

ПРИЛОЖЕНИЕ НА 3D ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ ЗА АНАЛИЗ НА СЛЯГАНИЯ И ЗАВЪРТАНИЯ В ЗЕМНАТА  
ОСНОВА ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА СИЛОЗНО СТОПАНСТВО

гл. ас. д-р Веселин Балев  
e-mail: veselinbalev@mgu.bg

**ABSTRACT**

*This article presents the application of 3D numerical models for the analysis of settlements and tilts in the ground foundation during the construction of a new silo facility in Varna. The analyses are based on the methods proposed in Eurocode 7 and utilize the Settle3D software. The effects of seismic loads have been investigated, and the potential for soil liquefaction beneath the foundation slab has been assessed. The results show that the proposed foundation solutions provide sufficient security for the structure.*

Въведение:

Изграждането на складови стопанства за насипни зърнени товари изисква внимателен геотехнически анализ на земната основа. В тази статия се представя изследването на слягания и завъртания на фундаментната плоча на ново силозно стопанство в гр. Варна чрез прилагането на 3D числени модели. Използваният софтуер Settle3D позволява детайлен анализ на вертикалната консолидация и сляганията под фундамент при различни натоварвания.

Методология:

Методологията за анализ на сляганията и завъртанията в земната основа включва няколко ключови етапа и стъпки:

1. **Исходни данни и геоложки проучвания:** Използвани са данни от инженерно-геоложки проучвания, извършени от „СОФГЕОЛИНТ 2006“ ООД и „БЪЛГАРСКА ГЕОЛОЖКА КОМПАНИЯ“ ЕООД. Слоевеите са определени като насип, среден до едър пясък с черупки, среден до едър сив пясък с примеси, дребен пясък, пясък едрозърнест с черупки, чакъл и прахова глина.[1;2]

Таблица 1: Физико-механични свойства на геотехническите разновидности

Слой	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'_k$ [deg]	$c'_k$ [kPa]	$E_{oed}$ [MPa]	$\nu$	$K_s$ (m/d)
Насип	16.38	18	27.86	3.18	9.94	0.2	51
Среден до едър пясък с черупки	16.57	18.74	32.3	2.63	11.33	0.2	51
Среден до едър сив пясък с примеси	18.61	19.61	35.7	4.64	14.36	0.2	51
Дребен пясък сив	20.34	20.71	35.6	7.36	18.44	0.2	51
Пясък едрозърнест с черупки	16.57	18.74	32.3	2.63	11.33	0.2	51
Чакъл дребен с черупки	17.57	18.74	35	2.36	14.36	0.2	51
Прахова до пясъчлива глина	16.3	16.7	26.83	16.05	26.23	0.2	51
Трошен камък	25	25	45	15	140	0.2	0.0001

2. **Изчислителни модели:** За анализ на сляганията и завъртанията е използван софтуерът Settle3D, разработен от Rocscience, който позволява създаването на детайлни 3D модели на



земната основа и изследване на вертикалната консолидация и сляганята под различни натоварвания.[3] [8] [10] [11]

#### Описание на Settle3D:

Settle3D е специализиран софтуер за анализ на сляганя и консолидация в почвите. Той съчетава простотата на двумерното моделиране с възможностите за визуализация и анализ на по-сложни тримерни структури. Основни функции на софтуера включват:

- **Моделиране на многослойни почвени профили:** Възможност за въвеждане на различни слоеве с техните физико-механични характеристики.
- **Анализ на сляганя:** Изчисляване на сляганята в резултат на натоварвания, включително временни и постоянни товари.
- **Консолидация:** Моделиране на процесите на консолидация в почвите с течение на времето.
- **Графично представяне:** Възможност за визуализация на резултатите под формата на графики и диаграми.
- **Интерактивни функции:** Лесен за използване интерфейс, който позволява бързо и ефективно моделиране и анализ.

