

**СЕЛСКОСТОПАНСКА АКАДЕМИЯ
ИНСТИТУТ ПО ПОЧВОЗНАНИЕ, АГРОТЕХНОЛОГИИ И
ЗАЩИТА НА РАСТЕНИЯТА “НИКОЛА ПУШКАРОВ”**

ЦВЕТИНА НИКОЛАЕВА ИЛИЕВА–ПАПАРКОВА

**СТРУКТУРНИ И ХИДРОЛОГИЧНИ СВОЙСТВА НА
КАРБОНАТНИ ЧЕРНОЗЕМИ ПРИ РАЗЛИЧЕН НАЧИН НА
ЗЕМЕПОЛЗВАНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”

Професионално направление: Растениевъдство
Научна специалност: Почвознание

Научни ръководители: проф. д-р МИЛЕНА КЕРЧЕВА, доц.д-р ВИКТОР
КОЛЧАКОВ

София, 2026

Дисертационната работа съдържа 164 страници, включително 34 фигури, 36 таблици, оформени в 8 глави, общи изводи и списък с използвана литература от 154 заглавия, от които 49 на кирилица и 105 на латиница, 5 таблици в Приложение.

Дисертационната работа е обсъдена в отдел „Физика ерозия и почвена биота“ на 29.01.2026 г. на разширено заседание на научния отдел, съгласно заповед № РД РД 05-15/28.01.2026 г. на Директора на ИПАЗР „Никола Пушкиarov“ и е открита процедура за представяне на дисертационната работа за защита пред Научно Жури.

Защитата на дисертационната работа ще се проведе на Г. от ч. в зала „Проф. И. Гърбучев“ на ИПАЗР „Никола Пушкиarov“, София на открито заседание на Научно Жури (Заповед № г. на Председателя на Селскостопанска Академия).

Научно жури:

1. Проф. д-р Светла Симеонова Русева
2. Проф. дн инж. Никола Вичев Колев
3. Проф. д-р Маргарита Пенчева Мондешка-Недялкова
4. Доц. д-р Емил Иванов Димитров
5. Доц. д-р Емил Борисов Христов

Материалите по защитата (автореферат, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се на официалната интернет страница на ИПАЗР „Никола Пушкиarov“ (<https://www.issapp-pushkarov.org/akademichno-razvitiie>) и ССА (<https://agriacad.bg/bg/science-and-education/procedures-for-acquiring-degrees>)

УВОД

Структурата и хидрологичните свойства на почвата са едни от основните почвени показатели за качеството на почвата. Те определят процесите на пренос и задържане на вода и други субстанции в почвата, регулират хидрологичния, аерационния, топлинния и хранителния ѝ режим, влияят върху развитието на кореновата система, продуктивността на културите, биоразнообразието и почвообразователните процеси. Хидрологичните свойства на почвата обуславят степента на проява на агроекологични рискове, като засушаване, преовлажняване, измиване на нитрати извън коренообитаемия почвен слой и водна ерозия (Русева, 2002; 2006).

При продължително земеделско ползване почвите влошават физичните си свойства в различна степен в зависимост от генетичните си особености (Дилкова, 1986, 2014; Русева, 2006). Структурата става разпрашена, а почвата е податлива на уплътняване и водна ерозия при наклонени терени. Карбонатните Черноземи са почви, податливи на физична деградация, която трудно може да бъде възстановена дори след продължително (10-15 годишно) затревяване (Дилкова, 2014). Данни за структурни и хидрологични свойства на представителни за страната Карбонатни Черноземи от обработваеми и необработваеми площи от равнинни територии са получени и представени в трудовете на Антипов-Каратаев и кол. (1960), Дилкова (1986, 2014) и др. Значителен брой изследвания, включително и върху физични свойства, са извършени върху Карбонатен Чернозем на склон с различна степен на ерозия в опитно поле Тръстеник, Русенско (Русева, 1987; Лозанова, 2001).

Провеждането на нови изследвания за физичната структура и хидрологичните свойства на Карбонатните Черноземи от опитните полета на ИПАЗР „Н. Пушкиров“, ще позволи да бъде извършен анализ на промените, настъпили във физичното състояние на почвите от равнинните и от наклонените терени, както във времето, така и при прилагането на почвозащитни агротехнологии с цел ограничаване на почвената водна ерозия. През последните години са предложени нови методи, показатели и хипотези за механизмите на структурообразуване, които следва да бъдат проучени и приложени. Определянето на взаимозависимостите между показателите за структурата, хидрологичните свойства и други почвени показатели ще допринесе за изясняване на ефекта от антропогенно въздействие върху Карбонатните Черноземи при равнинни и наклонени терени.

