

MEASUREMENT OF SOIL DENSITY USING ULTRASOUND⁷⁹

Chief Assist. Prof. Asparuh Atanasov, PhD

Department Mechanics and Elements of Machines,

Technical University of Varna, Bulgaria

Phone: 0899-809 331

E-mail: asparuh.atanasov@tu-varna.bg

Abstract: *This material discusses a methodology for non-destructive testing of soil density using ultrasonic measurement. The measurements were carried out with a material thickness gauge in which sound speeds of 1000 m/s, 1500 m/s and 2000 m/s were set during the test. The tested field is with black soil and shows good results at 2000 m/s, and it has been confirmed that humidity strongly affects the possibility of measurement. The obtained results compared with a vertical cone penetrometer show 99.99% dependence and the standard error is 1.24 kN.*

Keywords: *Sound, Soil, Density, Measurement, Precision Agriculture.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Почвата е жизнена среда от, която зависи множество екосистеми (Greiner et al., 2017). За контрол на средата освен измерването на микро и макро елементи (Foth et al., 1988) е необходимо и измерването на нейната плътност. Плътността на почвата е ключов параметър в прецизното земеделие. От нея зависи възможността за развитието на земеделските култури.

Измерване на плътността представлява трудоемък процес, като стандартно отчита дискретни стойности. Стандартно тя се измерва с вертикален конусен пенетрометър (ASAE, 2002). Той дава точни резултати заради контактния метод на измерване. Изчисляване на съпротивлението необходимо за проникване (пенетрация) на конус със стандартен размер и необходимата сила за забиването му на фиксирана дълбочина. Методът е трудоемък за създаване на цялостна карта на изследваното поле.

Подход за измерване почвената плътност на базата на нейната електропроводимост е използван при създаване на сензор за измерване в реално време разработен от (Titan, 2025) Измерването определя почвената текстура, соленост, органично вещество, съдържание на влага и дълбочината на горния почвен слой. Този тип измерване е подходящ за създаване на пълна карта на полето при преминаване. Измерването е изисква големи ресурси както механичното тестване. Също не променя почвения слой при измерване, което причинява по малки екологични въздействия.

Почвената диагностика е възможно да се извърши с акустични сензори. Те имат потенциала да анализират почвената плътност в реално време и е възможно създаване на цялостна непрекъсната карта (Michlmayr et al., 2012; Lacoste et al., 2013). Измерването е възможно да се осъществи посредством високочестотни сигнали (20–500 kHz), преди те да отслабят, използването на пиезо-електрически сензори в почвата увеличава радиусът на наблюдение. Честотите са над звуковия диапазон и не се възприемат от човека. С увеличаване на честотата се намалява затихването и е възможно да се осъществи измерване на по голямо разстояние. Методиката представлява безразрушителен контрол на средата.

Възможно е сензора да се мултиплицира за получаване на по голяма ширина на засичане и намаляване броя преминавания за цялостна карта.

Целта на изследването е да се тества методика за ултразвуково измерване на почвената плътност. За постигане на целта са формирани следните задачи: 1. Избиране на подходящ сензор с който да се осъществи теста. 2. Да се проведат полеви изследвания на опитното поле на ДТК – Добрич.

⁷⁹ Докладът е представен пред секция „Природо-математически и технически науки“ на 64-тата научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев“ и Съюза на учените-Русе на 17 октомври 2025 година с оригинално заглавие на български език: ИЗМЕРВАНЕ НА ПОЧВЕНА ПЛЪТНОСТ ПОСРЕДСТВОМ УЛТРАЗВУК.

МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

Звуковите вълни се разпространяват с крайна скорост, като тя се променя при различните плътности. Скоростта на звука във въздуха при температура 0 °C е 331 m/s. С повишаване на температурата тя расте. Например при температура 15 °C е 340 m/s. Скоростта на звука е пропорционална на квадратния корен на абсолютната температура на газа. Много съществено е че скоростта на звука не зависи от честотата. Ако съществуваше подобна зависимост, тя би направила невъзможно предаване на говор и музика, тъй като честотния състав на постъпващите в ухото звукови вълни би се изменял в зависимост от разстоянието. Освен скоростта към характеристиките на хармоничните звукови вълни спадат: амплитудата A , дължината на вълната λ , периодът на звуковата вълна T , честотата на трептенията ν . Зависимостите между тях са както при механичните вълни:

$$\nu = 1/T, \quad (1)$$

$$\lambda = u/\nu. \quad (2)$$

Интензитетът I се определя от енергията, пренесена от звуковата вълна за единица време през единица площ, разположена перпендикулярно на посоката на разпространение на вълната

$$I = E/St. \quad (3)$$

Измерването на плътността на почвата се извършва с акустични емисии (АЕ). Те представляват освобождаване на еластична енергия излъчена от говорител на сензора. АЕ пътува през почвения агрегат като еластична вълна до достигане от пиезо-електрически сензори които я регистрират. Разстоянията изминати от тези вълни генерирани от пиезо излъчвател зави от механичните свойства на обекта през който преминават и степента на насищане (в различните компоненти), които допринасят за затихване на сигнала. При наличие на по голямо количество въздух в почвения агрегат типичната АЕ има малък обхват (Oelze et al., 2002). При преминаване на АЕ през почва амплитудата на вълната A може да бъде оценена по формулата:

$$A = a \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3} e^{-\alpha(f)xy} \quad (4)$$

Където индексите 1 и 3 отговарят на вода и въздух: където $z = \rho c$ - характеристичен импеданс на средата (ρ – плътността на средата; c - скоростта на звука); $\alpha_3(f)$ - коефициент на отслабване на звука за въздух, зависим от честота f ; X - разстояние от границата на разделяне на средите до приемния преобразувател (Geiger et al., 2003).

При границата за чувствителността на приемащата апаратура по амплитуда на изместването от трептене е обозначена с A_{Π} , тогава разстоянието за засичане на АЕ е:

$$D = \frac{1}{\alpha_3(f)} \ln \left(\frac{a}{A_{\Pi}} \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3} \right) \text{ [cm]} \quad (5)$$

Увеличаването на разстоянието може да се получи, намалявайки $\alpha_3(f)$, което се постига с понижаване на работната честота на измерванията.

Когато приемо-преобразувателя контактува с изследвания обект. Известно е че за металната среда поради $z_2 \gg z_3$, $\alpha_2(f) \ll \alpha_3(f)$ разстоянието от източника се увеличава. Приемайки за: $z_1 = 15 \cdot 10^5$ (вода); $z_2 = 45,2 \cdot 10^5$ (стомана); $z_3 = 42$ (въздух); $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ cm (за честота $f = 0,5$ MHz и приемайки $\alpha/A_{\Pi} = 0,3 \cdot 10^6$ (това би осигурило теоретично разстояние на приемане от 1 m), с така приетите стойности се получава $Dk/D \sim 70$ cm (Merdjanov et al., 2017).

Скоростта на звука в почвата зависи от вида на почвата и нейните свойства, като плътност, влажност и еластичност. Обикновено скоростта на звука в почвата е по-висока от тази във въздуха, но по-ниска от тази в твърди материали като метал.

Скоростта на звука в зависимост от типът почва се изменя както следва:

- Пясъчна почва - Скоростта на звука може да бъде около 500-1000 m/s.
- Глинеща почва - Скоростта на звука може да бъде около 1000-1800 m/s.
- Скални почви - Скоростта на звука може да надвишава 2000 m/s.

За по-точна информация е необходимо да се вземат предвид специфичните свойства на конкретната почва. Поради факта че почвата е нехомогенна смес, тя съдържа различно количество глина, пясък, вода и твърди вещества (камъни) в различно съотношение поради което по скоростта е силно променлива. Почвения агрегат може силно да варира като състав пространствено, което би

могло да доведе до голяма променливост на скоростта на звука. Тя варира в широки граници, от приблизително 86 до 260 метра в секунда, и може да бъде повлияна при преминаването на звука през водни молекули или твърди предмети, като имаме постоянна промяна на скоростта на звуковата вълна на микроново. Този диапазон обикновено е по-бавен от скоростта на звука във въздуха (около 343 м/с) и значително по-бавен, отколкото в много твърди материали като стомана.

