houlsby، ۲۰۰۴). در یک مطالعه بزرگمقیاس دیگر که بر روی پیهای از نوع باکت در خاک سیلتی صورت پذیرفت، ظرفیت باربری افقی پی باکت، با توجه به ارتفاعهای مختلف اعمال بار معادل چهار پنجم طول اسکریت<sup>۱</sup> و در زیر کلاهک سازه قرار می-گیرد (Luc و همکاران، ۲۰۱۱) تاکنون مطالعات اندکی بر اساس تحلیلهای عددی بهمنظور تعیین ظرفیت باربری باکت مکشی به-عنوان یک نوع پی مورداستفاده در سازههای فراساحلی انجام شده است (Bagheri ۲۰۱۹، ۲۰۱۹ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ایمام ایم ایم در ۲۰۱۹.

بهطورکلی، مطالعات اندک و پراکندهای در مورد رفتار باکت استفادهشده بهعنوان پی در توربینهای بادی فراساحلی صورت پذیرفته که بیشتر آنها بر اساس نتایج آزمایشهای کوچکمقیاس میباشند که عوامل تأثیرگذار محدودی مثل هندسه باکت، برای یک بارگذاری خاص را موردتوجه قرار میدهند. پاسخ باکت به بارگذاری در خاکهایی با ویژگیهای مختلف و ابعاد گوناگون باکت هنوز نامعلوم است. این موضوع ضرورت مطالعه ظرفیت باربری پی مالعه عددی سهبعدی بر اساس روش اجزاء محدود، با توجه به شرایط بارگذاری در ارتفاعات، ابعاد باکت و ویژگیهای گوناگون فیزیکی خاک صورت گرفته است. درنهایت کمیتهای بدون بعد و نمودارهایی جهت طراحی نیز ارائه گردیدهاند.

### ۲ – صحتسنجی شبیهسازی عددی

به منظور اطمینان از نتایج شبیه سازی عددی، ابتدا صحت-سنجی مدل ریاضی در دستور کار قرار گرفته است. بدین منظور داده های حاصل از دو دسته مطالعات میدانی پی باکت در منطقه Houlsby) Frederikshavn و ۲۰۰۹، ۲۰۰۹) در کشور دانمارک و Sandy Haven و Moulsby، ۲۰۰۹) در کشور انگلستان مورداستفاده قرار گرفتند. یکی از این مطالعات که در دانمارک صورت گرفته است شامل آزمایشات بزرگ مقیاسی است دانمارک صورت گرفته است شامل آزمایشات بزرگ مقیاسی است بادی ۳ مگاواتی (توربین بادی از نوع Votas) انجام شده است. در این آزمایشات یک بار جانبی به همراه یک بار قائم با مقدار و ارتفاع بار ثابت اعمال گردید. همچنین در یکی از این آزمایشات، جعبه ای با قطر D=2m و طول پایه L=2m و ضخامت 2mm در یک

مانداب کمعمق در نزدیکی دریا برای شبیهسازی پی باکت نصب گردیده بود. در این شرایط ارتفاع اعمال بار h و بارگذاری قائم V بهترتیب ۱۷/۴ متر و ۳۷/۳ کیلونیوتن بودند. مصالح بستر شامل ماسه بسیار متراکم ریز با وزن مخصوص ۱۹/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و دانسیته نسبی ۹۰٪ و چگالی ویژه ۲/۶۵ بوده است.

شکل (۱) نشاندهنده یک توربین بادی فراساحلی شماتیک با پی باکت و پارامترهای موردمطالعه مذکور میباشد. دادههای دوم حاصل از یک مطالعه میدانی بزرگمقیاس است که در منطقه Sandy Haven در ساحل جنوبی Wales در کشور انگلستان قرار داشته است. در این مطالعه ترکیبی از بار عمودی و گشتاور واژگونی بر یک باکت با قطر ۴ متر، طول پایه ۲/۵ متر و ضخامت پایه ۲۰ میلیمتر بهمنظور ارزیابی قابلیت کاربرد پی باکت برای توربین بادی فراساحلی مورداستفاده قرار گرفته است. ارتفاع بارگذاری و بار عمودی به ترتیب معادل m 14.5 متو ست. ارتفاع بوده است. خاک بستر شامل ماسه با تراکم متوسط میباشد که بهطور تدریجی افزایش مییافتند، مهار شده بود.

روش محاسبه معکوس<sup>۲</sup> بهمنظور صحتسنجی مدل عددی، مورداستفاده قرار گرفت. در این روش، ویژگیهای خاک در یک محدوده مشخص بهازای دو نوع مصالح ماسهای با تراکم متوسط و زیاد با توجه به نوع خاک گزارششده در ادبیات فنی (Houlsby و زیاد با توجه به نوع خاک گزارش شده در ادبیات فنی (Houlsby و تزیاد با توجه مدند و با ویژگیهای بار- چرخش و گشتاور- چرخش تخمینزده شدند و با ویژگیهای خاک در جدول (۱) ارائه گردیده مقایسه شدند.