Цел:

Целта на изследването е да се оценят структурни и хидрологични показатели на Карбонатни Черноземи при различен начин на земеползване от равнинни терени (с. Ковачица, Монтанско и с. Тръстеник, Плевенско) и върху наклонени терени, подложени на водна ерозия (с. Тръстеник, Русенско).

Задачи на дисертационния труд:

1. Прилагане на нови и традиционни методи и модели за определяне показатели на почвена структура и хидрологични свойства на Карбонатни Черноземи при необработваеми и обработваеми площи от равнинни терени, както и при полски опит с две култури (пшеница и царевица) и три системи на почвообработка върху наклонен терен.
2. Сравняване на традиционни (капиляриметър с висящ воден стълб) и нови (изпарителен метод с апарата TDR/MUX/mpts (ETEST SP. Z O.O.) методи за определянето на водозадържащата способност на почвата.
3. Определяне на водопроводността на почвата при ниски стойности на матричния потенциал в ненаситена почва.
4. Оценка на варирането и референтни стойности на структурните и хидрологични показатели при Карбонатни Черноземи и степента на проявяване на физична деградация при равнинни терени и върху склонове, подложени на водна ерозия.
5. Установяване на взаимовръзките между изследваните показатели с цел оценка на факторите и ефекта от прилаганите противоерозионни технологии в полския опит върху структурата и хидрологичните свойства на средно ерозиран Карбонатен Чернозем.

ОБЕКТ, СХЕМА И МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследване са Карбонатни Черноземи от:

- Опитно поле (ОП) с. Ковачица, обл. Монтана, почвен профил в затревена площ на бивша метеорологична площадка и повърхностни хоризонти в нива. Пробовземане на 21/10/2021;

- ОП с. Тръстеник, обл. Плевен, повърхностни хоризонти от затревена площ и нива. Пробовземане на 21/04/2023.

- Тригодишен полски опит (2021–2023 г.), проведен върху средноерозиран Карбонатен Чернозем в ОП за борба с ерозията в с. Тръстеник, обл. Русе, и съседна затревена площ.

Изследваните обекти попадат в един и същи Подрайон I2 - Ломско-Свищовски на Първи Агроекологичен район (Йолевски и кол., 1980), който според Почвено-географското райониране (Койнов и кол., 1974) е част от Средната Крайдунавска провинция на Подзоната на Черноземите от Севернобългарската лесостепна зона (Фиг. 1).



Фигура 1. Карта на почвено-географските райони от Подзоната на Черноземите (Койнов и кол., 1974) и местоположение на изследваните обекти.

Климатични характеристики в изследваните райони и метеорологични условия през 2021, 2022 и 2023 г. в ОП Тръстеник, Русе

Климатът в района е умерено-континентален със средна, за периода 1961–2010, годишна температура на въздуха (T_a) 11.6–12°C и добре изразена годишна амплитуда на температурата, варираща от –2.1°C в най-студения месец – януари

до 23.4–24°C през най-горещия – юли. Средната годишна сума на валежите (P) варира от 548 mm в района на Ковачица до 585 mm в района на Русе с максимум през юни (72–81 mm) и минимум през февруари и септември. Данните за метеорологичните параметри (валежи, температура и влажност на въздуха, сумарна слънчева радиация и скорост на вятъра) през годините на провеждане на полския опит в опитно поле Тръстеник, Русе (2021–2023) са регистрирани с автоматична метеорологична станция (ATMOS–41 All-in-one Weather Sensor, Meter©) и се съхраняват в ZL6 даталогер (Meter©) от 2021 г.

Експерименталните години (2021-2023) се различават по отношение на годишния и сезонен валеж. Първата (2021 г.) е влажна с обезпеченост 27% (Pr – вероятност за надвишаване) на годишната сума и 4% на сумата за есенно-зимния период (октомври–април) (**Таблица 1**). Вегетационните валежи (май-септември) показват продължително засушаване през 2023 г. с обезпеченост Pr=99%. През 2022 г., на 2 и 3 септември, са паднали изключително големи количества валежи от 60 и 42 mm, което формално води до сходство на вегетационните суми за 2021 и 2022 г. В действителност, 2022 е по-суха и топла в сравнение с 2021 г., както се вижда от разпределението на месечните суми на валежите и еталонната евапотранспирация (ЕТо).

Таблица 1. Валежи и еталонна евапотранспирация (ЕТо) в ОП Тръстеник, Русе . Pr – обезпеченост (%).

Години	Валежи, mm			ЕТо, mm	
	годишни	май-септември	октомври-април	годишни	май-септември
средно*	606	299	307	942	668
2021	682 (27%)	227 (74%)	437 (4%)	908 (69%)	669 (54%)
2022	413 (90%)	225 (77%)	282 (60%)	1019 (24%)	680 (43%)
2023	404 (94%)	65 (99%)	227 (85%)	967 (45%)	651 (68%)

¹ Средно за периода 1951-2023 за валежите, и за 1961-2023 – за данните за ЕТо

Схема на полския опит в опитно поле Тръстеник, Русе

Изследваните варианти в ПО в Тръстеник, Русе, включват отглеждане на две култури в ротация (пшеница, царевица) и три агротехнологии (Т0, Т1, Т2), общо 6 (V1÷V6) на година, реализирани в участъци с размер 748 m² в 4 повторения (**Таблица 2**).

