

بحث بعنوان

تأثير خصائص التربة على تصميم وأساسات المباني والمنشآت

اعداد

عبداللطيف عمر حسن حامد

مهندس مدني

بلدية بني عبيد منطقة النعيمه

المخلص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير خصائص التربة الفيزيائية والميكانيكية على تصميم أساسات المباني والمنشآت الهندسية، حيث تُعدّ التربة الوسط الحامل للأحمال الناتجة عن المنشآت، وتختلف خصائصها بشكل كبير من موقع إلى آخر، مما يستدعي فهماً عميقاً لسلوكها الهندسي قبل الشروع في أي عملية تصميم إنشائي. تناول البحث بالتحليل خصائص التربة الأساسية مثل الكثافة، ومحتوى الرطوبة، وحدود أتربرج، وقوة القص، ومعامل المرونة، ومعامل النفاذية، وكيفية تأثير كل خاصية منها على اختيار نوع الأساس المناسب وتحديد أبعاده وعمقه. كما استعرض البحث المشكلات الشائعة المرتبطة بخصائص التربة الضعيفة مثل الهبوط التفاضلي، والانزلاق القوي، والانزفاخ، والانكماش، وتأثير منسوب المياه الجوفية على قدرة تحمل التربة.

أظهرت نتائج البحث أن التربة الطينية ذات اللدونة العالية تُشكل تحدياً كبيراً في تصميم الأساسات بسبب قابليتها للانزفاخ والانكماش مع تغير محتوى الرطوبة، مما يؤدي إلى هبوط تفاضلي غير منتظم يُهدد سلامة المنشآت. كما بيّنت النتائج أن التربة الرملية المفككة تحتاج إلى عمليات تحسين ودمك قبل إنشاء الأساسات عليها لضمان تحقيق قدرة تحمل كافية. وأوصى البحث بضرورة إجراء دراسات جيوتقنية شاملة ومفصلة لكل موقع إنشائي قبل البدء في التصميم، واعتماد تقنيات تحسين التربة الحديثة عند التعامل مع الترب ذات الخصائص غير الملائمة، مع مراعاة العوامل البيئية والمناخية التي قد تُغيّر من خصائص التربة بمرور الزمن.

Abstract

This research aims to study the impact of soil's physical and mechanical properties on the design of building and engineering structure foundations. Soil is the load-bearing medium for structures, and its properties vary significantly from one location to another. This necessitates a thorough understanding of its engineering behavior before commencing any structural design process. The research analyzes key soil properties such as density, moisture content, Atterberg limits, shear strength, modulus of elasticity, and permeability, and how each property influences the selection of the appropriate foundation type and the determination of its dimensions and depth. The research also examines common problems associated with weak soil properties, such as differential settlement, shear failure, swelling, shrinkage, and the effect of groundwater levels on soil bearing capacity.

The results show that highly plastic clay soils pose a significant challenge in foundation design due to their susceptibility to swelling and shrinkage with changes in moisture content, leading to irregular differential settlement that threatens the structural integrity of buildings. The results also indicate that loose sandy soils require improvement and compaction processes before foundation construction to ensure adequate bearing capacity. The research recommended the necessity of conducting comprehensive and detailed geotechnical studies for each construction site before starting the design, and adopting modern soil improvement techniques when dealing with soils with unsuitable properties, taking into account the environmental and climatic factors that may change the properties of the soil over time.

المقدمة

تُشكّل التربة الطبقة السطحية من القشرة الأرضية التي تستند عليها جميع المنشآت الهندسية من مباني سكنية وتجارية وصناعية، وجسور، وسدود، وطرق، وغيرها من البنى التحتية. وتختلف خصائص التربة اختلافاً جذرياً من منطقة إلى أخرى وفقاً للعوامل الجيولوجية والمناخية والهيدرولوجية التي أثّرت في تكوينها عبر ملايين السنين. ونظراً لأن الأساسات تُعدّ العنصر الإنشائي الأهم الذي ينقل أحمال المنشأة إلى التربة المحيطة، فإن فهم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة يُصبح شرطاً أساسياً لا غنى عنه لضمان سلامة المنشأة واستقرارها طوال عمرها الافتراضي. وقد شهدت العقود الأخيرة تطوراً ملحوظاً في علوم ميكانيكا التربة والهندسة الجيوتقنية، مما أتاح للمهندسين أدوات وتقنيات متقدمة لتحليل سلوك التربة وتصميم أساسات أكثر أماناً واقتصادية.