400 Frederikshavn, Denmak 350 300 Ê 250 =44°, Eoed=105 MN/m2 \_\_\_\_φ'=42°, Eoed=99 MN/m2 -φ'=41°, Eoed=95.8 MN/m2 - φ'=40°, Eoed=94.8MN/m2 φ'=39 °, Eoed=90.8 MN/m2 -- φ'=39 °, Eoed=89.9 MN/m2 50 -Frederikshavn, Field test φ'=38°. Eoed=85 MN/m2 A 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12  $2R\theta(m)$ (الف) 90 Sandy haven, Wales 80 70 60 (Z 50 H 40 30 φ'=39°, Eoed=81.3 MN/m2 - φ'=38°, Eoed=78.6 MN/m2 20 φ'=37°, Eoed=74.2 MN/m2 — φ'=37°, Eoed=69 MN/m2 --φ'=36°, Eoed=62 MN/m2 --- φ'=35°, Eoed=55 MN/m2 10 - Field test 0 0.5 2 2.5 0 1.5 θ (°) (ب)

شکل ۲- مقایسه نتایج شبیهسازی عددی و دادههای میدانی برای باکت: الف) کشور دانمارک، ب) کشور انگلستان

### ۳- شبیهسازی عددی

پس از اطمینان از نتایج شبیهسازی عددی، بهمنظور ارزیابی رفتار باکت در بارگذاری استاتیکی در ارتفاعات مختلف، باکت با ابعاد مختلف بهوسیله روش عددی اجزاء محدود در حالت سهبعدی شبیهسازی گردید. مشابه مرحله صحتسنجی، با توجه به ساختار متقارن سازه، نیمی از پی باکت بهمنظور شبیهسازی و تحلیل نتایج موردتوجه قرار گرفت و همچنین جابهجایی در کلیه مرزهای مدل عددی شامل کف، تمام جهات پیرامونی و عمود بر جهت تقارن، بهصورت ثابت در نظر گرفته شدند. بهمنظور شبیهسازی بارهای افقی، از روش جابهجایی کنترلشده استفاده گردید. بهمنظور شبیهسازی، پاسخ غیرخطی خاک و سختی سکانتی<sup>۳ ref</sup> در دو تراکم مختلف مورداستفاده قرار گرفت (جدول (۲)). ویژگیهای تراکم ملاق با مطالعات قبلی انجامشده بهوسیله پاسخ زیر (Ryu،

جدول ۱- ویژگیهای خاک مورداستفاده در محاسبات معکوس باتوجه به (Houlsby و همکاران، ۲۰۰۵؛ Houlsby و Byrne،

Houlsby ؛ ۲۰۰۰ و Byrne و

ماسه متراكم	ماسه با تراکم متوسط	نوع خاک
۱۹/۵	۱۸/۵	γ (kN/m <sup>3</sup> ) وزن واحد حجم
131-1.8	۱۰۲-۲۰	<i>E<sup>ref</sup> (</i> MN/m²) سختی سکانتی
۱۰۵-۸۵	<b>Δ</b> Δ-ΔΔ	(MN/m²) سختی مماسی
342-512	۳۰۵-۲۱۱	سختی نسبی باربرداری به بارگذاری مجدد E <sup>ref</sup> <sub>ur</sub> (MN/m²)
•/1	•/1	(kN/m²) چسبندگی مؤثر
<b>۴۴</b> -Тл	۳۹-۳۵	زاویه اصطکاک مؤثر $arphi'$ (°)
۱۴-۸	۹–۵	زاويه اتساع $\psi$ (°)

مقایسه دادههای میدانی و مقادیر تخمینزده شده حاصل از شبیهسازی عددی بهوسیله روش المانهای محدود و با استفاده از مدل عددی PLAXIS 3D نسخه ۲۰۱۲ انجام شد (Brinkgreve، ۲۰۱۲). با توجه به ساختار متقارن سازه، نیمی از پی باکت به-منظور شبیهسازی و تحلیل نتایج موردتوجه قرار گرفت. جابهجایی در کلیه مرزهای مدل عددی شامل کف، تمام جهات پیرامونی و عمود بر جهت تقارن، بهصورت ثابت در نظر گرفته شدند. نتایج مقایسه با روش محاسبات معکوس در قالب منحنیهای گشتاور-چرخش (برای مطالعه اول، دانمارک) و منحنیهای بار افقی-چرخش (برای مطالعه دوم، انگلیس) در شکل (۲) ارائه شده است.

