Study on the Behavior of Monopiles used to Founding Offshore Wind Turbines

Dr. Safwan Izzat Abdullah*

(Received 9 / 10 / 2023. Accepted 13 / 11 / 2023)

□ ABSTRACT □

Horizontally loaded piles used in founding electric power generation fans are affected by wind forces and repeated wave loads applied to them. This research is a computer modeling and analytical study of a loaded monopile pile which is used as a foundation for a offshore wind turbine fixed in a medium compacted and compacted sandy soil (sea bed). In this research is Hardening Soil model (HS) used for the soil surrounding the pile.
The horizontal displacement values are determined due to several parameters. It is shown that the horizontal displacement of the monoopile is controlled by several parameters such as: its embedded length, its diameter, the height of the sea water, the value of the total horizontal force and its arm Calculations show that cyclic loading increases the horizontal displacement by 30%, and that the soil subgrade reaction coefficient distribution.with depth is not linear in sandy soil and Rees' method for calculating horizontally loaded piles is not very suitable for monopile piles, especially in the displacement and moment distribution diagrams.

Keywords : Piles , monopile , offshore wind turbine , modeling , Plaxis

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Assistant Professor , Department of Geotechnical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. safwan_abdullah@yahoo.com**

دراسة في سلوكية أوتاد المونوبايل (Monopiles) المستخدمة في تأسيس توربينات الرياح البحرية

د. صفوان عبد الله*

(تاريخ الإيداع 9 / 10 / 2023. قُبِل للنشر في 13/ 11 / 2023)

□ ملخّص □

تتأثر الأوتاد المحملة أفقيا المستخدمة في تأسيس مرواح توليد الطاقة الكهربائية (توربينات الرياح البحرية) بقوى الرياح وبحمولات الأمواج المتكررة المطبقة عليها ، وهذا البحث هو نمذجة حاسوبية ، ودراسة تحليلية على وتد مونوبايل محمل كأساس لتوربين رياح بحري موثوق في تربة رملية متوسطة الارتصاص ومرتصة (سرير البحر) ، وقد استخدم في البحث موديل تصلب التربة (HS) للتربة المحيطة بالوتد . تم تحديد قيم الانزياح الافقي بدلالة عدة بارامترات وتبين ان الانزياح الأفقي للمونوبايل تتحكم فيه عدة بارامترات هي طوله المطمور وقطره وارتفاع ماء البحر وقيمة القوة الكلية الافقية المؤثرة وذراعها ، وقد دلت الحسابات ان التحميل الدوري يزيد الانزياح الافقي بمقدار 30% ، وان توزع معامل رد فعل التربة المرن مع العمق غير خطي في التربة الرملية وأن طريقة Rees في حساب الاوتاد المحملة افقيا لاتصلح كثيرا في اوتاد المونوبايل خاصة في مخطط توزع الانزياح والعزم .

الكلمات المفتاحية: الاوتاد – مونوبايل – توربين رياح بحري – نمذجة – بلاكسيس .

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* مدرس- قسم الهندسة الجيوتكنيكية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.safwan_abdullah@yahoo.com

مقدمة:

تعمد الآن أغلب دول العالم إلى الاستفادة من منابع الطاقة النظيفة التي لاتسبب تلوثا في البيئة ومن هذه المنابع طاقة الرياح التي يستفاد منها في توليد الطاقة الكهربائية ، وبدأت الدول المتقدمة لأجل هذه الغاية في انشاء مايسمى مزارع الرياح سواء في البر أو في البحر وهي زمر أو مجموعات متجاورة من المراوح العملاقة التي تدور بفعل الرياح القوية ، ثم تنقل الفعل الدوراني إلى مولدات مولدة للطاقة الكهربائية موصولة بها .

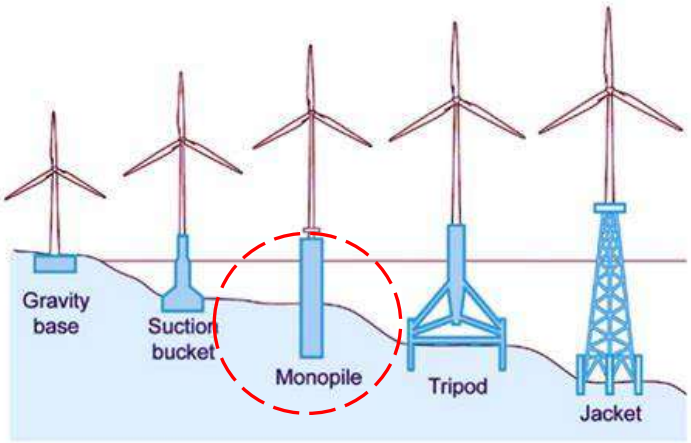
انتشر هذا النوع من الاستخدام الرخيص للطاقة انتشارا كبيرا في العقود الأخيرة ولايزال ينتشر ويتزايد استخدامه بسبب كفاءته العالية وجدواه الاقتصادية وماتزال تقنيات تنفيذ هذه المنشآت الضخمة تتقدم بشكل مضطرد .