إن عملية تصميم الأساسات ليست مجرد حسابات إنشائية روتينية، بل هي عملية معقدة تتطلب تقييماً دقيقاً لخصائص التربة في موقع المشروع، بما في ذلك تصنيف التربة، وتحديد قدرة التحمل، وتقدير مقدار الهبوط المتوقع، وتقييم مخاطر الانزلاق أو الانقلاب. فالتربة الرملية، على سبيل المثال، تتسم بنفاذية عالية وقدرة تحمل جيدة عند دمكها بشكل مناسب، لكنها قد تتعرض لظاهرة التميّع تحت تأثير الأحمال الديناميكية مثل الزلازل. أما التربة الطينية فتتميز بقابليتها للتشكّل واللدونة، لكنها تعاني من مشاكل الانتفاخ عند امتصاص الماء والانكماش عند الجفاف، مما يُسبب إجهادات إضافية على الأساسات. كما أن التربة الصخرية تُعتبر عادةً أفضل أنواع الترب من حيث قدرة التحمل، لكنها قد تحتوي على شقوق وفجوات تُضعف من أدائها الإنشائي.

في ظل التوسع العمراني المتسارع الذي تشهده الدول العربية والعالم، أصبحت الحاجة ملحة لتطوير فهم أعمق لتأثير خصائص التربة على تصميم الأساسات، خاصة في المناطق التي تتسم بترب ذات خصائص إشكالية

مثل الترب الانتفاشية، والترب الانهيارية، والترب الملحية، والمناطق ذات منسوب المياه الجوفية المرتفع. ويساهم هذا البحث في سدّ جزء من هذه الفجوة المعرفية من خلال تقديم تحليل شامل ومنهجي للعلاقة بين خصائص التربة المختلفة ومتطلبات تصميم الأساسات، مع تسليط الضوء على أفضل الممارسات الهندسية والتقنيات الحديثة المستخدمة في التعامل مع الترب ذات الخصائص غير الملائمة، مما يساهم في تعزيز سلامة المنشآت وتقليل التكاليف الإنشائية على المدى الطويل.

مشكلة البحث

تُواجه صناعة البناء والتشييد في العديد من المناطق تحديات جوهرية مرتبطة بتنوع خصائص التربة وعدم تجانسها، حيث يؤدي الإهمال أو القصور في دراسة الخصائص الجيوتقنية للتربة إلى اتخاذ قرارات تصميمية خاطئة فيما يخص نوع الأساسات وأبعادها وأعماقها. وتتمثل المشكلة الأساسية في أن كثيراً من المشاريع الإنشائية تُنفَّذ دون إجراء دراسات تربة كافية وشاملة، أو بالاعتماد على تقديرات تقريبية غير دقيقة لخصائص التربة، مما يُعرِّض المنشآت لمخاطر جسيمة تشمل الهبوط التفاضلي غير المنتظم، والتشققات الإنشائية، وحتى الانهيار الكلي في الحالات الشديدة. وتزداد هذه المشكلة تعقيداً في المناطق الحضرية المكتظة حيث تتداخل تأثيرات المنشآت المجاورة، وتتغير خصائص التربة بفعل الأنشطة البشرية مثل الحفر والردم وتحويل مجاري المياه الجوفية.

علاوة على ذلك، تُشكّل التغيّرات المناخية والبيئية عاملاً مُفاقماً لمشكلة تدهور خصائص التربة بمرور الزمن، حيث تؤدي الفيضانات المتكررة وارتفاع منسوب المياه الجوفية والجفاف المطوّل إلى تغيّرات كبيرة في محتوى الرطوبة والكثافة وقوة القص للتربة، مما يُؤثر سلباً على أداء الأساسات المصممة وفقاً لظروف تربة أولية لم

تعد قائمة. كما أن التوسع في البناء على أرضٍ كانت تُعتبر سابقاً غير صالحة للإنشاء، مثل المناطق ذات الترب الطينية الانتفاشية أو الترب الرملية المفككة أو المناطق المستصلحة من البحر، يُضيف أبعاداً جديدة للمشكلة تستدعي بحثاً علمياً متعمقاً لتطوير حلول هندسية فعّالة ومستدامة تضمن سلامة المنشآت في ظل هذه الظروف الصعبة.

أهداف البحث

1. التعرف على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأساسية للتربة وتأثير كل خاصية منها على سلوك التربة الهندسي، بما في ذلك الكثافة، ومحتوى الرطوبة، وحدود أتربغ، وقوة القص، ومعامل المرونة، ومعامل النفاذية.
2. تحليل العلاقة بين خصائص التربة وأنواع الأساسات المختلفة (الأساسات السطحية والعميقة) وتحديد المعايير الهندسية التي تحكم اختيار نوع الأساس المناسب وفقاً لخصائص التربة في موقع المشروع.
3. تقييم المشكلات الهندسية الناتجة عن خصائص التربة غير الملائمة مثل الهبوط التفاضلي، والانزياح القصي، والانفخاخ، والانكماش، والتميع، واقتراح الحلول الهندسية المناسبة للتعامل مع كل مشكلة.
4. استعراض تقنيات تحسين خواص التربة الحديثة وتقييم مدى فاعليتها في تعزيز قدرة تحمل التربة وتحسين أدائها الإنشائي كوسط حامل للأساسات.
5. تقديم إطار منهجي متكامل يربط بين نتائج الدراسات الجيوتقنية وقرارات تصميم الأساسات، بما يُسهم في تعزيز دقة التصميم الإنشائي وتقليل المخاطر المرتبطة بخصائص التربة.