در هر دو حالت نتایج دادههای میدانی در محدوده شبیهسازی عددی قرار گرفته است. در حالت اول بهترین همبستگی بین پارامترهای مدول تانژانت و زاویه اصطکاکی معادل و  $E_{oed}^{ref} = 95800 \, kN/m^3$  بهدست آمد. همان طور  $\varphi' = 41^{\circ}$ که دیده میشود، گشتاور نهایی واژگونی حاصل از شبیهسازی عددی و دادههای میدانی مشابه یکدیگر هستند. این موضوع نشان میدهد که مقادیر ویژگیهای خاک ماسه متراکم بهدرستی انتخاب شدهاند. در مطالعه میدانی دوم، موافقت مناسبی بین پارامترهای مدول تانژانت و زاویه اصطکاکی مشاهده شد ن كه قابليت اطمينان ( $E_{oed}^{ref}=~69000\,kN/m^3\,,\, arphi'=37\,^\circ)$ پارامترهای در نظر گرفته شده مربوط به ماسه با تراکم متوسط را نشان میدهد. بهطور مشابه دادههای اندازه گیری شده میدانی، انطباق خوبی با نتایج شبیهسازی عددی دارند. در هر دو مورد شبیهسازیشده، بارگذاری اولیه و ظرفیتهای نهایی بار و گشتاور واژگونی انطباق خوبی با نتایج شبیهسازی عددی دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که قابلیت شبیهسازی عددی ظرفیت باربری پي باكت به وسيله روش المان محدود كه موضوع اصلى اين پژوهش می باشد، با موفقیت راستی آزمایی شده است.

### ۳۳

راهنمای (Brinkgreve، ۲۰۱۲) PLAXIS3D معین شده است. پی باکت بهصورت یک ورقه فولادی مدلسازی شده است. ویژگیهای این ورقه فولادی در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۲- ویژگیهای خاک (Bagheri و Kim، ۲۰۱۹)

ماسه متراكم	ماسه با تراکم متوسط	نوع خاک
۲.	۱۸/۵	γ (kN/m³) وزن واحد حجم
11.11.	V4079	<sup>ref</sup> (kN/m²) سختی سکانتی
٨٨٠٨٨	69859	(kN/m²) سختی مماسی
۳۳۰۳۳۰	2225.7	سختی نسبی باربرداری به بارگذاری مجدد (kN/m²) kkl/m²
•/1	• / 1	(kN/m²) چسبندگی مؤثر
۳۹	۳۵	زاویه اصطکاک مؤثر $arphi'$ (°)
٩	۵	(°) ψ زاويه اتساع
٨۵	۶.	(%) چگالی نسبی

(1.19	و Kim،	Bagheri)	ہے باکت	رهای	وىژگے	-٣	جدول
· · · ·				G - 1	5 5.1		0,

کلاهک	پايە	باكت
۱۰۰	٣٠	ضخامت (mm)
۲۱۰ <i>*</i> ۱۰ <sup>۶</sup>	۲۱۰	مدول الاستيك (GPa (GPa
۰ /٣	۰/۳	v نسبت پواسون
٧Y	YY	وزن واحد حجم γ (kN/m <sup>3</sup> )

بهمنظور شبیه سازی خاک از المانهای چهاروجهی<sup>۴</sup> با ده گره استفاده شده است. در مورد سازه باکت، المانهای صفحهای به-صورت مثلثهای شش گرهی، با داشتن ۵ درجه آزادی مورداستفاده قرار گرفتهاند. در ارتباط با اندرکنش خاک- سازه نیز با استفاده از مفهوم خط اتصال<sup>۵</sup>، به جای مثلثهای دو گرهی تکالمانی، هشت جفت گره با فاصله داخلی ۰ مورداستفاده قرار گرفتهاند. جزئیات بیشتر در مورد المانها در راهنمای عددی PLAXIS 3D

جهت شبیه سازی رفتار خاک، مدل خاک سفت شونده ترکیبی (Hardening Soil constitutive model) مورداستفاده قرار گرفت. فرمول بندی اصلی این مدل بر اساس رابطه هذلولی<sup>7</sup> بین کرنش عمودی و کرنش انحرافی بوده است.

شبیهسازی عددی در طی چندین مرحله انجام گردید. در مرحله اولیه، ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون مرحله اولیه، ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون p' اعمال گردید. سپس پی باکت و سازه برج مانند توربین، با اعمال صفحات فولادی از پیش تعریفشده مدل سازی صفحات گردیدند. پس از آن پی باکت و سازه برج با فعال سازی صفحات فولادی از پیش تعریفشده جایگذاری شدند. اندر کنش خاک-سازه

