



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580316](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580316)

Получена: 13.06.2025 г.

Приета: 27.06.2025 г.

ПЪРВИ СЪПКИ ВЪВ ВНЕДРЯВАНЕТО НА ГЕОТЕРМАЛНИ ЕНЕРГИЙНИ ПИЛОТИ В БЪЛГАРСКАТА СТРОИТЕЛНА ПРАКТИКА

Н. Милев¹, А. Тоцев², И. Марков³, А. Жипонов⁴, А. Младенов⁵

Ключови думи: енергиен пилот, термичен цикъл, устойчива геотехника

РЕЗЮМЕ

България разполага с благоприятни условия за прилагане на енергийни пилоти благодарение на стабилния геотермален градиент, наличието на подпочвени води и характерните геотехнически условия в урбанизирани зони като град София. Типичните за района почвени пластове улесняват ефективния топлообмен, а нарастващото търсене на „Nearly Zero Energy Buildings“, подкрепено от ЕС-директиви и интензивно строителство, създава предпоставки за широкото им внедряване. Геотермалните пилоти изпълняват двойна функция – предаване на натоварвания и топлообмен с почвата чрез вградени тръби, като тяхната интеграция в геотехнически конструкции изисква минимални допълнителни инвестиции. Настоящият доклад предлага първи стъпки в адаптирането на технологията в България чрез аналитични решения (в средата на софтуера EPFL Thermo-Pile), свързани с оценка на механичното поведение при термични цикли. Докладът акцентира върху необходимостта от стандартизация, повишена информираност и демонстрационни проекти, които да подпомогнат успешното въвеждане на устойчиви геотехнически решения в местната строителна практика.

¹ Николай Милев, доц. д-р инж., кат. „Геотехника“, ФТС, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: milev_fte@uacg.bg

² Андрей Тоцев, проф. д-р инж., кат. „Геотехника“, ФТС, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: totsev_fte@uacg.bg

³ Илиян Марков, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, ФТС, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: imarkov_fte@uacg.bg

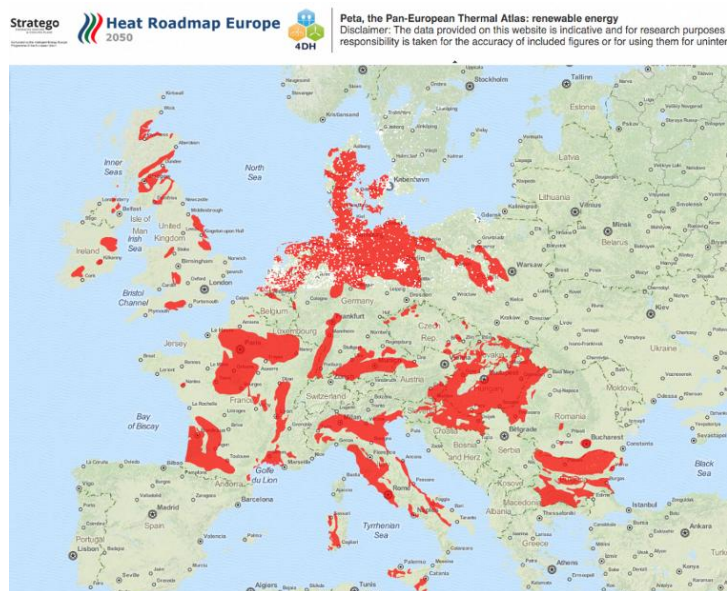
⁴ Александър Жипонов, гл. ас. д-р инж., кат. „Пътища и транспортни съоръжения“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ajiponov_fte@uacg.bg

⁵ Александър Младенов, студент, ССС, СФ, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София

1. Въведение

В контекста на глобалните усилия за намаляване на енергийното потребление и въглеродните емисии използването на възобновяеми енергийни източници в строителството придобива все по-голямо значение. Геотермалната енергия, и по-специално енергийните пилоти, представляват иновативно и устойчиво решение за отопление и охлаждане на сгради, което съчетава геотехническа и енергийна функция в един конструктивен елемент. Енергийните пилоти, известни още като „топлообменни пилоти“, използват вградени тръбни системи за обмен на топлинна енергия с почвата, като едновременно с това поемат вертикални и хоризонтални натоварвания от връхната конструкция.

България разполага с редица благоприятни предпоставки за ефективно внедряване на тази технология: стабилен геотермален градиент в относително плитките почвени слоеве, наличие на подпочвени води в редица урбанизирани райони, както и характерни геоложки условия, които благоприятстват топлопреминаването – фиг. 1. Освен това, прилагането на някои директиви на ЕС за сгради с почти нулево енергийно потребление (т. нар. „Nearly Zero Energy Buildings“) и интензивното развитие на строителната индустрия в големи градове, като София, отварят нови хоризонти за интегриране на геотермални елементи в конструктивната практика.