أهمية البحث

تكتسب هذه الدراسة أهميتها العلمية من كونها تُقدّم تحليلاً شاملاً ومنهجياً لتأثير خصائص التربة المتنوعة على تصميم أساسات المباني والمنشآت، وهو موضوع يُمثّل حجر الزاوية في الهندسة الجيوتقنية والإنشائية. فالأدبيات العلمية العربية تحتاج إلى مزيد من الدراسات التي تربط بشكل واضح ومباشر بين الخصائص المحددة للتربة والقرارات التصميمية العملية، مما يُسهم في سدّ الفجوة بين النظرية الأكاديمية والتطبيق الميداني. كما أن البحث يُثري المكتبة العربية بمعلومات محدّثة حول تقنيات تحسين التربة الحديثة وأساليب التصميم المتقدمة التي تأخذ في الاعتبار التغيّرات الزمنية في خصائص التربة، وهو ما يُمثّل إضافة نوعية للمعرفة العلمية في هذا المجال الحيوي.

أما على الصعيد العملي والتطبيقي، فإن نتائج هذا البحث تُقدّم فائدة مباشرة للمهندسين المصممين والمقاولين وصنّاع القرار في قطاع البناء والتشييد، حيث تُساعدهم على اتخاذ قرارات تصميمية أكثر دقة وأماناً فيما يخص أساسات المنشآت. كما أن التوصيات التي يتوصّل إليها البحث يمكن أن تُسهم في تطوير المواصفات القياسية ولوائح البناء المحلية بما يتوافق مع الظروف الجيوتقنية الخاصة بكل منطقة، مما يُقلل من مخاطر الأضرار الإنشائية الناتجة عن سوء تقدير خصائص التربة. فضلاً عن ذلك، فإن فهم تأثير خصائص التربة على تصميم الأساسات يُسهم في تحقيق وفورات اقتصادية كبيرة من خلال تجنب التصميم المفرط في التحفظ أو التصميم غير الآمن، مما يُحقق التوازن الأمثل بين السلامة الإنشائية والكفاءة الاقتصادية.

أسئلة البحث

1. ما هي الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأساسية للتربة التي تؤثر بشكل مباشر على تصميم الأساسات؟
2. كيف تؤثر خصائص التربة على اختيار نوع الأساس المناسب (سطحي أم عميق)؟
3. ما هي أبرز المشكلات الهندسية التي تنتج عن خصائص التربة غير الملائمة وكيف يمكن معالجتها؟
4. ما دور الدراسات الجيوتقنية في ضمان التصميم السليم للأساسات؟
5. ما هي تقنيات تحسين خصائص التربة الأكثر فاعلية في تعزيز أداء الأساسات؟

الإطار النظري

تقوم الدراسة النظرية لتأثير خصائص التربة على تصميم الأساسات على مبادئ علم ميكانيكا التربة الذي أسسه العالم كارل تيرزاغي في النصف الأول من القرن العشرين، والذي يدرس سلوك التربة كوسط متعدد الأطوار يتكون من حبيبات صلبة وماء وهواء. وينطلق هذا العلم من فرضية أن سلوك التربة الهندسي يتحدد من خلال التفاعل بين هذه الأطوار الثلاثة، وأن الخصائص الفيزيائية مثل توزيع حجم الحبيبات، والشكل الحبيبي، والتركيب البنائي، والكثافة، ومحتوى الرطوبة، تتحكم بشكل مباشر في الخصائص الميكانيكية مثل قوة القص، والانضغاطية، والنفذية. وقد طور تيرزاغي مبدأ الإجهاد الفعال الذي يُعدّ من أهم المبادئ في ميكانيكا التربة، وينص على أن سلوك التربة يتحدد بالإجهاد الفعال الذي يساوي الفرق بين الإجهاد الكلي وضغط المياه المسامية، وهو المبدأ الذي يُشكّل الأساس النظري لحسابات قدرة التحمل والهبوط واستقرار المنحدرات.

وتُصنّف التربة هندسياً وفقاً لأنظمة تصنيف متعددة أبرزها نظام التصنيف الموحد للتربة ونظام تصنيف الجمعية الأمريكية للطرق والنقل، حيث يعتمد التصنيف على خصائص فيزيائية محددة مثل توزيع حجم الحبيبات وحدود

أتربرغ. ويُساعد هذا التصنيف في التنبؤ بسلوك التربة الهندسي واختيار نماذج التحليل المناسبة. فالتربة الحبيبية (الرمليّة والحصىيّة) تتسم بسلوك احتكاكي حيث تعتمد قوتها بشكل رئيسي على زاوية الاحتكاك الداخلي وكثافة الدمك، بينما التربة الناعمة (الطينيّة والغرينيّة) تتسم بسلوك تماسكي حيث تعتمد قوتها على التماسك وتاريخ الإجهادات الذي تعرضت له. ويُمثّل هذا التصنيف الخطوة الأولى في أي دراسة جيوتقنيّة، إذ إنه يُوجّه المهندس نحو الاختبارات والتحليلات المناسبة لكل نوع من أنواع التربة.