Традиционната обработка на почвата при **пшеница** (Т0, Т1) се състои от няколко (обикновено три) дискувания в различни посоки на дълбочина 10–12 cm. Последното дискуване се извършва на дълбочина 6-8 cm. При опитите с пшеница, отглеждана напречно на склона с почвозащитна технология за минимална обработка на почвата (Т2) е приложено едно дискуване и директна сеитба (10-12 cm) и растително защитни операции за борба с плевелите.

Традиционна обработка на почвата при отглеждане на **царевица** (T0 и T1) включва като основна обработка изораване с плуг на дълбочина 20-25 cm. За опита с царевица е извършена късна дълбока оран на дълбочина до 28 cm с плуг ПН-4-35 и разрохкване на дълбочина 40 cm с култиватор – разрохквач КРН-2,4. При минималните обработки при царевица не се прилага основна обработка с обръщане на пласта, а дискуване в съчетание с директна сеитба. Минималната обработка на почвата (T2) при царевица включва унищожаване на предкултурата чрез пръскане с глифозат, след 10-14 дена дискуване и директна сеитба. През август след плитко брануване, покривната култура се засява на дълбочина 6-8 cm. Покривните култури през 2021 г. са смес от пшеница и рапица, а през 2022 и 2023 г. е използван само ечемик, като покривна култура.

Таблица 2. Схема на изследваните варианти и ротации в тригодишен полски опит в ОП Тръстеник, Русе.

Култура	Сезон	T0- контрола – традиционна обработка по склона	T1 Традиционна обработка напречно на склона	T2 минимална обработка, напречно на склона с използване на предкултура след пшеница и внасянето ѝ като зелено торене преди сеитба на царевицата
<i>Ротация 1 - варианти V1, V2, V3</i>				
Пшеница	2020/2021	V1	V2	V3
Царевица	2022	V1	V2	V3
Пшеница	2022/2023	V1	V2	V3
<i>Ротация 2 - варианти V4, V5, V6</i>				
Царевица	2021	V4	V5	V6
Пшеница	2021/2022	V4	V5	V6
Царевица	2023	V4	V5	V6

Пробовземанията в ПО в Тръстеник, Русе, са извършвани във всеки вариант (V1–V6) в началото (април) и края (октомври) на вегетационния период през 2021, 2022 и 2023 година. Пробите за анализ на физични свойства на почвата са вземани в нарушено и ненарушено състояние в пръстени от 100 и 200 cm³. Еднократно са взети проби от 4 дълбочини (0-5, 15-20, 35-40 и 65-70 cm), а в останалите пробовземания от първите две дълбочини.

Методи на изследване

Основни почвени свойства

Механичният състав на почвените проби е определен чрез пресяване и пипетен метод по международния стандарт ISO11277:2020. Фракциите на пясъка (2-0.063 mm), праха (0.063-0.002 mm) и глината (<0.002 mm) са определени съгласно ISO

11277 (2020) и са използвани за определяне на текстурния клас по IUSS Working Group WRB (2015).

Определени са следните химични и физикохимични показатели на почвените проби: съдържание на CaCO₃ газометрично с апарат на Шайблер (Пенков, 1981); съдържанието и състава на почвеното органично вещество е определено по модифициран метод на Тюрин (Кононова, 1963; Filcheva and Tsadilas, 2002). Физикохимичните показатели, определени по методиката на Ганев и Арсова (1980), са: рН във вода; катионен обменен капацитет – Т8,2; катионен обменен капацитет на силнокиселинния йонообменител - ТСА; слабо киселинния йонообменител – ТА; обща (хидролитична) киселинност (обм Н8.2); степен на наситеност с бази.

Структурни и хидрологични характеристики на почвата

Определени са индикатори за оценка на почвената структура по отношение на твърдата фаза (почвена агрегираност) и по отношение на поровото пространство.