Фиг. 1. Интерактивна карта на Европа, показваща зони с потенциал за геотермална интеграция на Stratego – [4]

Настоящият доклад има за цел да представи първите стъпки в прилагането на енергийни пилоти в България чрез обзор на технологичния потенциал, геотехническите предизвикателства и приложимостта на аналитични подходи, включително използването на специализиран софтуер като EPFL Thermo-Pile за оценка на механичното поведение при термични натоварвания. Обърнато е внимание и на необходимостта от разработване на стандарти, повишаване на информираността в сектора и реализиране на демонстрационни проекти с цел устойчивото интегриране на технологията в практиката.

2. Внедряване на „енергийни пилоти“ в България

Континенталният климат на България, характеризиращ се с горещи лета и студени зими, стимулира използването на „енергийни пилоти“. Тези системи осигуряват сезонна ефективност, като акумулират излишната топлина през лятото и я използват през зимните месеци, намалявайки зависимостта от конвенционални отоплителни и охладителни системи. Отдалечаването от изкопаемите горива и нарастващите разходи за електроенергия и централно отопление правят геотермалната енергия привлекателна дългосрочна алтернатива с потенциал за значителни икономии.

Развитието на инфраструктурата в страната също създава възможности за интеграция на енергийни пилоти. Големи проекти като разширяването на метрото в София и изграждането на високи сгради изискват „вкопани“ стени и/или дълбоки фундаменти – съответно, шлицови стени и сондажни пилоти. Тъй като тези конструктивни елементи така или иначе са необходими, добавянето на геотермални топлообменни системи към тях изисква минимални допълнителни разходи. Това прави енергийните пилоти практично решение както за ново строителство, така и за модернизация на съществуващата инфраструктура.

Освен това, България има нарастващ научноизследователски и развоен сектор в областта на геотермалната енергия, подкрепен от университети и звена като УАСГ и Българската академия на науките (БАН). Тези институции активно работят по изучаването на енергийни съоръжения, което може да подпомогне адаптацията на енергийните пилоти към местните условия. Освен това, България има достъп до европейски фондове, като Horizon Europe, които подкрепят разработването и прилагането на устойчиви енергийни технологии.

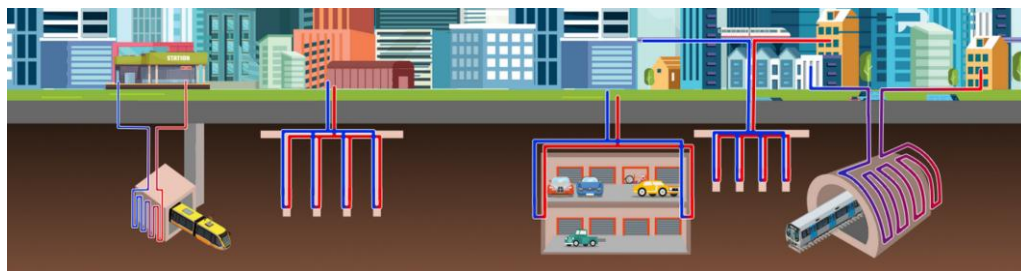
Въпреки тези предимства, няколко предизвикателства трябва да бъдат преодоляни за целите на широко разпространение на енергийните пилоти. Една от основните пречки е липсата на стандартизирани насоки за проектиране и изпълнение, което затруднява инженерите и инвеститорите в интегрирането на тази технология. Икономическата обоснованост също е фактор, тъй като първоначалните разходи за енергийни пилоти могат да бъдат по-високи от тези на конвенционалните фундаменти, въпреки че в дългосрочен план предлагат значителни икономии. Освен това осведомеността и приемането на технологията остават ограничени, тъй като тя все още е сравнително нова за България. Демонстрационни проекти биха били от решаващо значение за доказване на нейната приложимост и ползи.

България разполага с естествени условия, регулаторни стимули и урбанистични тенденции, които правят енергийните пилоти обещаващо решение за устойчиво отопление и охлаждане. Въпреки това, за по-широкото им приложение ще е необходимо преодоляване на предизвикателства, свързани със стандартизацията, икономическата ефективност и информираността на индустрията. С правилните политики и демонстрационни проекти енергийните пилоти биха могли да играят ключова роля в прехода на България към нисковъглеродни и енергийно ефективни сгради и инфраструктура.

3. Технологични особености на „енергийните пилоти“

„Енергийните пилоти“, наричани още „топлообменни пилоти“ или „геотермални пилоти“, са геотехнически конструктивни елементи, оборудвани с тръбни системи, което дава възможност за обмен на топлинна енергия с почвената среда (земна основа) –

фиг. 2. Функцията на геотермалните (енергийни) пилоти е двойна: 1) предаване на натоварването от връхната конструкция в „здрав пласт“; 2) топлообмен с почвата.