تستخدم مزارع الرياح في المناطق البرية المكشوفة الخالية من مصدات الريح الطبيعية ، كذلك في المناطق البحرية القريبة من الساحل نظرا لقوة الرياح البحرية ومساحة الكشف الكبيرة **[1]** .

ان المراوح العملاقة (Turbines) والتجهيزات المرتبطة بها ثقيلة الوزن عموما والحمولات الناجمة عنها خلال الدوران أو السكون هي حمولات متكررة بحسب تكرار هبات الريح ويجب أن تكون هذه المراوح مرتفعة عن الأرض ارتفاعا كبيرا ، والمنشآت الحاملة لها واساساتها بشكل خاص ثابتة في وجه الرياح الشديدة والأمواج .

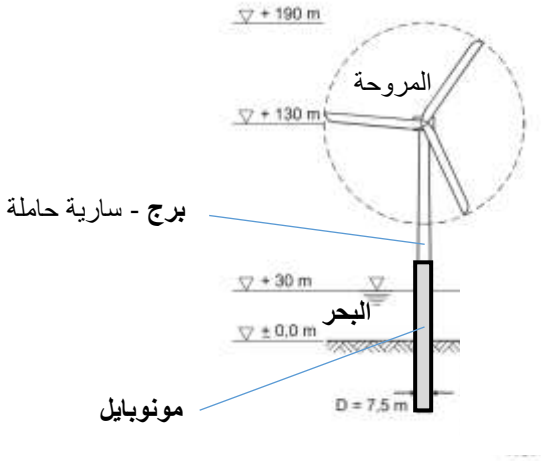
تقام المراوح على أعمدة ضخمة عالية ، ويفضل تأسيسها مباشرة في الأرض المكشوفة في المناطق الداخلية أما في المناطق البحرية والمحيطات فيجب تأسيسها ضمن البحر في المناطق البحرية القريبة من الساحل بسبب مجالات الكشف الكبيرة وسط البحر والتيارات الهوائية القوية هناك ، ويتم وثق هذه المنشآت في الأرض بأوتاد كبيرة القطر قطرها بين 5-8m عموما لأنها تحتاج الى عمق وثق كبير في التربة كلما كان ارتفاع الماء في البحر اكبر وقوة الرياح اعظم ، وقلما تؤسس هذه المنشآت على اساسات مفردة او كتلية إلا بظروف خاصة يتحكم فيها العامل الاقتصادي والاستقراري . تؤسس السارية الحاملة للمروحة بعدة طرائق انظر الشكل (1) :

- الشكل الأول : أساس كتلي Gravity Base للارتفاعات القليلة .
- الشكل الثاني : مخصص للارتفاعات الكبيرة وهو ثلاثية أرجل Tripod مؤلفة من ثلاثة أوتاد مونوبايل .
- الشكل الثالث : **وتد مونوبايل Monopile مفرد** قطره كبير بالنسبة الى طوله (دعامة) يكون استمرارا لجذع المروحة .
- الشكل الرابع : جملة شبكية قائمة على أربعة أوتاد مونوبايل Jacket . للارتفاعات الضخمة .



الشكل 1 : أشكال تأسيس مراوح – توربينات الرياح

إن نظام تأسيس توربينات الرياح البحرية على **مونوبايل مفرد** يصلح حتى اعماق مياه تصل الى 40م ، ويتحمل القسم البرجي (السارية) ليس فقط قوى الرياح بل التأثير الدوري لحركة المروحة الثقيلة **(حمولات متكررة)** cyclical Loads فتنقلها بدورها الى الوتد – الدعامة الذي تؤثر عليه أيضا قوى الأمواج الواردة من البحر مما يسبب توليد قوى أفقية وعزوم انعطاف كبيرة خاصة وأن الأعماق المائية الكبيرة تتطلب **تطويلا** للسارية (القسم البرجي) وبالتالي زيادة عمق أو طول المونوبايل في التربة ، وقد تصل أقطار دعامة المونوبايل المستخدمة الى عدة أمتار كما ذكرنا سابقا . أنظر شكل (2) . تقل أقطار المونوبايل المطلوبة واعماق وثقها في سرير البحر كلما قل ارتفاع منسوب ماء البحر ، وهذا الحل سيكون عمليا جدا واقتصاديا في سوريا نظرا الى ازمة الطاقة المزمنة وقلة أعماق البحر القريبة من الشاطيء [2] . ان الآليات والتجهيزات وطاقم التنفيذ يكون كله على عوامة ضخمة جدا تشبه حاملة الطائرات .