Агрегатният състав на почвата е определен в лабораторни условия чрез пресяване на въздушно суха проба през серия от сита с размери 15, 10, 5, 3, 1 и 0.25 mm. Изчислен е средно претегленият диаметър (MWD, mm) на фракциите по-малки от 10 mm. Водоустойчивостта на почвените агрегати с размер от 10 до 0.25 mm е определена по метода на Савинов, модификация на Вершин и Ревут (1952) (цит. по Долгов, 1966). Използвана е съставна проба (20 g) от четири еднакви количества (5 g) въздушно сухи агрегати от фракции: 10–5, 5–3, 3–1 и 1–0.25 mm; и три проби (по 20 g всяка) с въздушно сухи агрегати от една фракция 3–1 mm. Пресяването във вода е извършено с уред на Савинов, един час след директното изсипване на пробата във вода, при което агрегатът „експлодира” под натиска на водата върху порите, заети с въздух. Водоустойчивостта на агрегатите е изразена чрез отношението ($MWDR = MWDR_{wet} / MWDR_{dry}$) на средните диаметри на агрегатите след ($MWDR_{wet}$, mm) и преди ($MWDR_{dry}$, mm) пресяване във вода и като процентен дял на водоустойчивите макроагрегати ($WSA > 0.25$, %) (Дилкова, 2014).

Почвените проби за определяне на обемната плътност (D_b) и водозадържането с капиляриметър с висящ воден стълб (ISO 11274:1998) са взети в ненарушено състояние в метални пръстени с обем 100 cm³ в 4 повторения. Специфичната плътност (D_s) е измерена във вода с пикнометри с обем 100 cm³ (ISO 11508: 1998). Общата порьозност (P_t , % vol.) е изчислена по данни за обемната (D_b) и специфична (D_s) плътност в обемни проценти по формулата

$$P_t = (1 - D_b / D_s) \times 100\% \quad (1)$$

Измерването на водозадържащата способност на почвени проби е извършено по процедури, близки до описаните в ISO 11274: 1998. Водоотдаването на навлажнените проби при отрицателен потенциал 1, 5, 10 и 33

kPa (pF 1.0, 1.7, 2.0, и 2.5) се осъществява чрез капилариметър с висящ воден стълб (Shot филтри G5 с диаметри на порите 1.0-1.6 μm). Водозадържането при матричен потенциал pF 4.2 е определено, като се използват стрити почвени проби с размер <2 mm с преса на Ричардс с целофанова мембрана. Водозадържането при pF 5.6 е определено при 75% контролирана относителна влажност на въздуха в ексикатори, съдържащи наситен разтвор на NaCl. За изразяване на влажността (θ) в обемни проценти (% vol.) се използва формулата:

$$\theta = W \times Db \quad (2)$$

където W е влажността в тегловни проценти (% w/w), Db е обемната плътност (g cm^{-3}).

Усвояемият от растенията воден капацитет (PAWC, % vol.) е изчислен като разлика между пределната полска влагоемност (FC) и влажността на завяхване (WP). За FC при по-леки почви е прието водозадържането при pF2.0, а за WP – водозадържането при pF4.2:

$$\text{PAWC} = \theta_{pF2.0} - \theta_{pF4.2} \quad (3)$$

където θ е обемната влажност.

Аерационният капацитет (AC) е изчислен като разлика между общата порьозност (P_t) и съдържанието на вода при FC ($\theta_{pF2.0}$), изразено в обемни проценти:

$$\text{AC} = P_t - \theta_{pF2.0} \quad (4)$$

Относителната пределна полска влагоемност (RFC) е изчислена спрямо общата порьозност:

$$\text{RFC} = \theta_{pF2.0} / P_t \quad (5)$$

Данните за съдържанието на прах (silt 0.050-0.002 mm), глина (clay <0.002 mm) и почвен органичен въглерод (SOC) са използвани за изчисляване на индекс за устойчивостта на почвената структура (SI), предложен от Pieri (1992):

$$\text{SI} = 1.724 \times \text{SOC} / (\text{silt} + \text{clay}) \times 100\% \quad (6)$$

Индикаторът степен на уплътненост на почвата (PD packing density) се изчислява по уравнението (Jones et al., 2003):