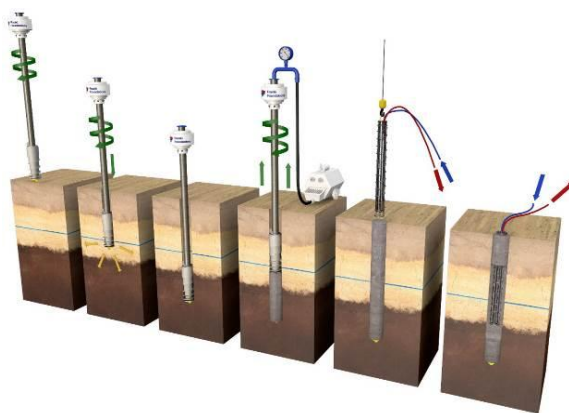


Фиг. 2. Схематично представяне на геотермални съоръжения – COST Action CA21156 – european network for FOstering Large-scale ImplementAtion of energy GEostructure (FOLIAGE)

Голямо предимство на решението е използването елементи, които така или иначе е предвидено да участват в конструктивната система. Като основни предимства могат да бъдат изтъкнати:

- постигане на близо до „нулево-енергийни сгради“;
- адаптиране на технико-икономическо целесъобразно решение за отопление и охлаждане на сгради (офисни, жилищни и други);
- възможност за използване в тандем с широко разпространени геотермални помпи;
- съвместимост със съществуващи компоненти на сградите – ниска себестойност на поддръжката;
- екологична целесъобразност;
- липса на необходимост от лицензиране;
- възможност за енергийно спестяване от порядъка на 45 %.

Интегрирането на топлообменни тръби във фундаментните конструкции, по-конкретно в изливни пилоти, създава нова възможност за използване на възобновяема енергия с оглед на топлинните натоварвания и нужди на сградите и съоръженията – фиг. 3.



Фиг. 3. Изпълнение на геотермални пилоти – Franki Foundations

Въпреки това преплитането между топлинните и геотехническите натоварвания прави проектирането на такъв тип конструкции относително по-сложна и предизвикателна задача спрямо конвенционалните случаи. Предишни изследвания, на други автори, [1 и 5], показват, че топлообменната ефективност се подобрява значително при „правилния“ избор на система от тръби, при увеличаване на броя им в пилотите и при използване на допълнителен топлопроводим материал като добавка към бетона (в допустими граници). Многокомпонентната оптимизация е силно препоръчителна за изостряне на двойната функция на пилотите (топлообменна и геотехнически-конструктивна) – на базата на енергийна, ексергийна, икономическа и екологична оценка, като същевременно следва да се гарантира безопасната експлоатация на пилотите при множество цикли от топлинни натоварвания – механичното влияние върху пилотите може да бъде изследвано чрез софтуера EPFL Thermo-Pile.

Международният интерес във връзка с намаляването на използваната енергия и отделянето на въглеродни емисии по време на експлоатация на сградите нарасна през последните години, а това от своя страна доведе до нуждата от преминаване към сгради с почти „нулева консумация на енергия“. Ключова крачка напред в адаптирането на тази философия е използването на енергийни геотехнически съоръжения, като шлицови стени, тунели, плитко заложи фундаменти и пилоти, които използват геотермална енергия за отопление и охлаждане на сградите и съоръженията. В световен мащаб са изпълнени множество проекти с „енергийни“ геотехнически съоръжения, които понастоящем допринасят за значително намаляване на отделения въглероден диоксид вследствие на човешката дейност в някои райони. Топлообменните пилоти, които са авангардно, но и често срещано решение за фундиране в наши дни, използват почти константната подземна температура за топлообмен посредством вътрешно вградени в армопакетите полиетиленови (HDPE) тръби. Въпреки бързото разпространение на тази технология в развитите държави остават редица предизвикателства, свързани с отчитането на топлинните натоварвания в процеса на геотехническо проектиране – те поражда допълнителни напрежения и деформации в елементите, и могат да бъдат отчетени чрез използване на софтуера EPFL Thermo-Pile. Повечето изследвания на геотермалните пилоти са фокусирани върху енергийните характеристики и термо-механичното им поведение чрез експерименти, лабораторни тестове и числени анализи. Впечатление прави липсата на конкретни ясни насоки за технико-икономическо оптимизиране.

Енергийното дълбоко фундиране чрез топлообменни изливни пилоти е мултидисциплинарна тема, тъй като пресича различни области от професионалната практика, всяка от които допринася за ефективното им използване. Някои от ключовите дисциплини и техните роли могат да бъдат систематизирани по следния начин:

- **Геология, геотехника и геофизика.** Разбирането на геоложките характеристики и геотехническите процеси на даден обект е от решаващо значение за успешното използване на топлообменни пилоти. Геолозите, геотехниците и геофизиците анализират състава, структурата и топлинните свойства на почвата, за да оценят възможността за извличане на геотермална енергия.
- **Строително инженерство.** Строителните инженери проектират и следят изпълнението на геотермалните пилоти. Те гарантират за конструктивната обезпеченост на съоръженията, които от своя страна поемат натоварванията от сградите.
- **Машинно инженерство.** Тази дисциплина е обвързана с проектирането и поддръжката на механичните системи, които осигуряват циркулацията на флуид през енергийните пилоти. Машинните инженери обезпечават ефективността на тези системи, а също така гарантират за надеждност и безопасност.