Уредът с който се извършва измерването е LS213 (Bioevibul, 2025) ултразвуков дебеломер (0,8~350MM), показан на фиг. 1.



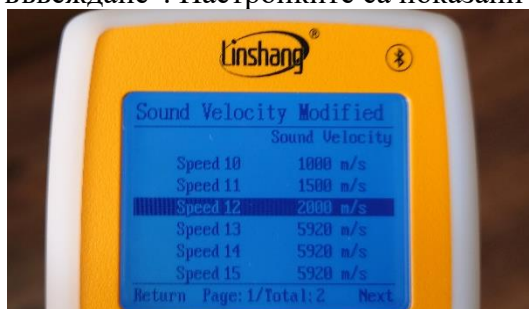
Фиг. 1. LS213 ултразвуков дебеломер (Bioevibul, 2025).

Той има характеристики представени в таблица 1. Уредът е предназначен за измерване на дебелината на метални материали (стомана, желязо, алуминий, мед) и неметални предмети (керамика, пластмаси и стъкло), както и на всякакви други добри ултразвукови проводници.

Таблица 1. Основни характеристики на LS213

Диапазон на измерване	0,8 ... 350 мм
Резолуция	08 - 100 мм: 0,01 мм 100 - 350 мм: 0,1 мм
Точност	0.8 - 10mm: $\pm 0.05\text{mm}$ 10 - 350 mm: $\pm 0.5\%$ H, H е стандартната стойност
Скоростта на звука	Диапазон 1000 ~ 9999 m/s
Сонда	5 MHz Ø10 двукристална сонда

Методът на измерване представлява измерване на дискретни стойности, като в точките на измерване след получаване на резултата е направен тест на плътността с пенетрометър. Тестовите са проведени с няколко различни честоти на звука. Избрани са 1000 m/s, 1500 m/s и 2000 m/s, които са въведени в менюто „Ръчно въвеждане“. Настройките са показани на фиг. 2.



Фиг. 2. Въведените честоти в LS213

Всяка една от честотите е тествана за определяне плътността (в случая показана като дебелина) на почвен тип почва.

Необходимо е на се извърши тариране заради методът на измерване на уреда. То ни показва дебелина на слой, която трябва да бъде съотнесена към плътност. За целта е направено тестово измерване на зони предварително измерени с пенетрометър.

РЕЗУЛТАТИ

Извършеното тариране при честота 2000 m/s е представено в табл. 2. Поради показанията на уреда в дебелина на слоя е направен тест на плътността в точката на измерване с пенетрометър.

Таблица 2. Показания при тариране

№	1	2	3	4	5
LS213 [cm]	17.21	19.01	23.66	18.89	17.96
Пенетрометър [kN]	275.8	310.3	379.2	300.5	287.3

Средна стойност получена от тарирането е 16.056 cm за kN. По този коефициент е изчислена почвената плътност представена в таблици 3 и 5.

Почвата в тестовото поле е чернозем, която има голямо съдържание на глина. Влажността в момента на измерване е 32%. Измерванията са проведени през 1 м по ширина и 1 м по дължина върху полето. В избраните тестови точки е проведено измерване с уреда LS213 при скорост на звука 2000 m/s, резултатите са показани в табл. 3

Таблица 3. Показания на LS213 в тестовите точки [kN] при 2000 m/s

	1	2	3
1	274.1	309.3	380.1
2	345.3	410.9	619.1
3	619.3	482.6	621.4
4	619.0	622.2	655.0
5	552.5	689.5	481.9

В същите точки, където е проведено ултразвуковото измерване е направено и измерване с вертикалния конусен пенетрометър. Резултатите в kN са показани в табл. 4.

Таблица 4. Плътност на тестовия участък, в kN измерена с пенетрометър

	1	2	3
1	275.8	310.3	379.2
2	344.7	413.7	620.5
3	620.5	482.6	620.5
4	620.5	620.5	655.0
5	551.6	689.5	482.6

Получените резултати при скорост на звука 1500 m/s в опитното поле е представено в таблица 5. Измерванията са проведени в точките на измерване с 2000 m/s за потвърждение на резултата.