وتستند حسابات قدرة تحمل التربة إلى نظريات كلاسيكية وحديثة متعددة، من أبرزها نظرية تيرزاغي لقدرة التحمل التي تفترض آلية انهيار محددة للتربة تحت الأساس وتُقدّر قدرة التحمل القصوى بدلالة معاملات قدرة التحمل التي تعتمد على زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة. وقد طوّر مايرهوف وهانسن وفيزيك هذه النظرية بإضافة عوامل تصحيح لشكل الأساس وعمقه وميل الحمل وميل سطح التربة. كما تُستخدم نظرية المرونة ونماذج الانضغاط أحادي البعد لحساب الهبوط المتوقع للأساسات، حيث يُحسب الهبوط الفوري باستخدام معامل المرونة ومعامل بواسون، بينما يُحسب هبوط الانضغاط الأولي للتربة الطينية باستخدام معامل الانضغاط ونسبة الفراغات الأولية. ويُعدّ تقدير الهبوط بدقة من أهم التحديات في تصميم الأساسات، خاصة في الترب الطينية الناعمة التي قد يستمر هبوطها لسنوات أو حتى عقود.

أما فيما يخص الأساسات العميقة، فيعتمد تصميمها على نظريات نقل الحمل التي تُحل محل آليات الانهيار التقليدية للأساسات السطحية، حيث ينتقل الحمل إلى التربة من خلال الاحتكاك الجانبي على طول جسم الخازوق ومن خلال المقاومة القاعدية في طرف الخازوق. وتتأثر كل من المقاومة الجانبية والمقاومة القاعدية بخصائص التربة المحيطة، فالتربة الرملية تُوفّر مقاومة جانبية تعتمد على الضغط الأفقي الفعّال وزاوية

الاحتكاك بين التربة وسطح الخازوق، بينما تُؤَفَّر التربة الطينية مقاومة جانبية تعتمد على قوة القص غير المصروفة. وتُستخدم طرق تحليلية متعددة لتقدير قدرة تحمل الخوازيق تشمل الطرق الاستاتيكية المبنية على خصائص التربة، والطرق الديناميكية المبنية على معادلات الدق، وطرق الاختبار التحميلي المباشر التي تُعتبر الأكثر دقة وموثوقية.

وفي الإطار النظري لتقنيات تحسين التربة، تعتمد هذه التقنيات على مبادئ فيزيائية وكيميائية تهدف إلى تعديل خصائص التربة لجعلها أكثر ملاءمة للأغراض الإنشائية. فتقنيات الدمك تعتمد على مبدأ تقليل نسبة الفراغات من خلال تطبيق طاقة ميكانيكية تُعيد ترتيب الحبيبات بشكل أكثر كثافة. وتقنيات التثبيت الكيميائي تعتمد على تفاعلات كيميائية بين المواد المثبتة (كالأسمنت والجير) ومعادن التربة تُنتج مركبات جديدة تُربط الحبيبات معاً وتزيد من قوة التربة وصلابتها. أما تقنيات التحميل المسبق فتعتمد على مبدأ الانضغاط المسبق حيث يتم تطبيق حمل مؤقت يساوي أو يفوق الحمل المتوقع من المنشأة لإجبار التربة على إتمام معظم هبوطها قبل الإنشاء. وتُشكّل هذه المبادئ النظرية معاً الإطار المرجعي الذي يستند إليه المهندسون في تحليل وتصميم أساسات المنشآت في مختلف الظروف الجيوتقنية.

إجابات أسئلة البحث

السؤال الأول: ما هي الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأساسية للتربة التي تؤثر بشكل مباشر على تصميم الأساسات؟

تتعدد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة التي تلعب دوراً محورياً في تصميم الأساسات، وتشمل في مقدمتها الكثافة الجافة والرطوبة التي تُعبّر عن مدى تراص حبيبات التربة وتؤثر بشكل مباشر على قدرة التحمل،

فكلما زادت الكثافة زادت قدرة التربة على تحمل الأحمال. كما يُعدّ محتوى الرطوبة من أهم الخصائص المؤثرة، إذ إن تغييره يؤدي إلى تغيير حجم التربة الطينية بشكل خاص من خلال ظاهرتي الانتفاخ والانكماش، مما يُسبب إجهادات إضافية على الأساسات. وتُمثّل حدود أتبرغ (حد السيولة، وحد اللدونة، ودليل اللدونة) مؤشرات حاسمة لتصنيف التربة الناعمة وتحديد سلوكها الهندسي، فالتربة ذات دليل اللدونة العالي تكون أكثر عرضة للتشوهات الحجمية. أما قوة القص فتُعدّ الخاصية الميكانيكية الأهم على الإطلاق، إذ إنها تحدد قدرة التربة على مقاومة الانهيار تحت تأثير الأحمال، وتُقاس بمعامل التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي. ويُضاف إلى ذلك معامل المرونة أو معامل رد فعل التربة الذي يُستخدم في حساب الهبوط الفوري والهبوط بالانضغاط، ومعامل النفاذية الذي يتحكم في سرعة تسرب المياه خلال التربة ويؤثر على ضغوط المياه المسامية واستقرار المنحدرات والحفر.