- **Екология**. Експерти по околната среда оценяват въздействието на геотермалните пилоти върху местните екосистеми. Те работят за минимизиране на неблагоприятните ефекти върху околната среда и осигуряване на съответствие с разпоредбите и целите за устойчивост.
- **Термодинамика и пренос на топлина (топлотехника)**. Специалистите в тази област се фокусират върху принципите за пренос на топлина в геотермалната система. Те оптимизират ефективността на системата при извличане или разсейване на топлина въз основа на термичните свойства на земната основа и циркулиращия флуид.
- **Икономика и управление на проекти**. Икономическата устойчивост на проектите, които предвиждат изграждането на геотермални пилоти, е от решаващо значение. Това включва анализ на разходите и ползите, финансиране и управление на графика и ресурсите на проекта.
- **Право**: Правните експерти (юристи) се занимават с регулаторните аспекти, включително права върху земя, екологични разрешителни и спазване на местните, националните и международните закони и стандарти.
- **Градско планиране и архитектура**. В градски условия интегрирането на геотермалните пилоти, в по-широкия контекст на урбанизма и проектирането на сгради, е от съществено значение. То гарантира, че такива системи са част от устойчивото градско развитие.
- **Управление на енергията и ресурси**. Тази част от процеса включва разбиране и управление на енергийни изходи и входи, гарантиране на съответствието на системата с по-широки енергийни мрежи и потенциалното внедряване на други (допълнителни) възобновяеми енергийни източници.

Снижаването на енергийното потребление и ограничаването на въглеродните емисии по време на експлоатацията на сгради е сред водещите глобални приоритети през последните десетилетия. В този контекст преходът към сгради с почти „нулево енергийно потребление“ става все по-необходим. Съществен принос към реализирането на тази концепция имат енергийните геотехнически съоръжения – шлицови стени, тунели, плитки фундаменти и пилоти, които използват геотермалния потенциал на земната основа за ефективно отопление и охлаждане на сгради и инфраструктура. Основната пречка в масовото прилагане на топлообменните пилоти се крие в липсата на достатъчно сериозна база данни и ясни насоки за тяхното проектиране, изпълнение и поддръжка. Това налага необходимост от разработване на относително лесно достъпни методи и подходи, които да послужат за „наръчник“ на инженери, практики, инвеститори, застрахователи и други. Докладът цели от една страна да отчете някои характерни геоложки условия на територията на България, а от друга да даде предписания относно отчитането на топлинните натоварвания в изчисленията.

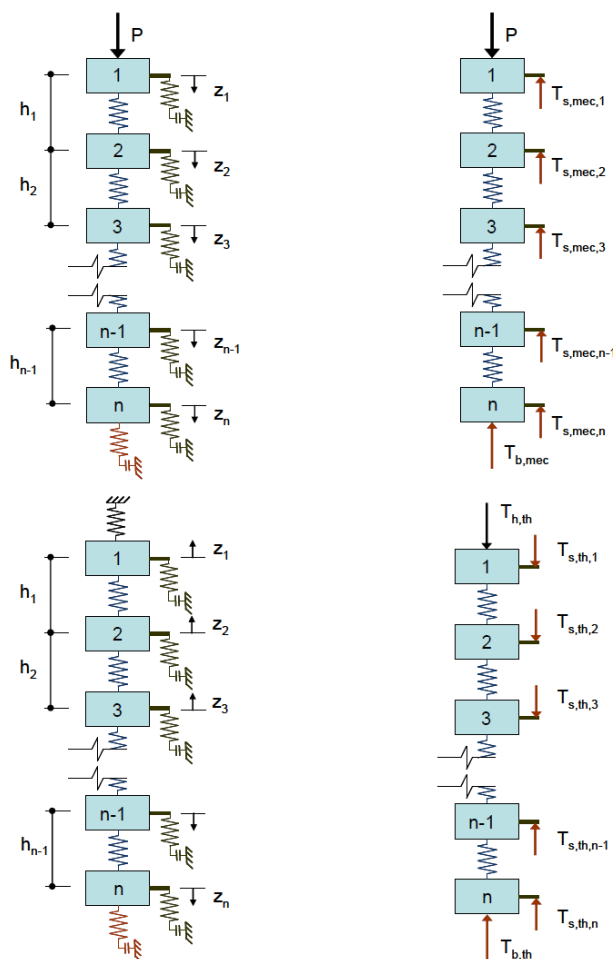
4. Практически пример: механично влияние на геотермалните системи и инсталации върху реагирането на изливни пилоти

Разгледан е практически пример с геотермален енергиен пилот, като фокусът е оценката на допълнително натоварване, което пилотът поема при цикли на нагриване и охлаждане вследствие на системата, която е вградена в него.