#### Метод на послойното сумиране:

Послойното сумиране е метод, използван за изчисляване на сляганята в многослойни почвени профили. Този метод предполага, че слягането на всеки слой може да бъде изчислено независимо, след което общото слягане се получава чрез сумиране на сляганята на отделните слоеве. Основни стъпки в метода на послойното сумиране включват:

- **Определяне на началните напрежения във всеки слой:** Изчисляване на напреженията в почвите преди нанасяне на натоварването.
  - **Изчисляване на допълнителните напрежения от натоварването:** Определяне на допълнителните напрежения, породени от строителните товари.
  - **Определяне на консолидираните сляганя:** Изчисляване на сляганята във всеки слой, като се вземат предвид характеристиките на почвата и допълнителните напрежения.
  - **Сумиране на сляганята:** Сумиране на сляганята във всеки слой за определяне на общото слягане на почвения профил.
3. **Етапи на изчисленията:** Етапите на изчисленията са структурирани, за да се отразят реалните строителни условия и процеси. Всеки етап има специфични цели и влияе на резултатите от анализа.[8] [11]

#### **Етап 1: Начален етап (In Situ)**

- **Описание:** Определяне на началното състояние на терена и установеното водно ниво.
- **Значение:** Този етап предоставя базова линия за сравнение с последващите етапи и е от решаващо значение за определяне на началните напрежения и състоянието на почвата.

#### **Етап 2: Изпълнение на шпунтова стена и водопонижение**

- **Описание:** Изпълнение на изкоп до кота -5.00 m и водопонижение на установеното водно ниво.
- **Значение:** В този етап се отстранява почвата и се понижава водното ниво, което влияе на напреженията в земната основа и може да доведе до начални сляганя.

#### **Етап 3: Изпълнение на насип и фундаментна плоча**

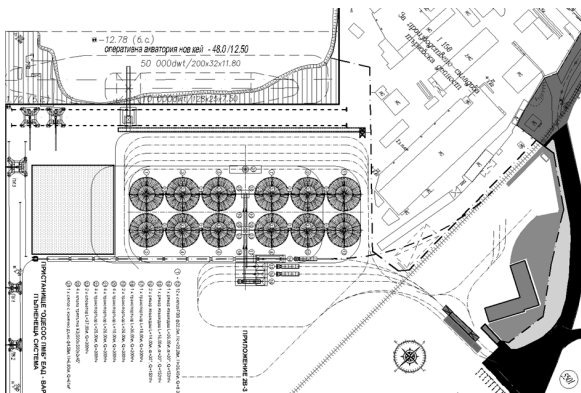
- **Описание:** Изпълнение на насип от трошен камък с дебелина 4.00 метра и изграждане на фундаментната плоча.

- **Значение:** В този етап се нанася допълнително натоварване върху земната основа, което води до нови напрежения и слягания. Използването на трошен камък осигурява добра дренажна способност и намалява риска от втечняване.

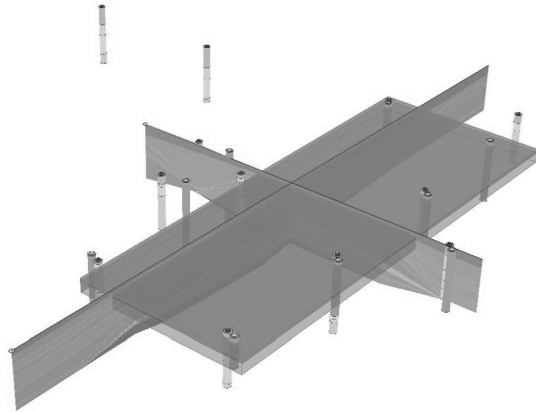
#### Етап 4: Реализиране на натоварвания

- **Описание:** Нанасяне на натоварванията от бетонната плоча, изграждането на фундаменти и основното натоварване предизвикано от силозите.
- **Значение:** В този етап се симулират реалните условия на експлоатация на съоръжението, включително статични и динамични натоварвания. Този етап е критичен за определяне на крайните слягания и завъртания на фундаментната плоча.