Таблица 5. Показания на LS213 в тестовите точки [kN] 1500 m/s.

	1	2	3
1	-	-	-
2	-	400.8	631.5
3	607.7	497.1	612.3
4	623.9	602.4	655.0
5	550.4	681.3	-

При 1500 m/s за тествания тип почва уредът в някои от тестовите точки не измери стойности. Има отклонение от получените стойности в таблица 3. Получените разлики са в диапазона от -3.29% до 2.92 %. Тези отклонения позволяват да приемем че точността е висока.

При скорост от 1000 m/s уреда не отчете резултат. Това е поради състава на почвата в тестваното поле.

Измерване с ултразвуков уред при влажност на почвата от 8% при температура на въздухна 34°C не даде резултати и в трите избрани диапазона. Уплътнената почва има голяма твърдост, което би трябвало да повиши скоростта на звука през нея но това е при еднородни материали. Поради нехомогенния състав на почвения агрегат и наличието на въздух между микрочастиците имаме много голямо затихване от преминаването на звука през различните по плодност среди.

Анализ на зависимостите посредством линеен регресионен анализ между стойностите получени от теста с пенетрометъра (Y) и стойностите получени при 2000 m/s е (X) показан в таблица 6 и ANOVA на регресията в таблица 7.

Таблица 6. Статистика на регресията

Multiple R	0.999998
R Square	0.999995
Adjusted R Square	-1.07692
Standard Error	1.239804

Таблица 7. ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Regression	14	4129629	294973.5	2686614
Residual	13	19.98247	1.537113	
Total	27	4129649		

Получената зависимост показва 99.99% зависимост на резултатите, което е много голям коефициент на сигурност. Стандартната грешка е 1.24 kN отклонение от получените резултати. Получената средна плътност за тестовото поле е 512.5 kN.

Лимитиращ фактор при методиката е че за този тип изследване е необходимо по голям процент на влажност. Резултатите от методиката са изследвани само на едно опитно поле в неговите специфични условия, който предстои да се тестват в няколко полета за потвърждение на методиката.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведения експеримент за измерване на почвена плътност посредством ултразвук се получиха следните изводи:

1. Проведените експерименти със скорост на звука 2000 m/s при измерване при чернозем при сравнението си със стандартен конусен пенетрометър показват 99.99% зависимост на резултатите. Това потвърждава приложимостта на метода.
2. Методиката е метод за безразрушителен контрол на почвената плътност. Тя позволява лесно и бързо тестване на големи зони посредством серия от измерване.

REFERENCES

Greiner, L., Keller, A., Gret-Regamey, A. & Papritz, A. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Pol.* 69, 224–237, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>.

Foth, H.D., Ellis, B.G., (1988). *Soil fertility*. Wiley, New York, New York.

ASAE Standards, 49th ed., (2002). S313.2. Soil Cone Penetrometer. ASAE, St. Joseph, Michigan. Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Beihl, L.L., Stoner, E.R., 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy* 38, 1–44.

Titan, (2025). Available at: <https://titanmachinery.bg/soilxplorer> [Accessed 28 Aug. 2025].

Michlmayr, G., Cohen, D. & Or, D. (2012). Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media - A review. *Earth-Science Reviews* 112, 97–114, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.009>.

Lacoste, M., Ruiz, S. & Or, D. (2018). Listening to earthworms burrowing and roots growing - acoustic signatures of soil biological activity. *Sci Rep* 8, 10236 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28582-9>.

Bioevibul, (2025). Available at: <https://bioevibul.com/> [Accessed 20 Aug. 2025].

Oelze, M. L., O'Brien, W. D. & Darmody, R. G. (2002). Measurement of attenuation and speed of sound in soils. *Soil Science Society of America Journal* 66, 788–796.

Geiger, G., Werner, T., (Oct. 2003) “Leak detection and location- A Survey,” in *Proc. PSIG Annual Meeting*, Bern, Switzerland, pp.1-11.

Merdjanov R.N., Todorov S.M., Hadjitodorov IA. P., (2017) Scientific proceedings of Stume. Ultrasonic (acoustic) method of finding of leakages in pressurized pipelines. ISSN 1310-3946.