4.1. Изчислителен метод – теоретични предпоставки

Възприетият в примера изчислителен метод има следните предпоставки:

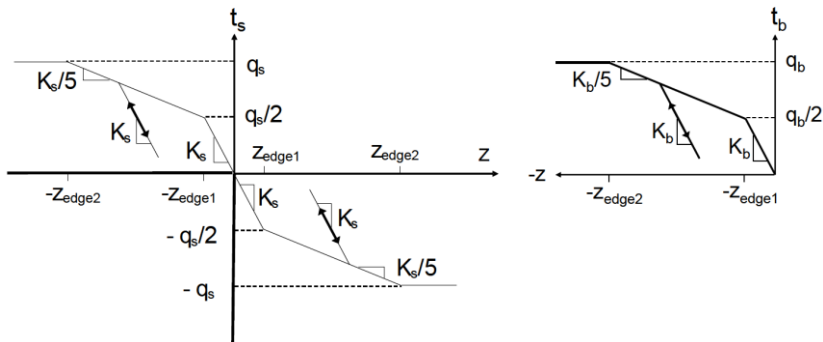
- изчисляването на преместването на пилота се извършва с помощта на едномерна крайна диференциална схема (отчитат се единствено осовите премествания);
- свойствата на пилота (диаметър, еластичен модул и коефициент на топлинно разширение) остават константни по неговата дължина и не се влияят от температурата;
- връзките между околоно триене/преместване, върхово съпротивление/преместване и напрежение/преместване на главата (горния край на пилота) са известни;
- свойствата на почвата и взаимодействието между почвата и пилота не се влияят от температурата.



Фиг. 4. Модел с крайна разлика за топлообменен пилот – изч. на натоварване и преместване

Преместването на пилота при механично натоварване се извършва чрез метод на прехвърлянето на товара – [2 и 7]. При този метод пилотът се разделя на корави елементи, които са свързани помежду си с пружини, представлящи коравината на пилота. Всеки корав елемент взаимодейства еласто-пластично с околната почва чрез повърхнината си. Най-долният елемент на пилота е подпрян заради контакта на пилота със земната основа при върха – отново еласто-пластично взаимодействие между почва и пилот. Връзката между околното триене и преместването на пилота, както и връзката между нормалните напрежения и преместването на пилота при върха, се описват чрез функции за трансфер на натоварването – [3]. Подобна дискретизация на системата позволява да бъдат отчетени различни почвени слоеве с разнообразни свойства в дълбочина – фиг. 4.

Използваният софтуер за представения пример, EPFL Thermo-Pile – [6] отчита взаимодействието между почва и пилот по метода в [3] – фиг. 5.



Фиг. 5. Криви за трансфер на натоварването – [3]

4.2. Описание на разгледания пример

Примерът разглежда случай с пилот, попадащ през 5 почвени разновидности (условно наречени: A1, A2, B, C и D) – преминава през алувиални и пясъчливи почви, като върхът заляга в скална основа (геоложките условия много наподобяват тези в района на град Девня и град Белослав в България) – табл. 1.

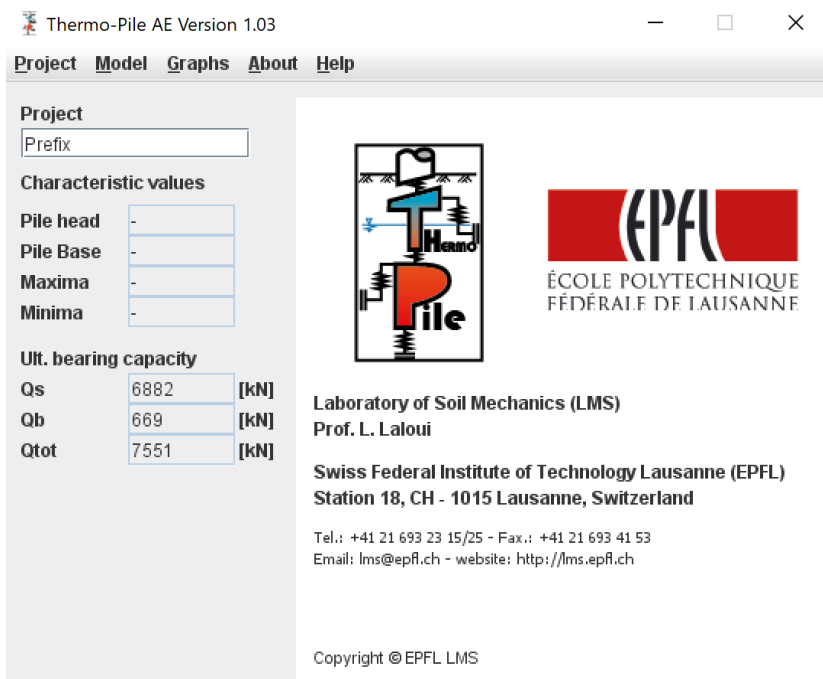
Таблица 1. Изчислителни показатели във връзка с геоложките условия

		A1	A2	B	C	D
Дълбочина	[m]	5.5	12.0	22.0	25.0	25.8
Околно триене	[kPa]	102.0	70.8	74.7	160.0	300.0
Върхово съпротивление	[kPa]	-	-	-	-	11000.0
Пружинна константа по околната повърхнина	[MPa/m]	16.7	10.8	18.2	121.4	121.4
Пружинна константа при върха	[MPa/m]	-	-	-	-	667.7