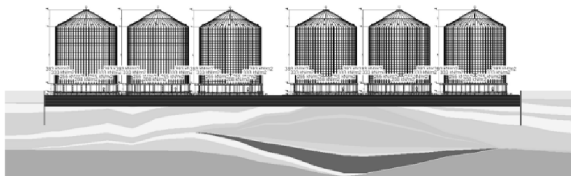
#### Графики и диаграми от анализа:



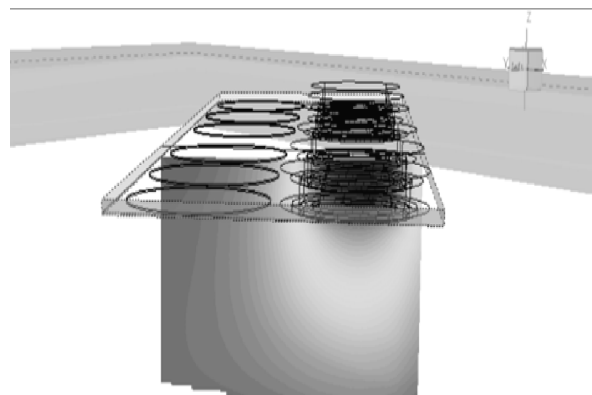
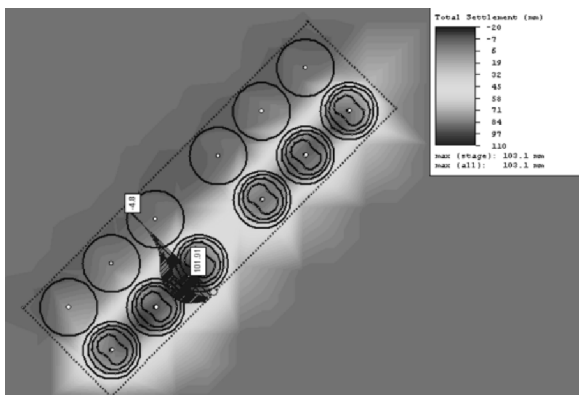
Фигура 1: Изглед на силозното стопанство



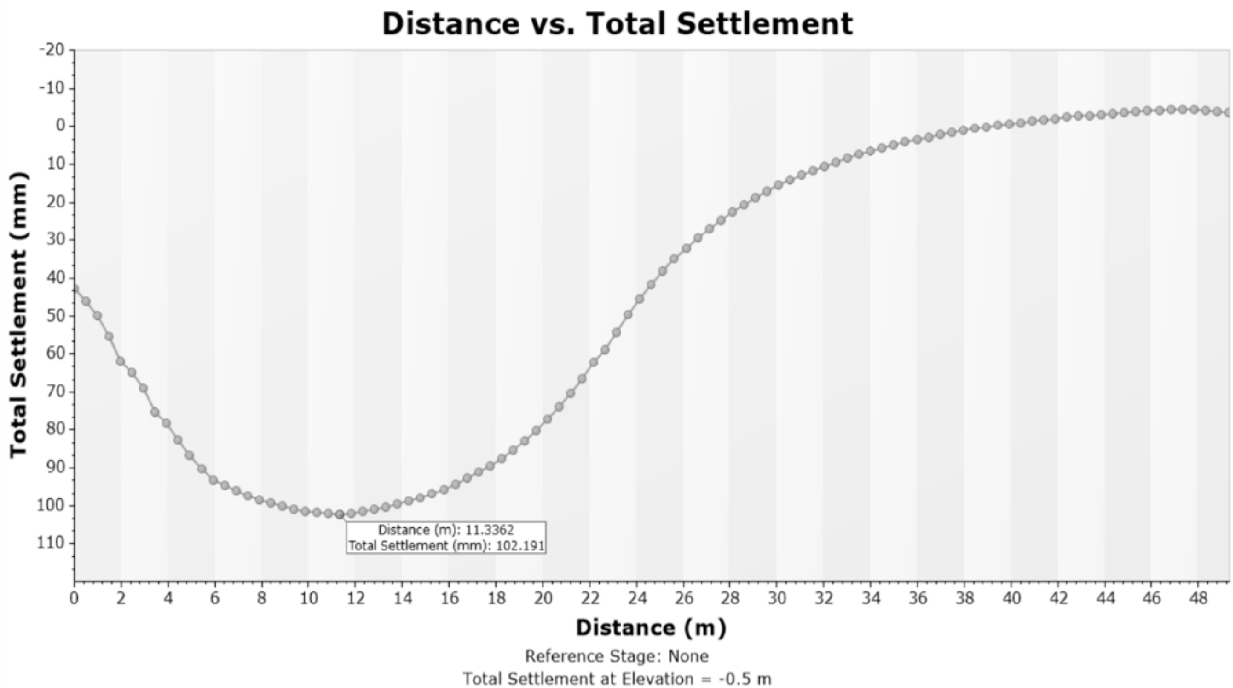
Фигура 2: Надлъжен и напречен инженерно-геоложки разрез