4. Hyperbolic

5. Interface

نیز با استفاده از مفهوم خط اتصال (Interface) برای هر دو طرف پایه (Skirt) و زیر کلاهک (Lid) باکت شبیهسازی گردیدند. زاویه اصطکاک سطح تماس نیز با توجه به اطلاعات گزارششده در مطالعه موجود تعيين گرديد (DNV 1992] Den Norske ( Veritas، ۱۹۹۲). در مرحله بعدی یک بار مرده قائم به مرکز کلاهک باکت اعمال گردید. این بار نماینده بار ناشی از سازه برجی و سیستم مبدل انرژی بادی میباشد. مرحله بعدی شامل یک بارگذاری افقی و یک گشتاور خمشی است که بهطور همزمان به-صورت تابعی از ارتفاعهای مختلف بارگذاری اعمال گردیدند که بهمنظور تعیین ظرفیت نهایی بار و ممان واژگونی سیستم پی به-تدريج افزايش يافتند. گشتاور واژگونی بهوسيله اعمال ارتفاعهای مختلف بار افقی نسبت به تراز کلاهک باکت تعریف شدند. چرخش باکت متناظر با گشتاور واژگونی نیز بهوسیله اختلاف حرکت عمودی کلاهک باکت در دو نقطه مقابل یکدیگر تعیین گردید. در طى محاسبات انجام شده، انحراف افقى قسمت برج با توجه به ارتفاعهای مختلف بارگذاری تدریجاً افزایش یافته و همزمان نیروی افقی متناظر با آن ثبت گردید. بارگذاریهای مطالعه شده در مرکز كلاهك باكت بررسى شدهاند. همچنين بهمنظور دستيابى بهدقت کافی و اعمال صحیح شرایط مرزی، آنالیز همگرایی شبکه محاسباتی و محدوده مرزی انجام گردید. بدین منظور ابعاد المانها بهتدریج کاهش یافت تا نتایج بهینه در محدوده محاسباتی و مرزها حاصل گردد. یک باکت با قطر ۱۰متر و طول پایه ۱۰متر جهت تحلیل حساسیت مشها<sup>۷</sup> و شرایط مرزی در نظر گرفته شد. شکل (۳) نتایج تحلیل همگرایی حساسیت مشها را بر روی پی باکت نشان میدهد. با توجه به این شکل مدل تعداد بهینه ۳۰۵۶۷ المان همگرا شده است. جزئیات تحلیل دامنه مرزی در شکل (۴) ارائه شده است.



6. Tetrahedral

7. Mesh sensitivity analysis





### ۴- بررسی رفتار مدل تحت بارگذاری استاتیکی ۴-۱- ظرفیت باربری و گشتاور واژگونی

شبیه سازی عددی به وسیله مدل سازی پی باکت که در ماسه متراکم و نیمه متراکم نصب شده، انجام گردید. بدین منظور، نیروی عمودی ۷ معادل با ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر مرکز کلاهک باکت اعمال گردید. این نیرو معادل یک بار معمول وارد بر توربین بادی فراساحلی با ظرفیت ۵ مگاوات می باشد. جهت انجام شبیه سازی، باکت هایی با اقطار ۱۰ و ۱۲ متر و سه نسبت جایگذاری 1 و 0.75 باکت هایی با اقطار ۱۰ و ۲۱ متر و سه نسبت حایگذاری 1 و 0.75 و در شکل یک مشخص شده است) در دو تراکم مختلف خاک مورد توجه قرار گرفتند. روش push-over جهت تحلیل دامنه و سیعی از مقادیر ارتفاع بار مورداستفاده قرار گرفت (m 100 و 70 و 40 و 20 و 10 و 5 و 0 = h). نتایج با توجه به جابه-جایی بار افقی و روابط گشتاور واژگونی – چرخش برای یک ابعاد خاص باکت در شکل (۶) نشان داده شده است.



شكل ۴- تحليل دامنه مرزى: الف) طول، ب)عرض، ج) ارتفاع

شکل (۵) یک نمای سهبعدی از مدل عددی همراه با ویژگی-های هندسی آن را نمایش میدهد. همان طور که در شکل مشخص است، طول و عرض مدل بهترتیب ۶ و ۳ برابر قطر باکت انتخاب شدهاند. بهعلاوه عمقی معادل دو برابر طول پایه بهعنوان عمق خاک در زیر کلاهک باکت در نظر گرفته شد. بهمنظور نیل به نتایج دقیقتر، حجم خاک معادل سه برابر قطر باکت و دو برابر طول پایه باکت با مشهای موضعی متراکمتر در نظر گرفته شدند.



منگل ۶ - ایک و ب) منتخبی های بار - جایف یی، ج و د) منحنی های گشتاور واژگونی - چرخش

ارتفاع اعمال بار تأثیر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی دارد. برای مثال در حالتی که قطر باکت ۱۲ و طول پایه ۹ متر می باشد ، با افزایش ارتفاع بار از ۰ تا ۱۰۰ متر، ظرفیت های بار افقی نهایی و گشتاور واژگونی حدوداً بهتر تیب، ۱۴ و ۲ برابر می گردد. همچنین، بیشینه ظرفیت بار افقی زمانی رخ می دهد که ارتفاع اعمال بار صفر باشد (m 0 ه). در شکل (۷)، جابه جایی افقی و عمودی خاک زیرین باکت با ارتفاع اعمال بار h=100m





شکل ۷- الف) جابهجایی افقی، ب) جابهجایی عمودی برای باکت نصبشده در ماسه متراکم با D=12m و L=9m

در هر دو قسمت این شکل، بیشینه جابهجایی خاک در نزدیکی سمت داخلی کلاهک باکت رخ میدهد. با افزایش بار افقی و گشتاور واژگونی، کلاهک تنها میزان محدودی از بار و گشتاور واژگونی را در مقایسه با پایه انتقال میدهد. بنابراین مقادیر بیشتری از جابهجایی خاک پیرامون کلاهک باکت دیده میشود.