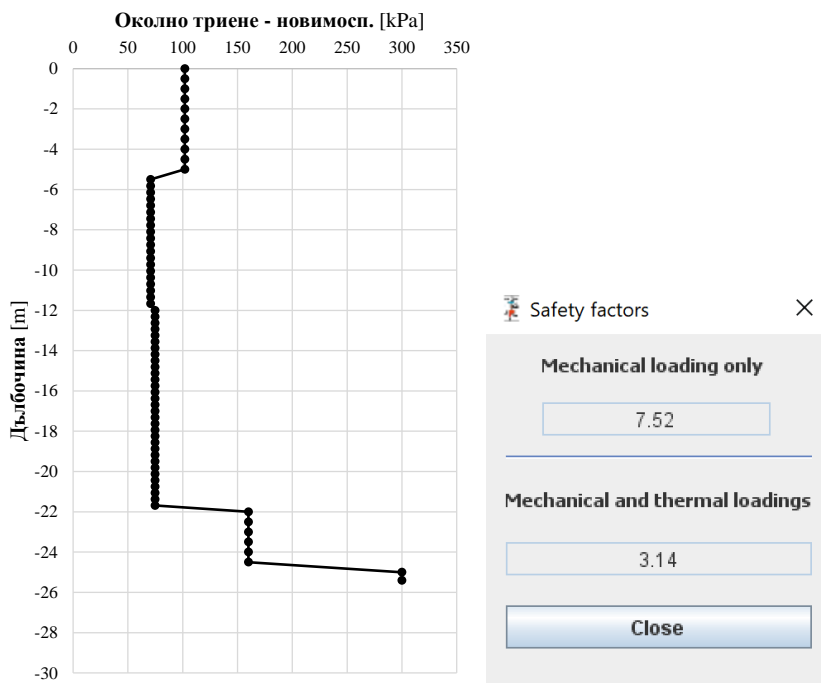
Избраният пилот е с дължина 25,8 m, диаметър 0,88 m, модул на еластичност $2,82 \cdot 10^7$ и коефициент на термично разширение $1 \cdot 10^{-5}$. Възприетото натоварване от върхната конструкция е 1000 kN.

4.3. Резултати и дискусия

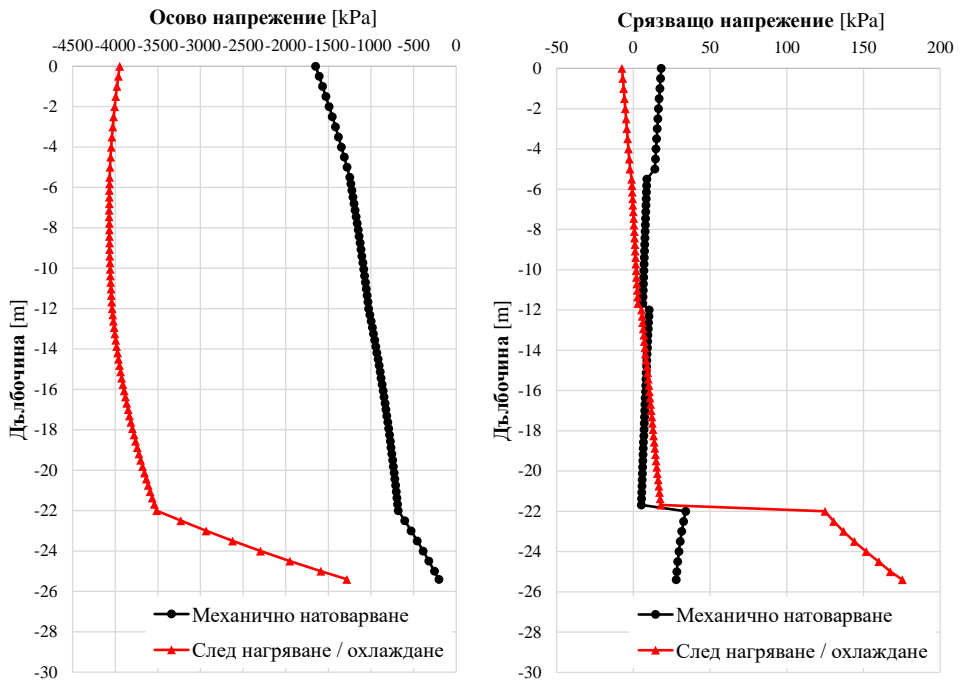
Резултатите от проведения анализ са показани на фигури от 6 до 9. Важно е да се отбележи, че примерът има илюстративен характер и не цели да представи оразмеряването на геотермални пилоти в контекста на Еврокод 7.