Фигура 3: Надлъжен и Напречен инженерно-геоложки разрез. Натоварвания при основна комбинация от натоварвания (Изчислителни товари)



Фигура 4: Слягане във вертикална посока (y) надлъжно под фундаментна плоча на силозно стопанство в резултат на несиметрично натоварване.



Фигура 5: Диаграма на слягане във вертикална посока (y) надлъжно под фундаментна плоча на силосно стопанство в резултат на несиметрично натоварване

#### Обосновка за избрания начин на фундиране:

Избраният начин на фундиране се основава на резултатите от геотехническите проучвания и анализа на натоварванията. [9] Основните причини за избора на фундаментна плоча и трошен камък като материал за насипване са:

1. **Равномерно разпределение на натоварванията:** Фундаментната плоча осигурява равномерно разпределение на натоварванията от силозите върху земната основа, като намалява риска от неравномерни слягания и завъртания. [4;5;6]
2. **Намаляване на вероятността от втечняване:** Трошеният камък осигурява висока пропускливост и дренажни свойства, които спомагат за намаляване на вероятността от втечняване при сеизмични въздействия. [7]
3. **Устойчивост на слягания:** Фундаментната плоча и трошеният камък осигуряват достатъчна носимоспособност под въздействието на натоварванията от силозите. [3]

#### **Оценка на сляганията и завъртанията:**

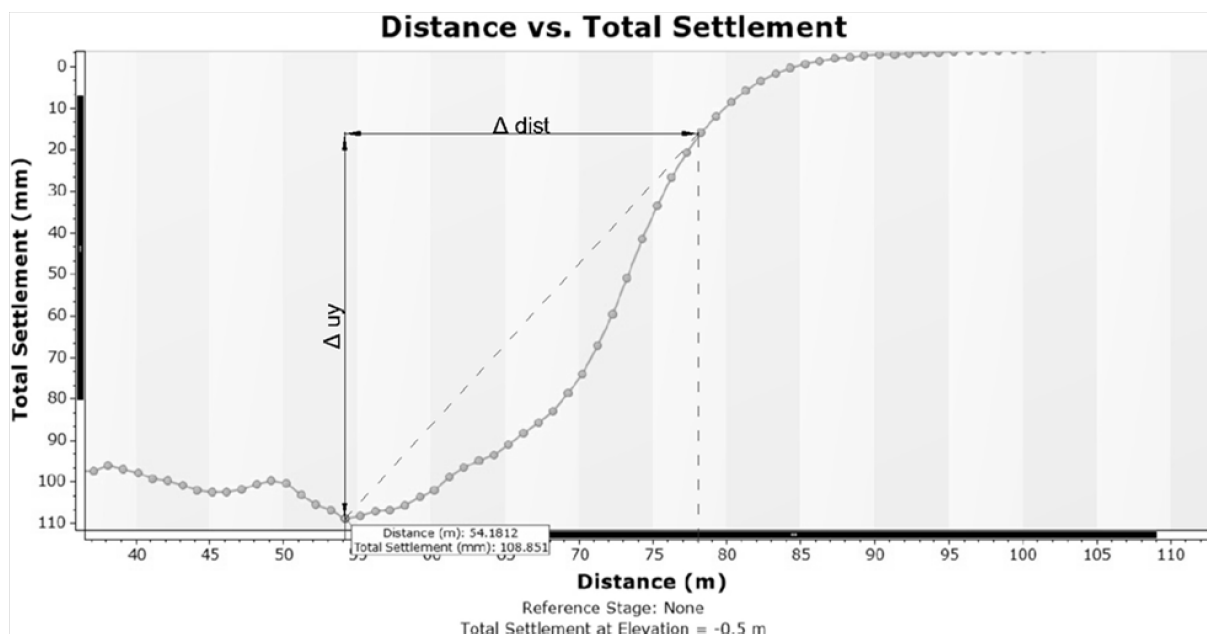
Анализът на сляганията и завъртанията включва изследване на вертикалните и хоризонталните деформации на земната основа под фундаментната плоча. Резултатите показват, че максималните слягания са в границите на допустимите стойности според Еврокод 7. [7]