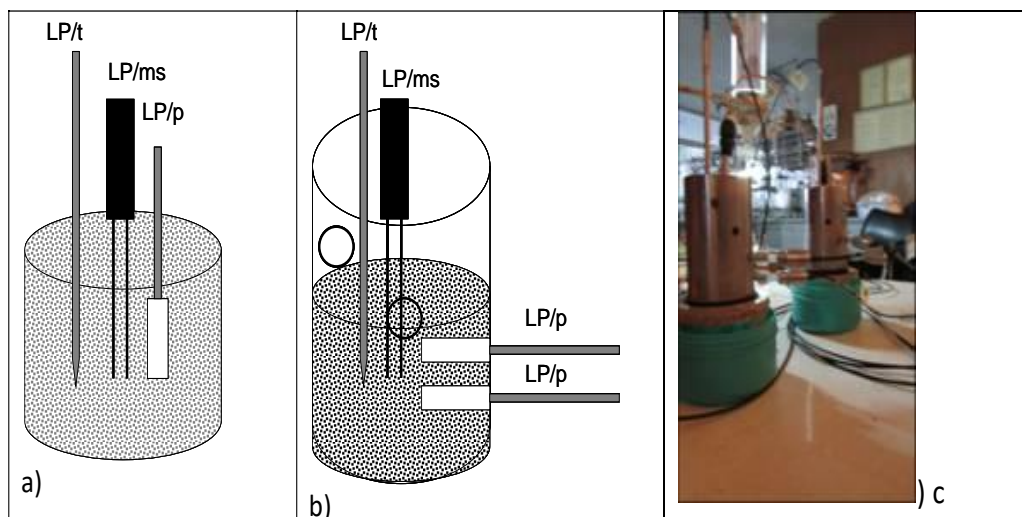
$$\text{PD} = Db + 0.009 C, \quad (7)$$

където Db – е измерената обемна плътност на почвата, g/cm^3 , а C (%w/w) е съдържанието на глина (частици < 0,002 mm).

Коефициентът на филтрация (K_f) е определен чрез метода на de Boedt с постоянен воден напор или по метода с намаляващ воден стълб в инфилтрометри в случаите на ниска филтрация.

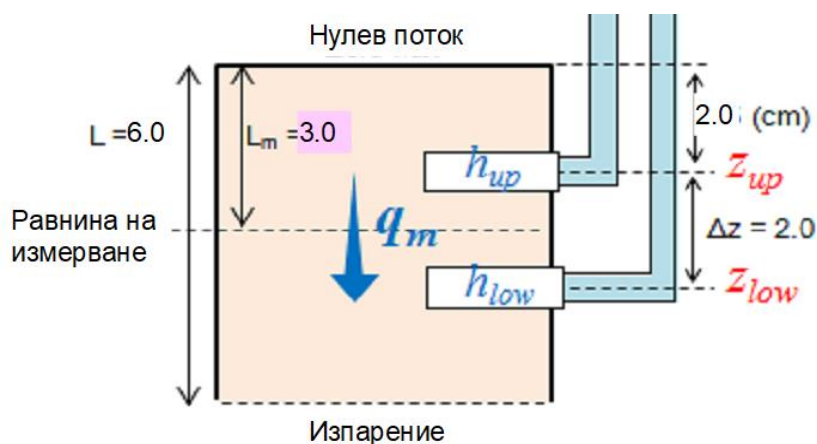
Водозадържаща способност, определена по изпарителен метод

За едновременно измерване на обемната влажност с TDR сензор и матричния потенциал с минитензиометри е използван апаратът TDR/MUX/mpts (ETEST SP. Z O.O.), разработен в Агрофизичния Институт в Люблин, Полша).



Фиг.2 Разположение на сензорите в пръстен от 200 cm³ (a) и в пръстен към уреда (b, c).

За определяне на хидравличната проводимост в ненаситени условия в зависимост от матричния потенциал е следвана процедурата, описана от Masaoka и Kosugi (2018).



Фиг.3 Символи, разположение на сензорите, описани от Masaoka и Kosugi (2018) и актуални разстояния, използвани в настоящото изследване.

Изчисляването на водопроводимостта K (cm/day) е съгласно закона на Дарси–Бъкингам, като се използват следните формули:

$$K(\bar{h}_m) = \bar{q}_m / \bar{t}_m, \quad (8)$$

където \bar{q}_m е потокът q_m (cm/day) през равнината на измерване, а \bar{i}_m е хидравличният градиент i_m (cm/cm), усреднени за интервала Δt .

Модели на разпределение

Уравнението на Розин–Рамлер (Rosin and Rammler, 1933) е използвано за апроксимиране на кривата на разпределение на почвените частици по размер x :

$$P(X < x) = 1 - \exp[-(x/\alpha^*)^\beta] \quad (9)$$

където параметрите α^* и β са калибрирани чрез метода на най–малките квадрати, като се използва опцията Solver на Excel. Параметърът α^* е мярка за големината на частиците (μm), а β е индикатор за варирането на частиците по размери. Високи стойности на β показват малко вариране на размерите на частиците, а по–ниските стойности – за равномерно разпределение в различните класове по размери.

Получените експериментални данни за водозадържащата способност на почвите са апроксимирани с модела (ур. 10) на ван Генухтен (Van Genuchten, 1980):

$$W = (W_{sat} - W_{res}) \cdot \left(1 + (\alpha \cdot h)^n\right)^{-m} + W_{res} \quad (10)$$

където W е влажността на почвата в $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ при матричен потенциал h (hPa). Въз основа на калибрираните параметри на уравнението е изчислен т.н. S–параметър (Dexter, 2004, 2006), представляващ наклон на кривата на водозадържане в инфлексната ѝ точка W_i и е индикация за степента на концентриране на порите в тесен диапазон от размери:

$$S = -n \cdot (W_{sat} - W_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)} \quad (11)$$

$$W_i = (W_{sat} - W_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-m} + W_{res} \quad (12)$$

Според Декстер (Dexter, 2004), параметърът S е показателен за качеството на почвата, като абсолютните стойности на този параметър са граници на четири категории качество на почвата: $|S| < 0.020$ много лошо, $0.020 \leq |S| < 0.035$ лошо, $0.035 \leq |S| < 0.050$ добро, $|S| \geq 0.050$ много добро.