در شکل (۸- الف)، مش تغییرشکل یافته در حالت گسیختگی برای ارتفاع بارگذاری ۱۰۰ متر نشان دادهشده است. رفتار باکت در این حالت همانند یک جسم صلب و فاقد خمیدگی میباشد. در شکل (۸- ب)، توزیع تنش در هر دو سمت داخلی و خارجی باکت برای ارتفاع بارگذاری ۱۰۰ متر نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که در ابتدا که زوایای چرخش کم هستند، تنشها

در طول باکت افزایش مییابند. هرچند بهتدریج در طول کلاهک از میزان آنها کاسته شده و در طول پایه بیشتر میشوند. درنهایت در مرحله گسیختگی تقریباً تمام بار اعمالشده توسط پایههای باکت به المانهای خاک منتقل شدند.





شکل ۸- الف) مشرهای المان محدود تغییرشکل یافته، ب) توزیع تنش عمودی خاک برای باکت نصبشده در ماسه متراکم به L=D=10 m

### ۴-۲- ارزیابی سختی اولیه

سختی اولیه عامل مهمی جهت ارزیابی رفتار سازه پشتیبان در تأسیسات فراساحلی مثل شمع و پی باکت میباشد. تغییرات بارافقی-زاویه چرخش باکت ( $\theta - H$ ) غیرخطی میباشد. بنابراین سختی اولیه (*Kin*) که در این تحقیق مورداستفاده قرار گرفته، به-صورت شیب خط رسم شده از مبدأ منحنی تا چرخش نیم درجه ( $^{\circ} 0.5 = \theta$ ) تعریف شده است. در شکل (۹) سختی اولیه برای میدهد که سختی اولیه، با افزایش ارتفاع اعمال بار، کاهش مییابد. بعکلاوه دانسیته نسبی خاک تأثیر قابل ملاحظهای بر سختی اولیه داشته، به طوری که افزایش دانسیته نسبی، موجب کاهش سختی اولیه می گردد. همچنین سختی اولیه با افزایش اندازه باکت بیشتر میشود.



شکل ۹- منحنیهای سختی اولیه- ارتفاع اعمال بار برای باکت نصبشده: الف و ب) در ماسه متراکم، ج و د) ماسه با تراکم متوسط

تأثیر بارگذاری قائم بر سختی اولیه در شکل (۱۰) نشان داده-شده است. سختی اولیه با افزایش بارگذاری قائم بیشتر می شود. به عنوان نمونه این پارامتر با افزایش بارگذاری قائم از ۰ تا ۲۰ مگانیوتن حدوداً دو برابر گردیده است. به طور مشابه با دو برابر شدن بارگذاری قائم از ۱۰ به ۲۰ مگانیوتن، سختی اولیه ۳۰٪ بیشتر شده است. باوجود این که سختی اولیه با افزایش بار قائم بیشتر می گردد، تغییرات سختی اولیه زمانی که در عمل بارگذاری قائم واقعی (15MN-6) در نظر گرفته شود، بسیار محدود است.



### ۴-۳- تغییرات بار افقی نهایی در برابر گشتاور واژگونی

برای یک باکت با ابعاد معین، منحنی تغییرات ظرفیت باربری افقی (*Hu*) در برابر ظرفیت گشتاور واژگونی (*Mu*) در شکل (۱۱) نشان دادهشده است. همان طور که انتظار می رود، هندسه باکت و تراکم خاک تأثیر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت باربری نهایی و گشتاور واژگونی دارند. ظرفیت بار افقی با افزایش نسبت جایگذاری (L/D) بیشتر می گردد. برای گشتاور واژگونی نیز روند مشابهی دیده می-شود. لازم به ذکر است که در شکل (۱۱) نتایج برای سه نسبت جایگذاری (L/D=0.5, 0.75, 1.0) نشان دادهشده است.

در مطالعه پیش رو، بار مرده افقی معادل 10MN بهمنظور تعیین ظرفیت باربری برای باکت با ابعاد مختلف و با توجه به ارتفاعهای متنوع بارگذاری اعمال گردید. بهمنظور تعیین اثر بار قائم بر ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی، رفتار یک حالت خاص مدل سازی تحت اثر بارگذاریهای قائم گوناگون (MN 2 و 15 و 10 و 6 و 0 = V) بررسی شد. نتایج در شکل (۱۲) نشان دادهشده است. در این شکل تأثیر بارگذاری قائم بر ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی قابل مشاهده است.