#### **Допустими стойности:**

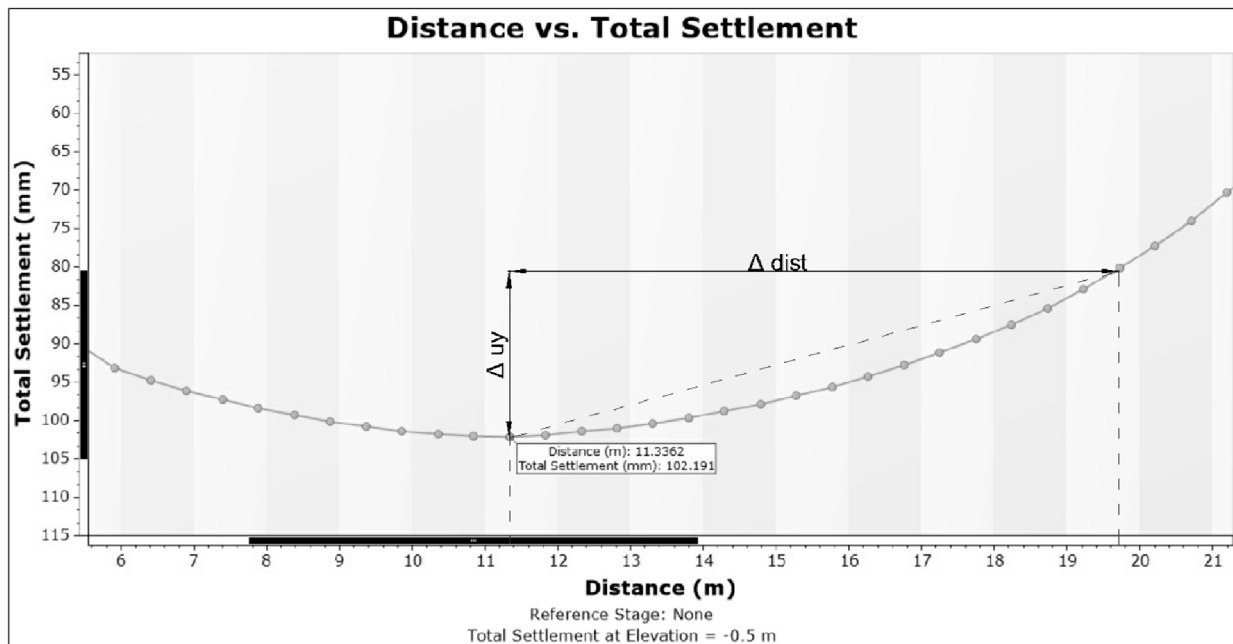
- **Максимално допустимо слягане:** 200 мм
- **Максимално допустимо завъртане:** 4 промила (4 mm/m)

Таблица 2: Резултати от оценката на сляганята и завъртанята

Профил	Слягане (mm)	Гранично допустимо слягане (mm)	Завъртане на фундаментната плоча (‰)	Гранично допустимо завъртане на фундаментната плоча (‰)
Надлъжен (нормативни товари)	108.8	200	1.31	4
Напречен (нормативни товари)	103.96	200	1.66	4
Надлъжен (изчислителни товари)	167.16	200	3.83	4
Напречен (изчислителни товари)	160.4	200	3.58	4
Надлъжен (неравномерни нормативни товари)	108.85	200	3.86	4
Напречен (неравномерни нормативни товари)	102.19	200	2.63	4
Надлъжен (неравномерни изчислителни товари)	167.06	200	5.68	4
Напречен (неравномерни изчислителни товари)	157.36	200	4.56	4



Фигура 6: Ъгъл на завъртане на фундамента за надлъжен профил при неравномерно натоварване.