الشكل 2 : دعامة المونوبايل في تأسيس توربينات الرياح في البحر

أهمية البحث وأهدافه:

تتطلب الدراسة الصحيحة لسلوكية أوتاد المونوبايل بسبب عدم إمكانية توفر موديل مخبري عنها وبسبب قطرها الكبير الى استخدام الطرائق العددية لاسيما البرامج التي تهتم بالتحليل الثلاثي البعد 3D وفق العناصر المحددة لان المسالة المدروسة هي مدرسة فراغية بامتياز تتطلب ليس فقط نمذجة حمولات الرياح بل الحمولات المتكررة وحمولات الأمواج ودراسة التأثيرات المتنوعة على الانزياحات وعزوم الانعطاف التي ستحصل في جسم المونوبايل لذلك اعتمدنا في هذا البحث على برنامج Plaxis Monopile Designer باستخدام طريقة العناصر المحددة FEM ، وذلك بعد إجراء المعايرة المطلوبة للبرنامج الحاسوبي المستخدم ومقارنة نتائجه بنتائج قياسات على وتد مونوبايل حقيقي لتوربين هوائي بحري بهدف اختيار موديل المادة الأصلح لدراسة سلوكية المونوبايل والتربة حوله ، ويهدف البحث الى تحقيق فهم سلوكية الوتد والتربة الملتصقة بتأثير حمولات متكررة ثابتة السعة ومتغيرة .

طرائق البحث ومواده:

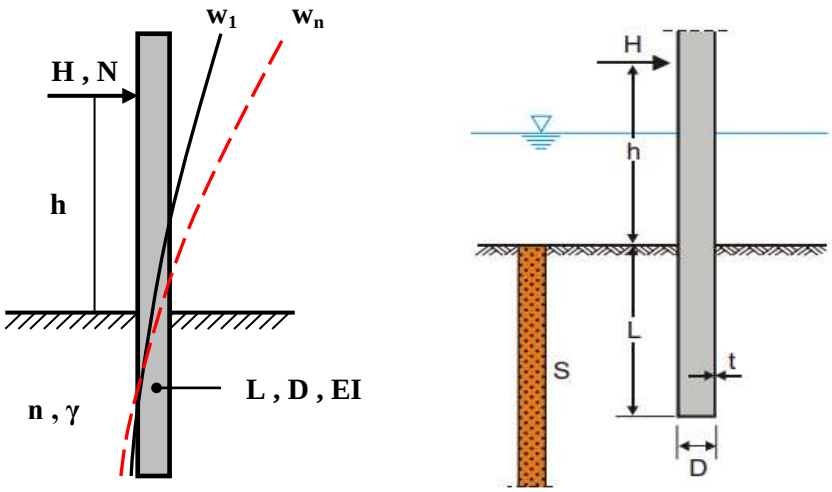
يتأثر الانزياح الجانبي للوتد المحمل بالعديد من البارامترات تتحكم في سلوكية الوتد تحت تأثير الأحمال :

- الحمولة الأفقية المطبقة H

- عدد مرات التحميل المتكرر N
- ذراع الحمولة الأفقية المطبقة h ارتفاعها عن سرير قاع البحر .
- طول الوتد L ، وقطره D ، وصلابته على الانعطاف E.I .
- انزياح الوتد بعد أول دورة تحميل w_1 .
- انزياح الوتد w_n عند دورة التحميل n .

وهو ماتعبر عنه العلاقة التالية ويمثله الشكل (3) :

$$w_N = f(w_1, \gamma, n, L, EI, D, N) \qquad (1)$$



الشكل 3 : شكل تمثيلي يبين انزياح المونوبايل مع البارامترات المؤثرة على الانزياح

تم إنشاء النموذج الحاسوبي على برنامج Plaxis Monopile ، واختيرت أبعاد النموذج الحاسوبي بحيث تكون التأثيرات الجانبية في حدها الأدنى لذلك لايجل أن يقل لاتقل امتداد النموذج عن 6.D من جوانب الوتد المحيطة به ، ولايقل عن 2.D أسفل قدم الوتد وذلك ، أما الاحتكاك مابين الوتد والتربة المحيطة به فهو R=0,67 . **[3]** .