شکل ۱۱- منحنیهای تغییرات ظرفیت باربری افقی- گشتاور واژگونی: الف، ج، ه) ماسه متراکم، ب، د، ی) ماسه با تراکم متوسط، الف و ب) L/D=0.5، ج و د) L/D=0.75، ه و ی) L/D=1.0

ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی با افزایش بار قائم، افزایش می ابند. به عنوان نمونه، در باکت با ارتفاع بارگذاری ۱۰۰ متر، زمانی که بار قائم اعمال شده از ۱۰ به ۲۰ مگانیوتن افزایش یابد، به ترتیب حدود ۲۰ و ۲۵ درصد افزایش در ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی دیده می شود. در این شکل خطوط مستقیم نشان دهنده ظرفیت باربری و گشتاور واژگونی تحت بارگذاری های مختلف عمودی می باشند. در حالی که افزایش ارتفاع اعمال بار، منجر به کاهش شیب خطوط مستقیم در ظرفیت باربری می گردد، در مورد ظرفیت نهایی گشتاور واژگونی رفتار معکوسی دیده می شود.

بهمنظور دستیابی به نتایج عملی، متغیرهای بدون بعد بار افقی و گشتاور بهصورت روابط (۱) و (۲) ارائه گردیدند:

$$\overline{H}_u = \frac{H_u}{\nu' L^2 D} \tag{1}$$

$$\overline{M}_{u} = \frac{M_{u}}{\gamma' L^{3} D} \tag{7}$$

که بهترتیب محورهای عمودی و افقی شکل (۱۳) هستند، در این معادلات،  $\overline{H}_u$  بار نهایی افقی بدون بعد،  $H_u$  بار نهایی افقی،  $\overline{M}_u$  گشتاور واژگونی نهایی بدون بعد،  $M_u$  گشتاور نهایی واژگونی،  $\gamma$  وزن واحد مؤثر خاک میباشند و سایر پارامترها قبلاً تعریف شدهاند. لازم بهذکر است که تأثیر هندسه باکت بر ظرفیت گشتاور و بار موردبررسی قرار گرفته و قطر باکت و طول پایه هر دو با وزنهای مختلف، بهمنظور تعریف متغیرهای بدون بعد در نظر گرفته شدهاند.



شکل ۱۲– تأثیر بار قائم بر: الف) ظرفیت بار افقی، ب) گشتاور واژگونی

شکل (۱۳) گراف های نرمال شده اثر متقابل بار نهایی افقی-گشتاور واژگونی را نشان می دهد. از این منحنی ها می توان جهت طراحی اولیه به منظور تخمین بار منجر به شکست و همچنین به منظور تعیین هندسه مناسب باکت استفاده کرد. به عنوان مثال برای یک باکت با ابعاد معین (L,D) و ارتفاع بارگذاری h ارتفاع بارگذاری نرمال شده  $\overline{h}$  را می توان از معادله (۳) تعیین نمود. سپس به صورت گرافیکی از شکل (۱۳) می توان مقادیر  $\overline{H}_u$  و  $\overline{M}_u$  و درنتیجه  $H_u$  و  $M_u$  را به دست آورد.





شکل ۱۳– منحنی های نرمال شده ظرفیت باربری افقی– گشتاور واژگونی برای نسب های جایگذاری: الف) ۰/۵، ب) ۰/۷۵، ج) ۱

۵- نتیجهگیری

در این مطالعه شبیه سازی عددی سه بعدی پی باکت که جزئی از توربین های بادی فراساحلی است، با هدف ارزیابی پاسخ باکت تحت شرایط بار گذاری استاتیکی انجام شد. نتایج این پژوهش به-طور خلاصه به صورت زیر قابل بیان است.

جابهجایی و چرخش پی باکت به میزان زیادی وابسته به نسبت جایگذاری سازه (L/D) میباشد. همبستگی زیادی بین ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی با هندسه باکت و تراکم

خاک وجود دارد. بهطوری که با دو برابر شدن طول پایه باکت در بستر متراکم ظرفیت نهایی بار افقی و گشتاور واژگونی ۲/۵ برابر بیشتر می گردد. در شرایط بارگذاری مشابه، سیستم پی نصب شده در خاک متراکم، در مقایسه با پی مشابهی که در خاک با تراکم متوسط نصب شده، بار افقی و گشتاور واژگونی بیشتری را متحمل می شود. مثلاً در باکت با قطر ۱۲ و طول پایه ۹ متر، هنگامی که جایگذاری در بستر متراکم صورت گیرد، تقریباً ۵۰٪ افزایش در ظرفیت باربری و گشتاور واژگونی در مقایسه با خاک با تراکم متوسط دیده می شود.