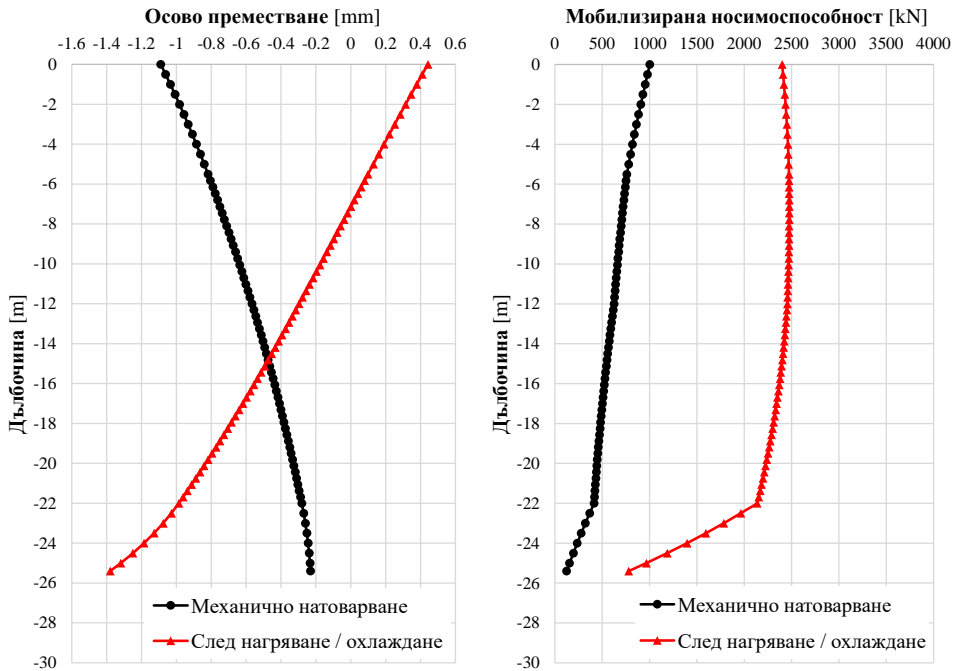
Фиг. 6. Носимоспособности – околно триене, върхово съпротивление и пълна



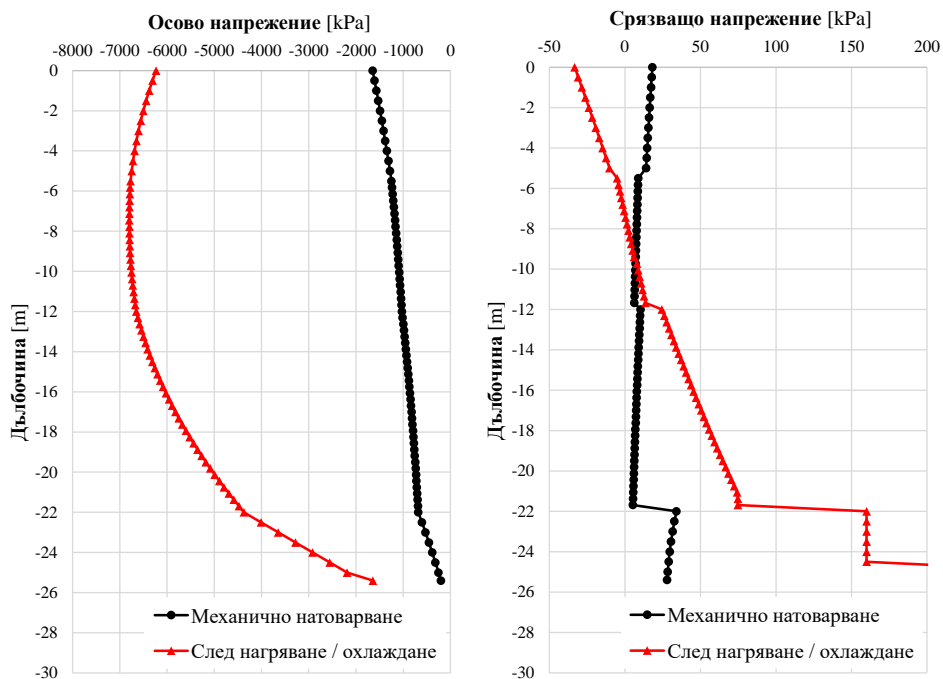
Фиг. 7. Околно триене в дълбочина (ляво) и коефициенти на сигурност за случай с температурна вариация от 20 °C (дясно)



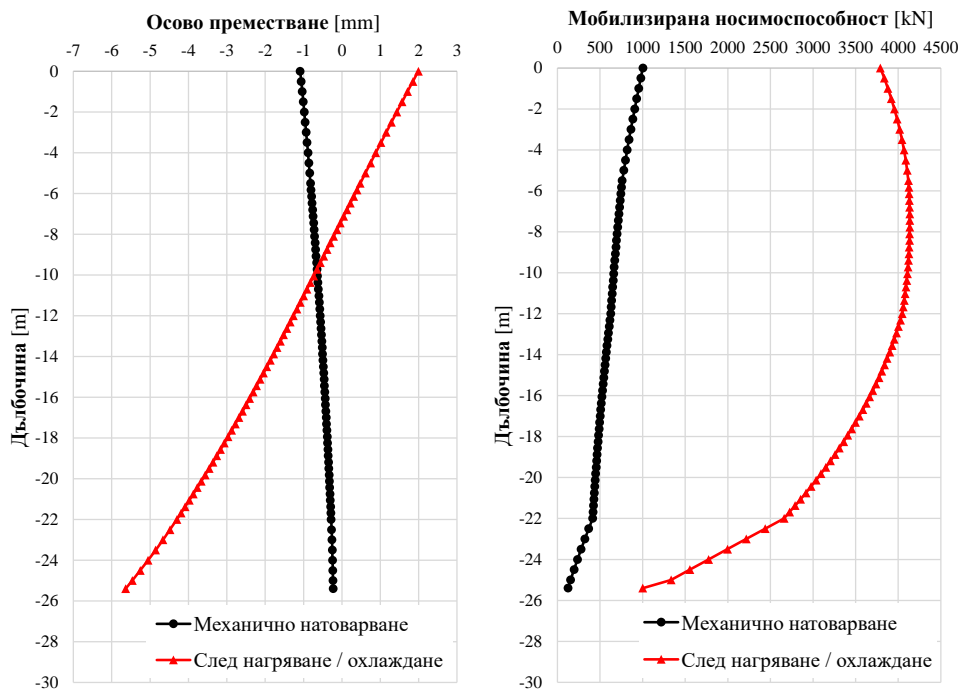
Фиг. 8. Осово (ляво) и срязващо (дясно) напрежение в дълбочина – темп. вариация от 20 °С