Статистически анализ на данните

Данните са обработени статистически чрез прилагане на еднофакторен и многофакторен дисперсионен анализ, корелационен и регресионен анализ и анализ на главните компоненти чрез използване на статистическия пакет STATGRAPHICS. Точността на апроксимации с моделите е оценена със средноквадратичната грешка на оценка (RMSE).

РЕЗУЛТАТИ

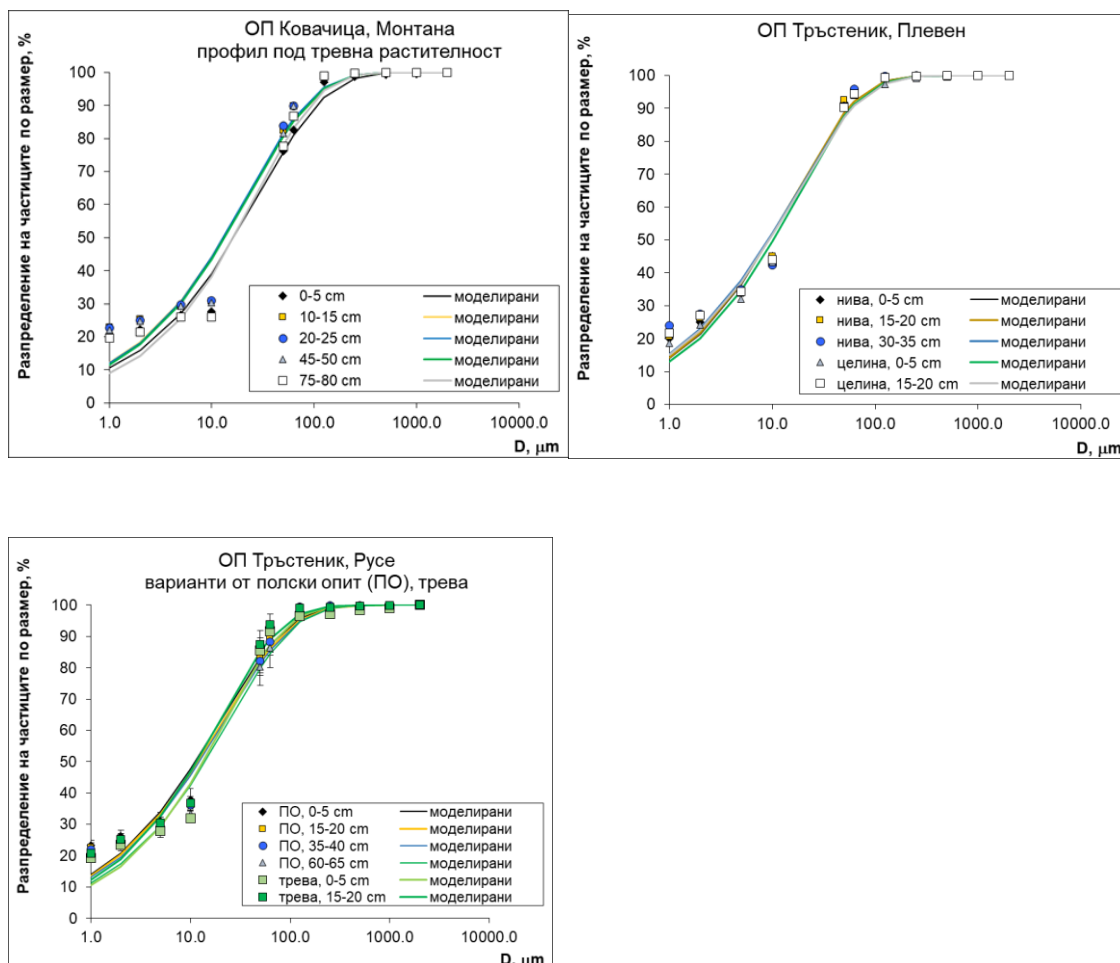
Механичен състав, химични и физикохимични свойства на почвите

Проявено е характерното за Карбонатните Черноземи преобладаване (60–70%) на фракцията на праха (Таблица 3). Съдържанието на глина (частици <0.002 mm) е между 22 и 27%, което се счита за предпоставка за образуване на агрегати (>15%) (Horn et al., 1994). Въпреки че повечето хоризонти от Ковачица и Тръстеник, Русе, са с текстурен клас SiL, а тези в Тръстеник, Плевен – със SiCL, на практика те са разположени близо до границата между тези два класа. По съдържание на физична глина, почвите в Ковачица и Тръстеник, Русе, са леко песъчливо глинести, а тази в Тръстеник, Плевен, е средно песъчливо–глинеста според класификацията на Качински. Почвите се характеризират със сравнително еднороден по дълбочина механичен състав, като се наблюдава олекотяването му в дълбочина. Коефициентът на вариране (Cv) на праха в дълбочина е 1–3%, а на глината и пясъка са по високи, съответно 3–7% и 7–24%. Еднородността на механичния състав личи и от почти съвпадащите кумулативни криви (Фиг. 4).