حساسیت رفتار سیستم پی تحت شرایط بارگذاری قائم با اعمال ارتفاعات کمتر بار، بیشتر میباشد. این موضوع از شیبهای بیشتر خطوط مستقیم که نشاندهنده ظرفیت باربری افقی تحت مقادیر مختلف بار عمودی میباشند مشخص است. ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی با افزایش بار قائم بیشتر میگردند، مثلاً در باکتی با ارتفاع بارگذاری ۱۰ متر، زمانی که بارگذاری قائم دو برابر شده و از ۱۰ به ۲۰ مگانیوتن تغییر میباد، بهترتیب حدود ۲۰ و ۲۵ درصد افزایش در ظرفیت باربری افقی و گشتاور واژگونی مشاهده میشود. منحنیهای نرمال شده نشاندهنده وابستگی بارگذاری باکت و گشتاور واژگونی به طول و قطر پایه میباشند.

منحنیهای نرمال شده می توانند برای طراحی اولیه پی باکت که جزئی از توربینهای بادی فراساحلی است مورداستفاده قرار گیرند. در این مطالعه تأثیر فرایند نصب سازه و بارگذاری بلندمدت دورهای در نظر گرفته نشده است که می تواند در مطالعات آتی موردنظر واقع گردد. در این صورت لازم است نتایج شبیه سازی عددی با دادههای آزمایشگاهی یا میدانی مورد مقایسه قرار گیرد.

### 8- اعلام تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام میدارند هیچگونه تعارض منافعی بین ایشان وجود ندارد.

### ۷- مراجع

- Bagheri P, Kim JM, "Evaluation of cyclic and monotonic loading behavior of bucket foundations used for offshore wind turbines. Applied Ocean Research", 2019, (91), 101865.
- Bagheri P, Son SW, Kim JM, "Investigation of the loadbearing capacity of suction caissons used for offshore wind turbines", Applied Ocean Research, 2017, 67,148-161.
- Bagheri P, Yoon JC, Park D, Kim JM, "Numerical Analysis of Suction Bucket Foundations Used for Offshore Wind Turbines. In: Randolph M, Doan D, Tang A, Bui M, Dinh V, (eds) Proceedings of the 1st Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering. VSOE 2018", Lecture Notes in Civil Engineering, 2019, 18, Springer, Singapore.

- Bagheri P, Son SW, Kim JM, "Cyclic behavior of soil supporting suction caisson foundation", ICSMGE 2017-19<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 2265-2268.
- Bagheri P, Son SW, Kim JM, "Evaluation of the bearing capacity of suction bucket foundations used for offshore wind turbine by using finite element modeling", ICSMGE 2017-19<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, Workshop ATC7, 17-20.
- Bagheri P, Son SW, Lee DH, Kim JM, "Numerical modeling of monopod and tripod bucket foundation", Proceedings of the 16<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020 (16ARC).
- Brinkgreve RBJ, Engin E, Swolfs WM, Manual for PLAXIS 3D, 2012.
- Byrne BW, Houlsby GT, "Experimental investigations of the response of suction caissons to transient combined loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmenal Engineering, ASCE 130, 2004, 3, 240-253.
- [DNV 1992] Den Norske Veritas, 1992. "Foundations".
- Hung LC, Lee S, Tran NX, Kim SR, "Experimental investigation of the vertical pullout cyclic response of bucket foundations in sand", Applied Ocean Research, 2017, 68, 325-335.
- Hung LC, Lee SH, Vicent S, Kim SR, "An experimental investigation of the cyclic response of bucket foundations in soft clay under one-way cyclic horizontal loads", Applied Ocean Research, 2018, 71, 59-68.
- Houlsby GT, Kelly RB, Huxtable J, Byrne BW, "Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations", Geotechnique, 2006, 56 (1), 3-10.
- Houlsby GT, Ibsen LB, Byrne BW, "Suction caissons for wind turbines", In: Proceedings of international symposium on frontiers in Geotechnics: ISFOG, Perth, Australia, 75-94.
- Houlsby GT, Byrne BW, "Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts", Wind Engineering, 2000, 24 (4), 249-55.
- Houlsby GT, Byrne BW, "Calculation procedures for installation of suction caissons in sand", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 2005, 158 (3), 135-144.
- Jeon HW, Son SW, Kim JM, "Study of dynamic characteristics of west coast Saemangeum sand by torsional shear test", Journal Ocean Engineering and Technology, 2013, 27 (96), 73-80.
- Ryu TG, "Long-term Dynamic Behavior Study of Marine Silty Sand for Offshore Structure Foundation Design", Master Thesis, 2015.
- Zhu B, Kong D, Chen RP, Kong LG, Chen YM, "Installation and lateral loading rests of suction caissons in silt", Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48, 1070-1084.
- Zhu B, Byrne BW, Houlsby GT, "Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (1), 73-83.



## **EXTENDED ABSTRACT**

# **3-D Simulation of Bucket Foundations Used For Offshore Wind Turbines under Monotonic Loading Conditions**

Pouyan Baghri<sup>a</sup>, Masih Zolghadr<sup>b</sup>, Seyed Mohammad Ali Zomorodian<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Senior Design Engineer, Fadjr Water and Reclaimation Consulting Engineers Co.

<sup>b</sup> Department of Water Sciences and Engineering, Jahrom University, Iran

<sup>c</sup> Department of Water Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 30 October 2019; Accepted: 17 August 2021

### **Keywords**:

Offshore wind turbine, Numerical simulation, Monopod bucket foundation, Finite Element Method.