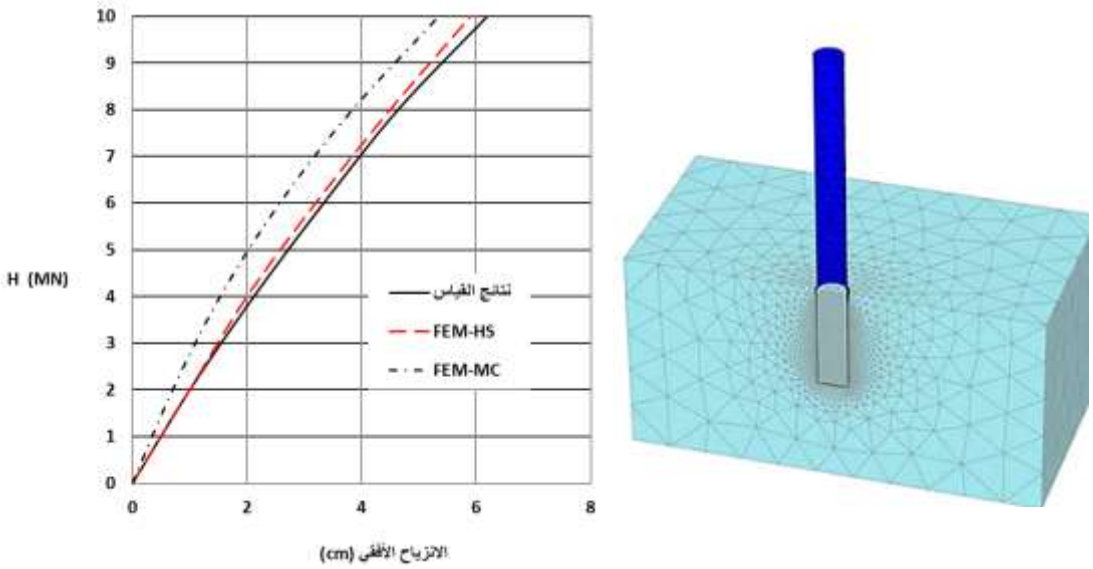
تم في بداية الأمر معايرة البرنامج على جملة حقيقية (مونوبايل حقيقي لتوربين هوائي بحري) من أجل اختيار قانون المادة الأصلح للحساب ، ومن ثم تم الانطلاق في الحساب من حالة الدفع الساكن في التربة كحالة بدائية للحساب، وطبقت حمولة شاقولية على رأس الوتد تمثل وزن التوربين (المروحة) وتجهيزاته الملحقة به، كذلك قوة أفقية H في مستوى ارتفاع الموجة البحرية وبشكل متكرر على الوتد على ارتفاعات h (ذراع رافعة) متغيرة بدءا من سرير البحر، وهذا مايولد عزما مقداره M=H.h .

ركز البحث على حساب ورسم الانزياحات الافقية وعزوم الانعطاف حاسوبيا لكل حالة بدلالة البارامترات التي تتضمنها المعادلة (1).

1 – معايرة البرنامج

تمت معايرة البرنامج المستخدم على وتد مونوبايل حقيقي لتوربين بحري في منطقة بحر الشمال في المانيا طوله المطمور L=30m ، وقطره D=7,5m منفذ ضمن تربة رملية متوسطة الارتصاص الى مرتصة **[4]** ، ومحمل

بحمولة أفقية ذراعها h=L بافتراض ان عمق الماء في البحر هو 30m والقوة الافقية الناجمة عن الموجة البحرية تؤثر عند هذا الارتفاع . رسمت العلاقة بين القوة الافقية المطبقة عند رأس الوتد والانزياح الافقي لراس الوتد ولدى مقارنة نتائج الحساب بنتائج القياسات على الوتد تبين ان قانون المادة الأنسب للبحث هو قانون تصلب التربة HS . شكل (4) . لذلك سوف يعتمد موديل تصلب التربة لتوصيف سلوكية التربة المحيطة بالوتد .

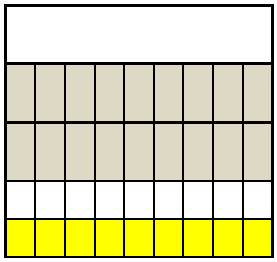


الشكل 4 : نتائج معايرة النموذج على برنامج بلاكسيس

2 – منهج الدراسة البرامترية

تم إجراء الدراسة البارامترية على نفس النموذج الذي أجريت عليه المعايرة الحاسوبية وفق البارامترات التالية التي تم ادخالها للبرنامج لكل حالة على حدة :

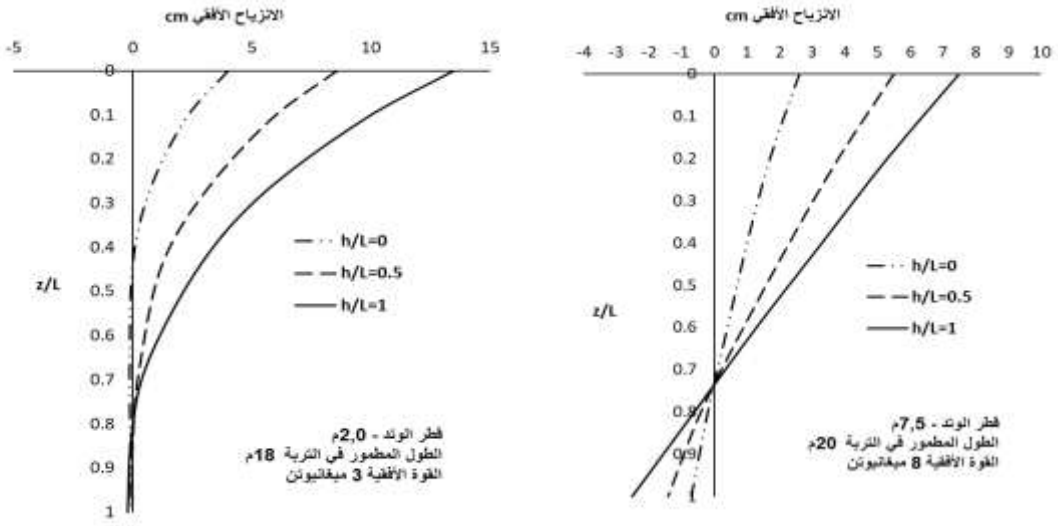
- **نوع التربة** – أجريت التجارب على نوعين من التربة : رمل متوسط الارتصاص ، رمل مرتص ، ويبين الجدول (1) مواصفات التربة لكل من النوعين :