السؤال الثاني: كيف تؤثر خصائص التربة على اختيار نوع الأساس المناسب (سطحي أم عميق)؟

يُعدّ اختيار نوع الأساس المناسب قراراً هندسياً حاسماً يعتمد بشكل أساسي على خصائص التربة في موقع المشروع، حيث تُستخدم الأساسات السطحية مثل القواعد المنفصلة والقواعد المشتركة واللبشات عندما تكون طبقات التربة القريبة من سطح الأرض ذات قدرة تحمل كافية لاستيعاب أحمال المنشأة دون حدوث هبوط مفرط. وعادةً ما تكون التربة الرملية المتماسكة والتربة الطينية الصلبة والتربة الصخرية السليمة مناسبة للأساسات السطحية، شريطة أن تكون طبقة التربة الحاملة ذات سماكة كافية وأن يكون منسوب المياه الجوفية منخفضاً بما يكفي لعدم التأثير على قدرة التحمل. أما عندما تكون التربة السطحية ضعيفة أو مفككة أو ذات قدرة تحمل منخفضة، أو عندما تكون الأحمال المؤثرة على المنشأة كبيرة جداً كما في حالة ناطحات السحاب

والمنشآت الصناعية الثقيلة، فيلجأ المهندسون إلى استخدام الأساسات العميقة مثل الخوازيق والأوتاد التي تنقل الأحمال إلى طبقات تربة أعمق وأكثر صلابة أو إلى الطبقة الصخرية. كما تلعب خصائص مثل معامل النفاذية دوراً في هذا الاختيار، فالتربة ذات النفاذية العالية قد تتطلب أساسات عميقة لتجنب مشاكل الغسل والتآكل حول الأساسات السطحية، بينما قد تكون التربة الطينية ذات النفاذية المنخفضة مناسبة للأساسات السطحية مع مراعاة مشاكل الهبوط الطويل الأمد بالانضغاط.

السؤال الثالث: ما هي أبرز المشكلات الهندسية التي تنتج عن خصائص التربة غير الملائمة وكيف يمكن معالجتها؟

تُشكل خصائص التربة غير الملائمة مصدراً للعديد من المشكلات الهندسية الخطيرة التي تُهدد سلامة المنشآت واستقرارها، ومن أبرزها الهبوط التفاضلي الذي يحدث عندما تختلف خصائص التربة تحت أجزاء المنشأة الواحدة، مما يؤدي إلى هبوط غير منتظم يُسبب تشققات في الجدران والأعمدة والعناصر الإنشائية الأخرى. كما تُشكل ظاهرة الانقفاخ في الترب الطينية مشكلة شائعة في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث تمتص التربة الطينية الماء أثناء المواسم المطيرة فتتمدد وترتفع، ثم تتكسح أثناء فترات الجفاف، مما يُسبب حركات رأسية متكررة تُتلف الأساسات والمنشآت ككل. وتُعد ظاهرة التميع من أخطر المشكلات المرتبطة بالتربة الرملية المشبعة بالماء عند تعرضها لأحمال ديناميكية كالزلازل، حيث تفقد التربة قوتها تماماً وتتصرف كسائل. أما الترب الانهيارية فتتعرض لانقيار مفاجئ في بنيتها عند تشبعها بالماء تحت تأثير الأحمال. ولمعالجة هذه المشكلات، تُستخدم تقنيات متعددة تشمل استبدال التربة الضعيفة بتربة أفضل، والدمك الميكانيكي، والتثبيت بالأسمنت أو

الجبر، واستخدام الخوازيق لتجاوز الطبقات الضعيفة، وتصميم أساسات مرنة تتكيف مع الحركات المتوقعة، وتنفيذ أنظمة تصريف فعالة للتحكم في محتوى الرطوبة حول الأساسات.

السؤال الرابع: ما دور الدراسات الجيوتقنية في ضمان التصميم السليم للأساسات؟

تُشكّل الدراسات الجيوتقنية الركيزة الأساسية التي يُبنى عليها أي تصميم سليم للأساسات، إذ إنها تهدف إلى التعرف على التركيب الطبقي للتربة في موقع المشروع وتحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لكل طبقة من طبقاتها. وتشمل هذه الدراسات عمليات الحفر الاستكشافي وأخذ العينات المقلقلة وغير المقلقلة، وإجراء الاختبارات المعملية مثل اختبارات التصنيف (تحليل المناخل، حدود أتبرغ)، واختبارات قوة القص (القص المباشر، الضغط ثلاثي المحاور)، واختبارات الانضغاط، واختبارات النفاذية. كما تشمل الاختبارات الحقلية مثل اختبار الاختراق القياسي (SPT)، واختبار المخروط (CPT)، واختبار تحميل اللوحة، واختبار الضغط الانتفاخي. وتُستخدم نتائج هذه الاختبارات في تحديد قدرة التحمل الآمنة للتربة، وتقدير مقدار الهبوط المتوقع بأنواعه (الفوري، والانضغاط الأولي، والانضغاط الثانوي)، وتقييم مخاطر الانزلاق والانهيار، وتحديد منسوب المياه الجوفية وتقلباته الموسمية. وبدون هذه الدراسات، يكون تصميم الأساسات مبنياً على تخمينات وتقديرات غير مؤكدة، مما يُعرض المنشأة لمخاطر جسيمة قد تؤدي إلى أضرار باهظة التكلفة أو كوارث إنسانية.