Фиг. 9. Осово преместване (ляво) и мобилизирана носимоспособност (дясно) в дълбочина – темп. вариация от 20 °С



Фиг. 10. Осово (ляво) и срязващо (дясно) напрежение в дълбочина – темп. вариация от 50 °С



Фиг. 11. Осово преместване (ляво) и мобилизирана носимоспособност (дясно) в дълбочина – темп. вариация от 50 °С

Получената носимоспособност е 7 551 kN (6 882 kN от около триене и 669 kN от върхово съпротивление). Коефициентите на сигурност от външно натоварване (сграда) и топлообмен са съответно 7,52 и 3,14. Прави впечатление големият принос на натоварването вследствие на нагриване и охлаждане – той се явява меродавен при оразмеряването на пилота.

С цел провеждане на параметрично изследване е изведено решение при термично натоварване (вариация в температурата) от 50 °C – при еднакви други условия. Резултатите от решението са представени на фиг. 10 и фиг. 11. За този случай разликата между механично и термично мобилизираната носимоспособност е още по-изявена.

5. Заключение

Енергийните пилоти са обещаваща технология за устойчиво отопление и охлаждане, съчетаваща геотехническа и енергийна функция в един конструктивен елемент. България разполага с природни, икономически и регулаторни предпоставки за прилагането им, особено в урбанизирани райони като София. Световният опит показва, че интегрирането на топлообменни системи към фундаменти изисква минимални допълнителни инвестиции и носи дългосрочни ползи. Чрез използване на EPFL Thermo-Pile е демонстрирана възможността за оценка на механичното поведение на пилотите при термични цикли, като анализите подчертават влиянието на температурните натоварвания върху носимоспособността. За масовото внедряване в България обаче са необходими стандартизирани методики, повишена информираност и демонстрационни проекти, подкрепени от интегриран подход и подходящи политики.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по Договор № БН-293/24 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adam, D., Markiewicz, R., Pastuszka, D. (2015). Numerical and experimental investigations of energy tunnels in Vienna. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 114 – 126.
2. Coyle, H. M., Reese, L. C. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. // *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 92(2), 1 – 26.
3. Frank, R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bull Liaison Lab Ponts Chauss.* (119).
4. Heat Roadmap Europe. (n.d.). Peta, the Pan-European Thermal Atlas: Renewable energy [Map]. 4DH, Stratego, <https://heatroadmap.eu>.
5. Laloui, L., Di Donna, A. (Eds.) (2013). *Energy geostructures: innovation in underground engineering*. John Wiley & Sons.
6. Laloui, L., Rotta Loria, A. F. (n.d.). Thermo-Pile [Computer software]. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, <https://www.epfl.ch/labs/lms/software/thermo-pile/>.
7. Seed, H. B., Reese, L. C. (1957). The action of soft clay along friction piles. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 122(1), 731 – 754.

ENERGY PILES IN BULGARIAN CONSTRUCTION PRACTICE

N. Milev¹, A. Totsev², I. Markov³, A. Jiponov⁴, A. Mladenov⁵

Keywords: energy pile, thermal cycle, sustainable geotechnics

ABSTRACT

Bulgaria offers favourable conditions for the implementation of energy piles due to its stable geothermal gradient, the presence of groundwater, and characteristic geotechnical conditions in urbanized areas such as Sofia. The typical local soil layers facilitate efficient heat exchange, while the growing demand for Nearly Zero Energy Buildings, supported by EU directives and intensive construction activity, creates a strong foundation for widespread adoption. Energy piles serve a dual function – load transfer and heat exchange with the ground via embedded pipes – and their integration into geotechnical structures requires minimal additional investment. This study presents initial steps toward adapting the technology in Bulgaria through analytical solutions (using the EPFL Thermo-Pile software), focused on evaluating mechanical behaviour under thermal cycles. The paper emphasizes the need for standardization, increased awareness, and demonstration projects to support the successful implementation of sustainable geotechnical solutions in local construction practice.

¹ Nikolay Milev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: milev_fte@uacg.bg

² Andrey Totsev, Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: totsev_fte@uacg.bg

³ Iliyan Markov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: imarkov_fte@uacg.bg

⁴ Alexander Jiponov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Road Construction and Transport Facilities”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ajiponov_fte@uacg.bg

⁵ Alexander Mladenov, Graduate Student, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046