Фигура 7: Ъгъл на завъртане на фундамента за напречен профил при неравномерно натоварване.

#### Заклучения и препоръки:

Приложението на 3D числени модели за анализ на слягания и завъртания в земната основа при строителството на силосно стопанство доказва ефективността на използваните методи и софтуерни инструменти. Препоръки за експлоатация на силосното стопанство:

Мониторинг на завъртанията: Поради надвишаване на допустимите стойности за завъртане при някои натоварвания, препоръчва се редовен мониторинг на завъртанията на фундаментната плоча. Това може да бъде постигнато чрез инсталиране на геодезически уреди и периодични измервания. [3]

Ограничаване на неравномерните натоварвания: Оптимизиране на процеса на пълнене и изпразване на силозите с цел минимизиране на неравномерните натоварвания върху фундаментната плоча.

Поддържане на дренажната система: Редовна поддръжка и проверка на дренажната система под фундаментната плоча, за да се предотврати натрупване на вода и последващи проблеми с втечняване на почвата. [4;5;6]

План за реакция: Разработване на план за реакция в случай на значителни завъртания, включващ мерки за временно разтоварване на силозите и извършване на необходимите ремонти и укрепвания. [3]

Заклучението и препоръките са базирани на резултатите от числените модели и анализа. Те подчертават необходимостта от непрекъснат мониторинг и поддръжка, за да се гарантира безопасната експлоатация на силосното стопанство в дългосрочен план. Тази методология може да бъде приложена и при други подобни проекти за осигуряване на безопасността и експлоатационния срок на строителните конструкции.

#### Литература:

- [1] Инженерно-геоложки и хидрогеоложки доклад „СОФГЕОЛИНТ 2006“ ООД май 2017г.
- [2] Инженерно-геолошко проучване „БЪЛГАРСКА ГЕОЛОЖКА КОМПАНИЯ“ ЕООД март 2021г.
- [3] Settle3D Settlement and consolidation analysis Theory Manual 2009
- [4] Наредба №1 за Проектиране на плоско фундиране (обн. ДВ. Бр.85 от 8 октомври 1996г.)
- [5] Норми за проектиране на плоско фундиране (публ. БСА бр.10 от 1996 г.)
- [6] Норми за проектиране на пилотно фундиране (публ. БСА бр.6 от 1993 г.)
- [7] Еврокод 7: Геотехническо проектиране БДС EN 1997-1/NA



- [8] Пенев В., Особенности на триизмерния анализ при приложни геотехнически задачи. МИННО дело и геология – София, 2020, бр. 8-9, с. 24-28. ISSN 0861-5713 ; ISSN 2603-4549
- [9] Митев И., Камбуров А., „Многоцелеви геоинформационен портал на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски““, МИННО дело и геология – София: , бр. 7, 2019, ISSN 0861-5713 ; ISSN 2603-4549, стр.32-38.
- [10] Митев И., Петров М., „УКРЕПВАНЕ НА ЗЕМНА ОСНОВА (ЛЪОС) ПОД СЪЩЕСТВУВАЩИ ФУНДАМЕНТИ НА СГРАДИ ПОСРЕДСТВОМ ИНЖЕКТИРАНЕ С ЦИМЕНТОВИ РАЗТВОРИ “, МИННО дело и геология – София:, бр. 9, 2018, ISSN 0861-5713 ; ISSN 2603-4549 , стр. 36-40
- [11] Митев И., Пенев В., „Численото моделиране на геотехнически задачи – бъдещето на инвестиционния процес“, МИННО дело и геология – София:, бр. 1-2, 2023, ISSN 0861 – 5713 ISSN 2603 – 4549 стр. 36-42