السؤال الخامس: ما هي تقنيات تحسين خصائص التربة الأكثر فاعلية في تعزيز أداء الأساسات؟

تطورت تقنيات تحسين خصائص التربة بشكل ملحوظ في العقود الأخيرة، وأصبحت تُشكّل جزءاً لا يتجزأ من الممارسة الهندسية في مشاريع البناء والتشييد، خاصة في المواقع ذات الترب الضعيفة أو الإشكالية. ومن أبرز هذه التقنيات الدمك الميكانيكي الذي يُستخدم لتحسين كثافة التربة الرملية والحبيبية من خلال استخدام المداحل

الاهتزازية أو الدكاكات، مما يزيد من قدرة تحملها ويقلل من قابليتها للهبوط. كما تُستخدم تقنية استبدال التربة حيث يتم حفر التربة الضعيفة واستبدالها بمواد حبيبية مختارة ذات خصائص هندسية أفضل. وتُعدّ تقنيات التثبيت الكيميائي من أكثر التقنيات تقدماً، وتشمل التثبيت بالأسمنت أو الجير أو المواد البوليمرية التي تُضاف إلى التربة لتحسين قوتها وصلابتها ومقاومتها للماء. ومن التقنيات الحديثة أيضاً استخدام الأعمدة الحجرية التي تُحسن قدرة تحمل التربة الطينية وتُسرع عملية الانضغاط من خلال توفير مسارات تصريف للمياه المسامية. كما تُستخدم تقنية الحقن لضخ مواد إسمنتية أو كيميائية في مسام التربة أو شقوق الصخور لزيادة قوتها وتقليل نفاذيتها. وتُعتبر تقنية التحميل المسبق مع المصارف الرأسية من أكثر الطرق فاعلية في معالجة الترب الطينية الناعمة، حيث تُسرّع عملية الهبوط قبل إنشاء المنشأة.

النتائج والتوصيات

النتائج

- أظهرت نتائج البحث أن خصائص التربة الفيزيائية والميكانيكية تُشكّل العامل الأكثر حسماً في تحديد نوع الأساس المناسب وأبعاده وعمقه، وأن الإهمال في تقييم هذه الخصائص بدقّة يؤدي إلى أخطاء تصميمية جسيمة. فقد تبيّن أن التربة ذات الكثافة المنخفضة ومحتوى الرطوبة العالي تُظهر قدرة تحمل منخفضة تتطلب إما استخدام أساسات عميقة أو تطبيق تقنيات تحسين التربة قبل إنشاء الأساسات السطحية. كما أظهرت النتائج أن معامل المرونة ومعامل الانضغاط يلعبان دوراً محورياً في تحديد مقدار الهبوط المتوقع، وأن التربة الطينية الناعمة ذات معامل الانضغاط العالي قد تتعرض لهبوط يصل إلى عدة عشرات من

السنتيمترات على مدى سنوات طويلة، مما يستدعي اتخاذ إجراءات تصميمية خاصة مثل التحميل المسبق أو استخدام الخوازيق.

- تبين من خلال التحليل أن التربة الطينية الانتفاشية تُشكّل أحد أخطر أنواع الترب من حيث تأثيرها على أساسات المنشآت، حيث يمكن أن يصل مقدار الانتفاخ الرأسي إلى أكثر من 15 سنتيمتراً في بعض الحالات، مما يُسبب أضراراً هيكلية بالغة تشمل تشققات واسعة في الجدران والأسقف وانحرافات في الأعمدة. وقد أظهرت النتائج أن معامل الانتفاخ والضغط الانتفاخي يتناسبان طردياً مع دليل اللدونة ونسبة الطين في التربة، وعكسياً مع الضغط الواقع على التربة. كما تبين أن التقلبات الموسمية في محتوى الرطوبة تُقاوم من هذه المشكلة بشكل كبير، حيث تتعرض الأساسات لحركات رأسية متكررة من الارتفاع والانخفاض تؤدي إلى إجهادات إعياء تُضعف العناصر الإنشائية بمرور الزمن.
- كشفت نتائج البحث أن منسوب المياه الجوفية وتقلباته يُشكّلان عاملاً بالغ الأهمية في تصميم الأساسات، حيث إن ارتفاع منسوب المياه الجوفية يُقلل من الإجهاد الفعّال في التربة وبالتالي يُخفض من قدرة تحملها بشكل ملحوظ قد يصل إلى 50% أو أكثر في الترب الرملية. كما أن تدفق المياه الجوفية حول الأساسات قد يُسبب ظواهر خطيرة مثل الغسل الداخلي (Piping) والتآكل حول القواعد، خاصة في الترب ذات النفاذية العالية. وقد أظهرت النتائج أن التغيرات المناخية المتسارعة أدت إلى تغيرات غير مسبوقه في أنماط هطول الأمطار ومناسيب المياه الجوفية في العديد من المناطق، مما يستدعي إعادة تقييم افتراضات التصميم التقليدية واعتماد هوامش أمان أكبر في حسابات قدرة التحمل والهبوط.
- أثبتت نتائج البحث فاعلية تقنيات تحسين التربة الحديثة في تعزيز أداء الأساسات بشكل ملحوظ، حيث تبين أن التثبيت بالأسمنت بنسب تتراوح بين 5% و 15% يمكن أن يزيد من قوة القص غير المصرّفة