Таблица 3. Съдържание на органичен въглерод (C), общи карбонати и текстурни фракции.*Физичната глина е произчислена по методиката на Атанасов и кол. (2013)

Хоризонти	Дълб., cm	Орг. C,%	Общи карб. %	Фракции по FAO (2006), %				Тексту- рен клас USDA	*Физ. гл. <0.01 mm, %	Текстурен клас Качински
				Пясък 2– 0.063 mm	Прах 0.063– 0.002 mm	Глина <0.002 mm	Пясък 2–0.05 mm			
почвен профил в необработваема тревна площ в района на ОП Ковачица										
Ак	0-5	2.07	2.56	17.3	60.4	22.3	23.9	SiL	22.4	леко пес. глинест
0-16 cm	10-15	1.38	3.38	10.3	64.4	25.3	17.5	SiL	25.0	леко пес. глинест
А k 16-37 cm	20-25	1.25	3.58	10.1	64.9	25.0	16.1	SiL	25.1	леко пес. глинест
Ак 37-50 cm	45-50	1.07	5.8	10.1	65.2	24.7	18.4	SiL	24.0	леко пес. глинест
Ак 50-85 cm	75-80	0.71	14.36	13.3	65.1	21.5	22.3	SiL	18.0	глинесто песъчлив
Нива Арк	0-10	1.46	3.58							
повърхностни хоризонти на Карбонатен Чернозем с. Тръстеник, обл. Плевен										
трѐва,	0-10	2.5	следи	6.1	69.7	24.2	9.0	SiL	37.0	средно пес. глинест
храсти	15-20	1.3	0.48	5.7	67.3	27.0	9.8	SiCL	37.8	средно пес. глинест
Нива,	0-5	1.6	1.07	4.2	70.8	24.9	8.3	SiL	38.3	средно пес.гл.
угар	15-20	1.25	1.68	5.1	68.7	26.2	7.4	SiL	38.1	средно пес. глинест
	30-35	1.09	7.78	4.1	68.4	27.6	9.3	SiCL	33.2	ср.пес.гл.

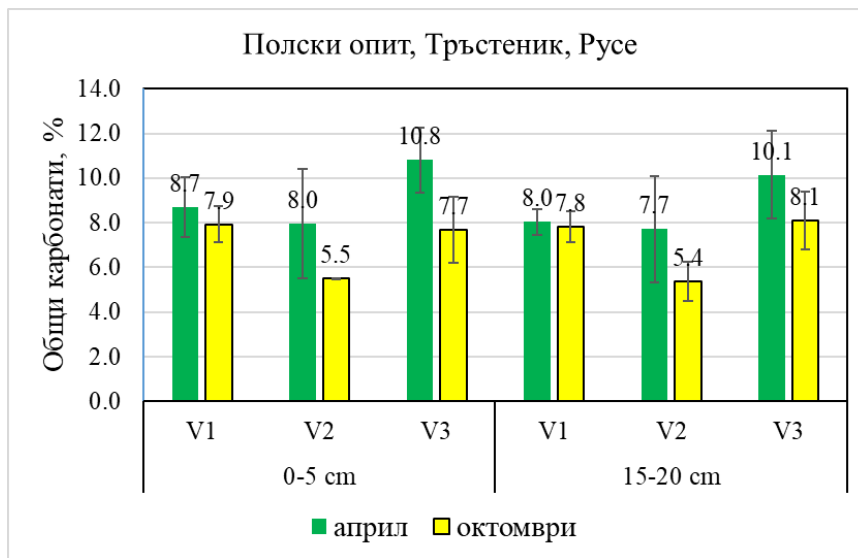
Средни стойности от вариантите от ПО в опитно поле с. Тръстеник, обл. Русе											
Арк	3	0-10	1.37 ±0.04	9.3 ±2.3	9.0a ±6.1	64.8a ±4.6	26.2 ±1.8	14.8 ±6.8	SiL	29.3 ±2.7	леко пес. глинест
	7	15-20	1.24 ±0.20	6.8 ±2.6	10.8a ±5.0	63.6a ±3.6	25.5 ±1.5	16.4 ±6.0	SiL	29.1 ±2.0	леко пес. глинест
Ак	3	30-40	0.9	13.9 ± 6.3	11.8a ±3.3	63.1a ±2.6	25.1 ±0.9	17.8 ±3.1	SiL	26.5 ±3.0	леко пес. глинест
Ск		60-70	0.4	18.5 ± 2.9	13.6a ± 6.4	63.3a ±4.9	23.0 ±1.9	19.8 ±5.8	SiL	21.6 ±3.3	леко пес. глинест
трева и храсти, Тръстеник, Русе,											
А		0-10	2.0	6.75	8.4	68.2	23.4	14.5	SiL	24.9	леко пес. глинест
		15-20	1.7	10.48	6.2	68.7	25.1	12.6	SiL	27.6	леко пес. глинест