- **مجال ذراع القوة الأفقية بالنسبة الى الطول المطمور** – بين h/L = 0,0MN - 1,0MN
- **مجال طول الوتد المطمور** – بين L = 15m-30m
- **مجال قطر الوتد** – بين D = 2,0m-7,5m
- **مجال القوة الأفقية المطبقة** بين H = 3MN-8MN

النتائج والمناقشة:

أولا – تأثير قيمة ذراع القوة الأفقية المؤثرة – أجري الحساب على النموذج في حالة الحمولة الستاتيكية وتبين أن الانزياح الأفقي يزيد بزيادة h ذراع الحمولة الافقية H بغض النظر عن عزم الانعطاف ويصبح شكل الانزياح أقرب الى الخط المستقيم كلما زاد قطر الوتد أي ان الوتد يتحرك كتلة واحدة . يبين الشكل (5) شكل الانزياح الافقي لحالتين في تربة رملية مرتصة .



الشكل 5 : تأثير ذراع الحمولة الأفقية على توزع الانزياح الافقي للوتد مع العمق (رمل مرتص)

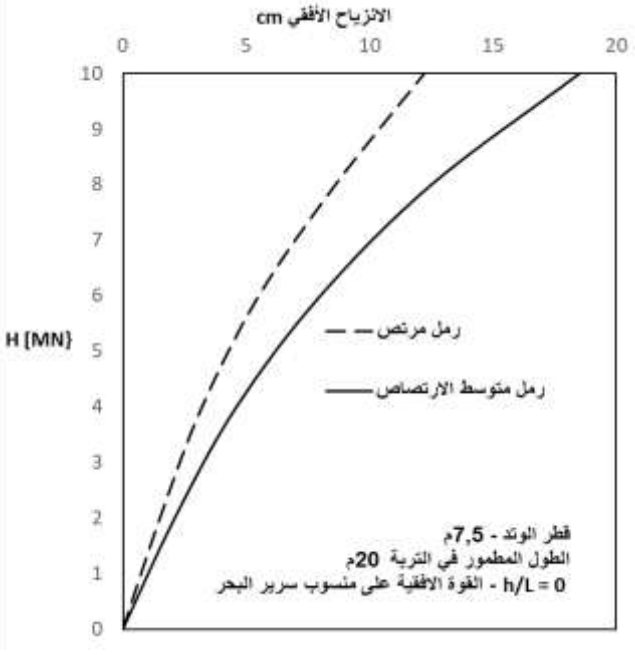
ثانيا – تأثير ارتصاص التربة على النتائج –

يتضح من خلال النتائج أن الانزياح الأفقي يكون أقل كلما كان الرمل أكثر ارتصاصا ويبين الشكل (6) توزع الانزياح الافقي لقوة أفقية متغيرة تؤثر على منسوب سرير البحر .

ومن الواضح ان الرمل كلما كان اكثر ارتصاصا فانه يبدي دفعا معاكسا أكبر للانزياح الافقي مما يجعل انزياح المونوبايل أقل .

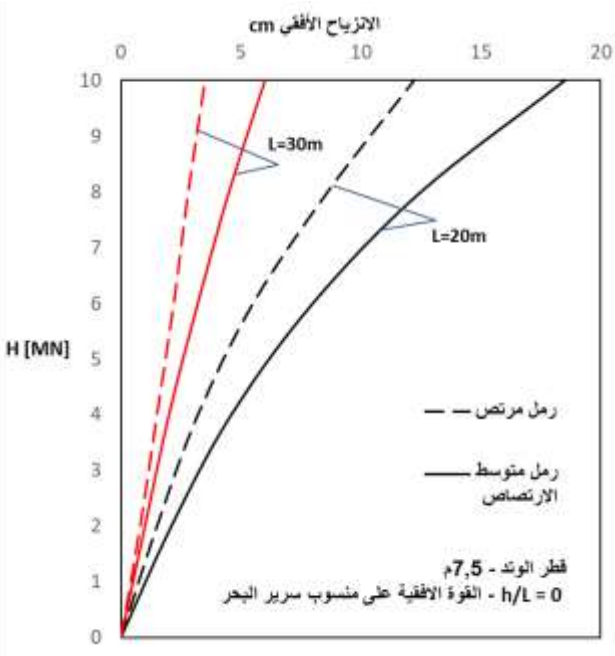
أما إذا زاد ذراع القوة المؤثرة فانه سيسبب انزياحا اكبر يختلف شكله بحسب درجة مرونة او صلابة المونوبايل أي نسبة القطر الى الطول ، وهذا ماستبينه النتائج اللاحقة .