### **1. Introduction**

Bucket foundation is a new foundation concept developed in the last decade for offshore wind turbines. Due to easy and faster installation with significantly lower expenses compared to the conventional foundations such as gravity bases and mono piles, suction caissons foundations are reliable and alternative foundation solutions. In this study push-over analysis was utilized to investigate the response of a typical monopod offshore wind turbine foundation under monotonic loading condition. Finite Element Method was used to define and analyze different scenarios.

### 2. Methodology

### 2.1. Numerical modeling

A 3D finite element model of suction caissons with different geometries were simulated to assess the bucket behavior under various loading conditions. The finite element program PLAXIS 3D (Brinkgreve et al., 2012) software was used for simulation modeling. Displacements in all directions of the model boundaries (the bottom, all directions of periphery plus normal direction on the symmetry) were fixed. The displacementcontrolled method was employed to model the horizontal loads.

### 2.2. Validation of the model

Two field test studies for suction bucket foundation at Frederikshavn (Houlsby et al., 2005) and Sandy Haven (Houlsby and Byrne, 2000) were analyzed by the above model to validate the numerical modeling adopted in this study. To verify the capability of the bucket foundation used for a 3 MW wind turbine, large-scale experiments were conducted at Denmark. The second study consisted of large-scale field tests at Sandy Haven on the south coast of Wales. Displacement and rotation of the bucket were captured for increasingly applied horizontal load.

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* pouyan.bagheri@gmail.com (Pouyan Baghri), zolghadr.masih@jahromu.ac.ir (Masih Zolghadr), mzomorod@shirazu.ac.ir (Seyed Mohammad Ali Zomorodian).

### 3. Results and discussion

### 3.1. Ultimate load, moment capacities

Numerical simulation was performed on a typical model of bucket foundation installed in dense and medium dense sand. A vertical dead load *V*, 10000 *kN*, which is a conventional load for a 5 MW offshore wind turbine was applied on the center of bucket lid. Buckets with the diameters of 10m and 12m, and three embedment ratios, L/D = 0.5, 0.75 and 1 installed into two different soil densities were considered in this study. Push-over analysis was employed for a broad range of load eccentricities (h = 0m, 5m, 10m, 20m, 40m, 70m, 100m).

The load eccentricity has a significant effect on both the ultimate horizontal load and moment capacities. For example, in the case of bucket with the diameter of 12 m and skirt length of 9 m, there can be seen almost 14 and 2 times increases in ultimate horizontal load and overturning moment capacities when with the height of applied load increased from 0 to 100 m. The highest ultimate horizontal loading capacity occurred with no load eccentricity h = 0m.

#### 3.2. Normalized diagram curves

To get more practical diagram curves, dimensionless horizontal load and moment variables were sought and presented in Equations 1 and 2.

$$\overline{H}_u = \frac{H_u}{\gamma' L^2 D} \tag{1}$$

$$\overline{M}_u = \frac{M_u}{\gamma' L^3 D} \tag{2}$$

Where  $\overline{H}_u$  is a non-dimensional ultimate horizontal load,  $H_u$  is an ultimate horizontal load,  $\overline{M}_u$  is nondimensional ultimate overturning moment,  $M_u$  is an ultimate overturning moment,  $\gamma'$  is the effective unit weight of soil, D is a bucket diameter, and L is a bucket skirt length. It should be noted that the effect of bucket geometry on the load and moment capacity was investigated, and both bucket diameter and skirt length with different weights were taken into account to define dimensionless variables. Fig. 1 illustrates the ultimate horizontal load-moment interaction diagrams in a normalized form. The given curves may be employed for the preliminary design to estimate the failure load in addition to finding suitable bucket geometry.



**Fig. 1**. Normalized ultimate horizontal load-overturning moment diagrams (Embedment ratio=0.5; up left, Embedment ratio=1; down).

### 4. Conclusions

3D analyses were conducted for suction caissons used for offshore wind turbines to evaluate the bucket response under various loading conditions. The numerical analysis results show that the displacement and rotation of the bucket foundation are highly dependent on the embedment ratio. There is strong correlation of ultimate horizontal load and overturning moment capacities with bucket geometry and soil density. By presenting the normalized diagram curves, the dependency of the bucket load and moment capacity with skirt length and diameter were found. The normalized curves and equations can be used for the preliminary design of suction bucket foundations used for offshore wind turbines.

### **5. References**

Brinkgreve RBJ, Engin E, Swolfs WM, Manual for PLAXIS 3D, 2012.

Houlsby GT, Ibsen LB, Byrne BW, "Suction caissons for wind turbines", In: Proceedings of International Symposium on Frontiers in Geotechnics: ISFOG, Perth, Australia, 2005, 75-94.

Houlsby GT, Byrne B·W, "Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts", Wind Engineering, 2000, 24 (4), 249-55.