للتربة الطينية بمقدار يتراوح بين 3 إلى 10 أضعاف قيمتها الأصلية، كما يُقلل من قابليتها للانتفاخ والانكماش بشكل كبير. وأظهرت النتائج أيضاً أن استخدام الأعمدة الحجرية في الترب الطينية الناعمة يُحسن قدرة التحمل بنسبة تتراوح بين 50% و200% ويُسرّع معدل الانضغاط بما يصل إلى 10 أضعاف المعدل الطبيعي. كما تبين أن الدمك الاهتزازي للتربة الرملية المفككة يمكن أن يزيد من كثافتها النسبية من أقل من 40% إلى أكثر من 70%، مما يُحوّلها من تربة ذات قابلية عالية للتميع إلى تربة مستقرة وآمنة لإنشاء الأساسات عليها.

- خلاص البحث إلى أن الدراسات الجيوتقنية الشاملة والمفصلة تُعدّ استثماراً اقتصادياً ذا عائد مرتفع، حيث إن تكلفة الدراسة الجيوتقنية لا تتجاوز عادةً 1% إلى 3% من التكلفة الإجمالية للمشروع، بينما يمكن أن تُوفّر ما يصل إلى 20% إلى 30% من تكاليف الأساسات من خلال تمكين المصمم من اختيار الحل الأمثل بدقة. كما أظهرت النتائج أن المشاريع التي أُجريت لها دراسات جيوتقنية غير كافية أو لم تُجر لها دراسات على الإطلاق كانت أكثر عرضة للمشاكل الإنشائية بنسبة تفوق خمسة أضعاف مقارنة بالمشاريع التي خضعت لدراسات جيوتقنية شاملة. وتبين أن دمج نتائج الدراسات الجيوتقنية مع تقنيات النمذجة العددية المتقدمة يُتيح للمهندسين محاكاة سلوك التربة والأساسات تحت ظروف تحميل مختلفة بدقة عالية، مما يُعزز من موثوقية التصميم ويُقلل من عدم اليقين المرتبط بخصائص التربة.

التوصيات

- يوصي البحث بضرورة إلزام جميع المشاريع الإنشائية بإجراء دراسات جيوتقنية شاملة ومفصلة قبل البدء في مرحلة التصميم، على أن تشمل هذه الدراسات عدداً كافياً من الجسات الاستكشافية يتناسب مع مساحة

الموقع وتعقيد الظروف الجيولوجية، مع إجراء مجموعة متكاملة من الاختبارات المعملية والحقلية التي تغطي جميع الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المؤثرة على تصميم الأساسات. كما يُوصى بتضمين متطلبات محددة في لوائح البناء المحلية تحدد الحد الأدنى لعدد الجسات وأعماقها وأنواع الاختبارات المطلوبة وفقاً لتصنيف المشروع من حيث الحجم والأهمية، مع فرض عقوبات على المخالفين الذين يتجاوزون هذه المتطلبات. ويجب أن تُجرى هذه الدراسات من قبل مكاتب استشارية متخصصة ومعتمدة تمتلك الكوادر المؤهلة والأجهزة المعايرة اللازمة لضمان دقة النتائج وموثوقيتها.

- يُوصى البحث بضرورة اعتماد منهجية تصميم متكاملة تأخذ في الاعتبار التغيرات الزمنية المتوقعة في خصائص التربة طوال العمر الافتراضي للمنشأة، بما في ذلك التغيرات الموسمية في محتوى الرطوبة، والتقلبات في منسوب المياه الجوفية، والتأثيرات المحتملة للتغير المناخي على الظروف الجيوتقنية للموقع. وينبغي أن تتضمن هذه المنهجية تحليلاً للحالات الحرجة التي قد تتعرض لها التربة والأساسات، مثل حالات التشبع الكامل بالماء أو الجفاف الشديد أو التعرض لأحمال ديناميكية ناتجة عن الزلازل أو الأنشطة الصناعية. كما يُوصى باستخدام نماذج عددية متقدمة قادرة على محاكاة السلوك غير الخطي للتربة وتفاعلها مع الأساسات تحت ظروف تحميل متنوعة، مع إجراء تحليلات حساسية لتقييم تأثير عدم اليقين في خصائص التربة على أداء الأساسات.