ثالثا – تأثير طول الوتد المطمور L في طبقة سرير البحر – عند حساب النموذج في حالتين الأولى عمق طمر الوتد 20م والثانية عمق طمر الوتد 30م في تربة رملية في حالة h/L=0 يتبين ان الانزياح الافقي يقل



الشكل 6 : تأثير درجة ارتصاص الرمل على الانزياح الافقي

عندما يكون عمق طمر المونوبايل أكبر في التربة وتفسير ذلك هو ازدياد أثر الوثاقة في التربة عندما تكون القوة الأفقية المؤثرة في مستوى سرير البحر . الشكل (7) .



الشكل 7 : تأثير الطول الموثوق لوتد المونوبايل في التربة على العلاقة بين القوة الافقية والانزياح الافقي

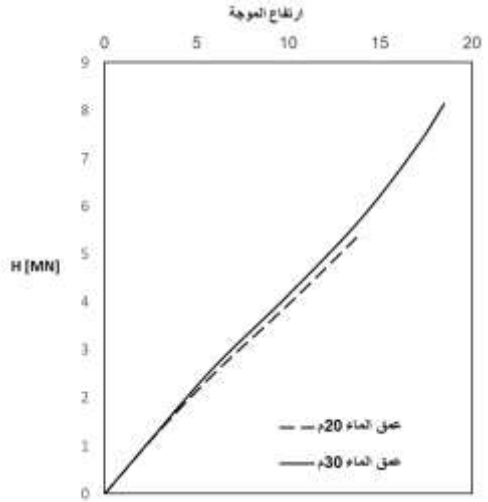
رابعا – تأثير الحمولات المتكررة – تتحمل التوربينات الهوائية حمولات افقية ليس فقط من الرياح لكن أيضا من الأمواج البحرية وان تركيب هذين المؤثرين مع بعضهما امرٌ معقدٌ ومسألة لم تحل بعد ، وفي كل عام تصطدم ملايين الأمواج المختلفة في الشدة والطول بأساس توربين الرياح البحرية مما يولد مايسمى في علم المقاومة "تعب المادة" لذلك – إضافة إلى القوى الأفقية من الرياح والوزن الشاقولي – يصمم المونوبايل أيضا على القوى الأفقية التي تتسبب بها الأمواج البحرية وهي قوى دورية متكررة cyclic .

تحسب نظريا القوة الأفقية الناتجة عن الأمواج بعلاقة "موريسون Morisson" **[5]** :

$$H = C_d \frac{1}{2} \rho D u|u| + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (2)$$

عوامل المعادلة بالنسبة الى الوتد الشاقولي هي : C_M=2,0 ; C_d=0,7 . D – قطر المونوبايل ، و u – السرعة المدارية للموجة المتعلقة بزمن استغراق الموجة (الدور) وهو بين 5–10ثوان) وبارتفاعها ، بينما ρ – كثافة ماء البحر. تتعلق نتائج معادلة "موريسون" عادة بنظرية الموجة المستخدمة **[6]** .

من أجل إعادة حساب النموذج وتحميله بمحصلة القوة الأفقية الكلية H وهي **محصلة** القوة الأفقية الناجمة عن الموجة إضافة إلى قوة الرياح فقد قمنا أولا بحساب قوة الموجة بمعادلة "موريسون" ثم جمعناها الى قوة الرياح الافقية وحددنا قيمة ذراع ذراعها h – بعد المحصلة عن سرير البحر . وذلك لحالتين الأولى عمق ماء البحر فيها 20m ، والثانية 30m . انظر الشكل (8) . وقد استخدمنا مخطط Mittendorf **[7]** في حساب N– عدد الموجات بدلالة ارتفاع الموجة .

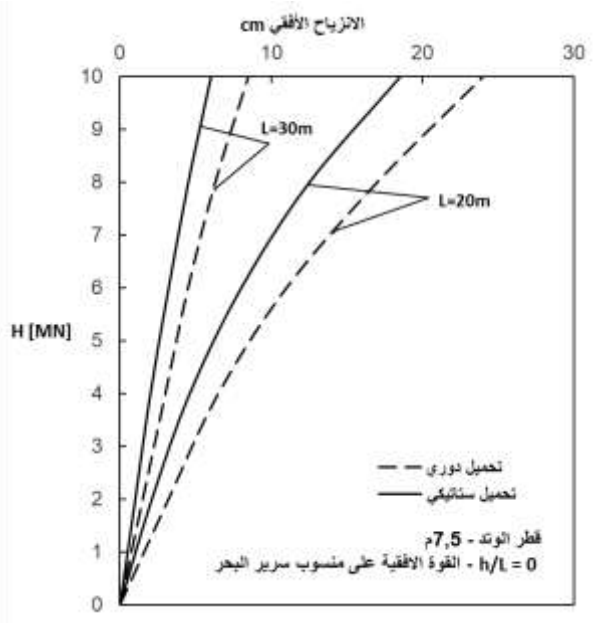


الشكل 8 : علاقة محصلة القوى الافقية الكلية بارتفاع الموجة البحرية

إن تعاقب القوى المتكررة سيؤدي إلى تعب المادة وزيادة التشوهات والدورانات مع الزمن .

اعتمد من أجل نمذجة التحميل المتكرر حاسوبيا على قانون المادة UDCAM-S وعلى الثوابت المستنتجة من تجربة ثلاثي المحاور الدورية الحاسوبية للتربة الرملية وفق برنامج Plaxis-2020 . **[8]** .

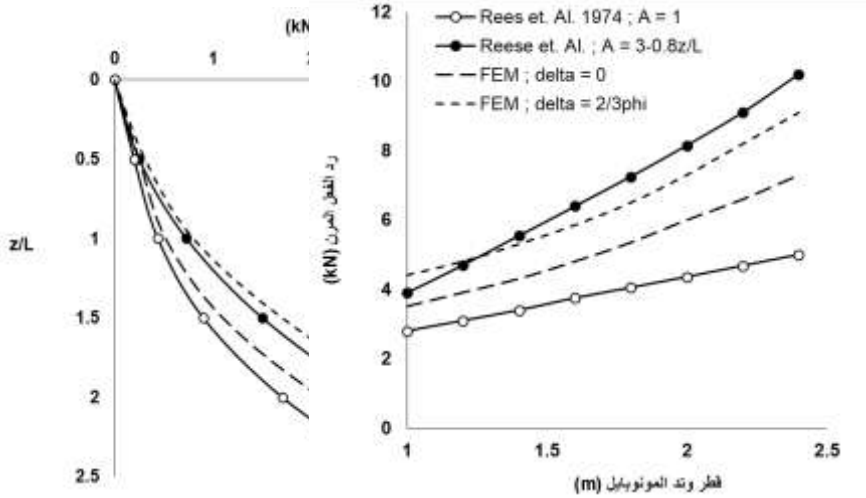
يتبين من مقارنة حالتي التحميل الستاتيكي والدوري لوتد مونوبايل بقطر 7,5م محمل بحالتي التحميل الستاتيكية والدورية وللحالتين : L=20m ; L=30m أن التحميل الدوري يزيد من قيمة الانزياح بمقدار 30% تقريبا عند منسوب سطح ماء البحر بعدد دورات تحميل بين 100 ، 300 دورة تحميل متكررة . شكل (8) .



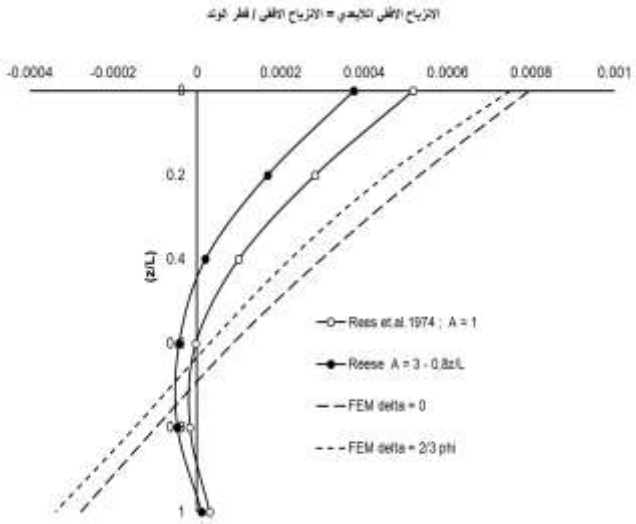
الشكل 8 : المقارنة بين حالتي التحميل الستاتيكية والدورية للمونوبايل في رمل متوسط الارتصاص

3 – المقارنة بين نتائج الحساب العددي والطرائق في توزع رد الفعل المرن

ان التربة تقاوم حركة الوتد نحوها برد فعل ، ورد الفعل هذا هو اجهاد متعلق بمعامل رد فعل التربة المرن طالما ان التربة تنمذج كنوابض ساندة للوتد و وقد أجريت مقارنة بين نتائج الحساب العددي ونتائج طريقة Rees المعروفة [9-10] ، وحلت المسألة لحالتين اولاهما : العمق المطمور للوتد في التربة يساوي قطر الوتد المونوبايل (معامل التصحيح A=1) وهي الحالة تتبع له نتائج البحث أعلاه ، وثانيتهما : اذا كان العمق المطمور للوتد أكبر من قطر الوتد (معامل التصحيح A=3-0,8z/L) ، وقد بينت نتائج الحساب شكل (9) وجود بعض الفروقات في النتائج لكن دلت النتائج ان توزع رد فعل التربة المرن ليس خطيا كما يؤخذ عادة في حسابات الأوتاد في الرمل . يبين الشكل (9) كذلك مقارنة مابين طريقة Rees والحساب العددي في علاقة قطر الوتد برد فعل التربة المرن المقاوم أمام الوتد.