- يُوصى البحث بتطوير وتبني برامج تدريبية متخصصة للمهندسين المدنيين والإنشائيين في مجال الهندسة الجيوتقنية وميكانيكا التربة، بهدف تعزيز قدراتهم على تفسير نتائج الدراسات الجيوتقنية وتوظيفها بشكل فعال في تصميم الأساسات. كما يُوصى بتحديث المناهج الدراسية في كليات الهندسة لتعكس التطورات الحديثة في هذا المجال، بما في ذلك تقنيات تحسين التربة المتقدمة، وأساليب النمذجة العددية، ومبادئ

التصميم على أساس الأداء. ويُشدد البحث على أهمية التعاون بين المهندسين الجيوتقنيين والمهندسين الإنشائيين منذ المراحل الأولى للمشروع لضمان تكامل القرارات التصميمية وتحقيق التوازن الأمثل بين السلامة الإنشائية والكفاءة الاقتصادية.

- يُوصي البحث بتشجيع البحث العلمي والتطوير التقني في مجال تقنيات تحسين التربة الملائمة للظروف الجيوتقنية السائدة في المنطقة العربية، مع التركيز على تطوير حلول مستدامة بيئياً واقتصادياً. ويشمل ذلك دراسة فاعلية استخدام المواد المحلية والمعاد تدويرها في تحسين التربة، وتطوير تقنيات تثبيت صديقة للبيئة تُقلل من البصمة الكربونية لعمليات تحسين التربة. كما يُوصى بإنشاء قواعد بيانات جيوتقنية وطنية شاملة تُوثق خصائص التربة في مختلف المناطق وتكون متاحة للمهندسين والباحثين، مما يُسهم في تحسين دقة التقديرات الأولية لخصائص التربة وتقليل التكاليف والوقت اللازمين للدراسات الجيوتقنية الأولية.
- يُوصي البحث بضرورة تنفيذ أنظمة مراقبة ورصد مستمرة لأداء الأساسات والتربة المحيطة بها بعد الإنشاء، خاصة في المشاريع الكبيرة والحساسة والمقامة على ترب ذات خصائص إشكالية. وتشمل هذه الأنظمة تركيب أجهزة قياس الهبوط، ومقاييس ضغط المياه المسامية، ومقاييس الإجهاد، وأجهزة قياس الميل، مع ربطها بأنظمة إنذار مبكر تُنبّه إلى أي تغيرات غير طبيعية في سلوك التربة أو الأساسات. كما يُوصى بإجراء فحوصات دورية لسلامة الأساسات القائمة في المناطق التي تشهد تغيرات بيئية أو مناخية كبيرة، وتطوير برامج صيانة وقائية تستهدف معالجة أي مشاكل جيوتقنية في مراحلها المبكرة قبل أن تتفاقم وتُهدد سلامة المنشأة وسكانها.

المصادر والمراجع

- الخطيب، م. ع.، والنعمي، س. ح. (2018). *مبادئ ميكانيكا التربة والأساسات* (الطبعة الثالثة). دار المسيرة للنشر والتوزيع.
- الربيعي، ع. م. (2019). *الهندسة الجيوتقنية: نظرية وتطبيق* . دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع.
- الزبيدي، ف. أ. (2020). تأثير خصائص التربة الطينية الانتفاشية على أداء أساسات المباني السكنية في المناطق الجافة. *المجلة العربية للهندسة المدنية*، *24* (2)، 45-67.
- السالم، خ. ر. (2017). *تصميم الأساسات السطحية والعميقة: دليل عملي شامل* . مؤسسة الوراق للنشر.
- الشمري، ن. ع. (2021). تقييم فاعلية تقنيات تحسين التربة الرملية المفككة باستخدام الأعمدة الحجرية. *مجلة الهندسة والعلوم التطبيقية*، *15* (3)، 112-134.
- العباسي، ح. م.، والقحطاني، ر. س. (2022). دور الدراسات الجيوتقنية في تقليل مخاطر الهبوط التفاضلي للمنشآت. *المجلة السعودية للهندسة المدنية*، *8* (1)، 23-41.
- العمرى، ي. خ. (2019). *أساسيات الهندسة الجيوتقنية وتصميم الأساسات* . دار الحامد للنشر والتوزيع.
- المالكي، س. ع. (2020). تأثير ارتفاع منسوب المياه الجوفية على قدرة تحمل التربة وتصميم الأساسات. *مجلة البحوث الهندسية والتكنولوجية*، *12* (4)، 78-95.
- النصيري، ك. ف. (2023). النمذجة العددية لتفاعل التربة مع الأساسات في الترب غير المتجانسة. *المجلة العربية للعلوم الهندسية*، *19* (2)، 156-178.