الشكل 9 : المقارنة بين حالتي التحميل الستاتيكية والدورية للمونوبايل في رمل متوسط الارتصاص



الشكل 10 : المقارنة بين الحساب العددي وطريقة Rees في توزع الانزياح الافقي بدلالة العمق

وبالتالي فان معامل رد فعل التربة المرن يتوزع ليس خطيا وانما بشكل قطع . أجريت المقارنة أيضا مابين طريقة الحساب العددي وبين طريقة Rees في توزع الانزياح الافقي على طول الجزء المطمور من الوتد . يبين شكل (10) فروقات واضحة مابين النتائج السبب في ذلك هو اختلاف الشروط الطرفية بين الطريقة النظرية والطريقة العددية لذلك لايمكن التعويل كثيرا على طريقة Rees النظرية في حل مسائل المونوبايل خاصة في توزع الانزياح الافقي وتوزع العزم .

الاستنتاجات والتوصيات:

تعد التوربينات الهوائية البحرية من مصادر الطاقة البيئية الرخيصة لكنها نظرا لوزنها وطبيعة القوى التي تتعرض اليها يجب تأسيسها بشكل صحيح ودراسة سلوكيتها بحيث يمكن تطويرها والتعديل عليها ، وقد بينت نتائج الدراسة البارامترية في هذا البحث أن :

- سلوك المونوبايل محكوم بعدة بارامترات هي قطره ، وطوله المطمور في التربة ، وطوله الظاهر ، وعمق ماء البحر ، والقوة الرياح المطبقة عليه ، وقوى الأمواج ، وذراع القوى الافقية .
- يزداد الانزياح الافقي للمونوبايل كلما زاد ذرع محصلة الحمولة الافقية H . لكن مطاوعته على الانعطاف تقل بزيادة القطر ويكون مخطط الانزياح الافقي أقرب الى المستقيم لان المونوبايل يصبح اكثر صلابة .
- كلما كانت التربة الرملية الموثوق فيها الوتد اكثر ارتصاصا فهي تبدي دفعا مقاوما أكبر للانزياح الافقي ، ويكون رد فعل التربة المرن اكبر .
- تخفف زيادة الطول المطمور للوتد في التربة من الانزياح الافقي بسبب زيادة تأثير الوثاقة .
- يؤدي تكرار التحميل الافقي الدوري الى تعب المادة مع الزمن وزيادة الانزياح الافقي بمقدار 30% عن التحميل الستاتيكي .

إن الدراسة الحالية دراسة جزئية لان الإحاطة بكل البارامترات المؤثرة والتقاطع فيما بينها هو امر معقد ويحتاج الى مزيد من الاختبارات والنمذجات العددية ، كما يوصى في المستقبل باجراء نفس الدراسة الحالية على تربة متطبقة في حال كانت التربة تحت سرير البحر مكونة من عدة طبقات واجراء المقارنات الضرورية اللازمة لانشار بنك معلومات ضروري في هذا الاتجاه .

References:

1. BAUGRUNHTASCHENBUCH , 7. Auflage ,Verlag Ernst Sohn , 2011 , S. 416-418.
2. LENSY,K. : "Gründung von Offshore- Windenergieanlagen – Werkzeuge für Planung und Bemessung . Habilitationsschrift , Fakultät für Ingeniezrwissenschaften , Abteilung Bauwissenschaften , Universität duisburg-Essen , 2008 .
3. PLAXIS MONOPILE DESIGNER , Connect Edition V22 – Manual ,2021.
4. ACHMUS M. et. al. ,"*Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen"* , Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover .
5. TECHET A.H. " *Hydrodynamics for Ocean Engineers* ", Reading #8 , 2004 , S.1-2.
6. EAU "*Empfehlungen des Arbeitsausschusses ''Ufereinfassungen*" – Häfen und Wasserstraßen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin , 2012.
7. MITTENDORF , K. ; ZIELKE , W. "*Extreme Wave Loads on the Support Structure of OWECs*". Proceedings of the 7th German Wind Energy Conference (DEWEK), Wilhelmshaven. 2004.
8. PLAXIS 3D , Connect Edition V22-02 – Manual ,2022.
9. REESE, L. C. ; COX , W. R. ; KOOP, F. D. "*Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*". Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference. Dallas. 1974.
10. REESE, L. C. ; VAN IMPE , W.F. "*Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading*". A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield. 2001.