Фиг. 4. Експериментални и моделирани с ур. 9 данни за кумулативното разпределение на почвените частици по размер в изследваните почви

Диапазонът на вариране на характеристикния размер - параметъра α^* в уравнението на Розин-Рамлер (Ур. 9): между 23–29 μm в Ковачица, между 16–17 μm в повърхностните слоеве на почвата в Тръстеник, Плевен, и между 20–25 μm в Тръстеник, Русе.

Наличието на карбонати определя алкална реакция на почвите, като в повърхностните хоризонти, тя е слабо алкална (рН във вода между 7.5 и 8.0/8,2), докато в дълбочина, с увеличаване на съдържанието на карбонати, тя е класифицирана като умерено алкална (рН във вода между 8.2–8.6) (Пенков и кол., 1991). От проследяване на сезонната динамика в съдържанието на общи карбонати в ОП Тръстеник, Русе, е установено, че вариантът с минимални обработки и използване на зелено торене (Т2), е с най-високо съдържание на карбонати през пролетта (Фиг. 5). Това се обяснява с по-голямото количество органичен материал, който се внася и създава по-добри условия за разтваряне на иначе слабо разтворимите карбонати.

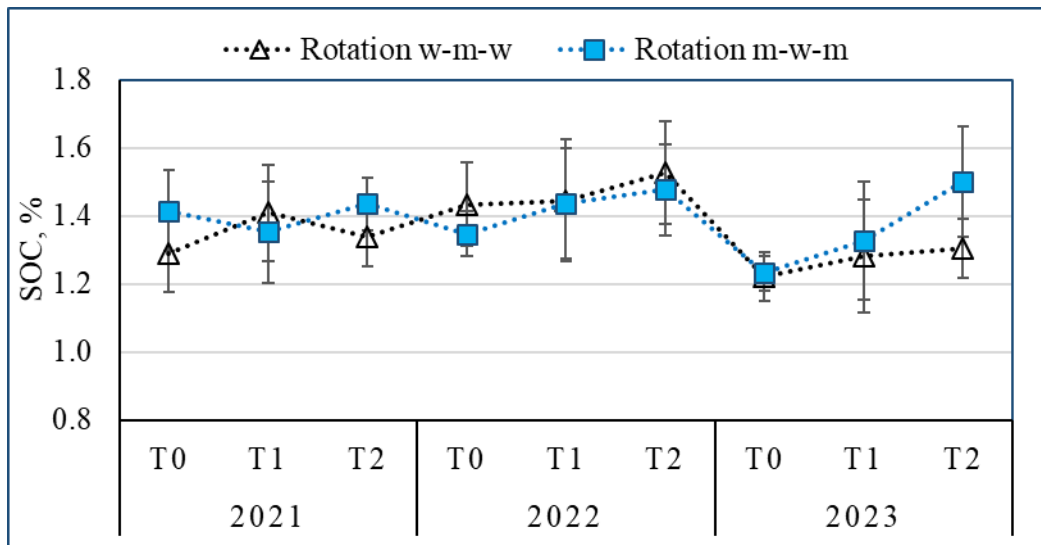


Фиг. 5. Съдържание на общи карбонати по сезони, варианти и дълбочини. Полски опит, Тръстеник, Русе. 2021–2023 г.

При един и същ вид почвено покритие – тревна растителност в изследваните обекти, съдържанието на органичен въглерод (SOC) се оценява като високо (2–2.5%) (Таблица 3), след което в равнинните обекти рязко намалява в слоя 10–20 cm до 1.3–1.38%, което подкрепя хипотезата, че в миналото те са използвани като обработваеми. В обработваемите площи в трите обекта SOC варира между 1.4 и 1.6%. Хумусът в повърхностния слой в почвата в Ковачица е хуматен, докато в другите обекти е фулватно-хуматен. Хуминовите киселини са свързани с около 80% с калция. „Свободни” и свързани с подвижните форми на R_2O_3 хуминови киселини в този случай са около 20%, което се различава от типичния състав на хумуса за Карбонатните Черноземи, при който хуминовите киселини са свързани на 100% с калция (Филчева и кол., 2013).

При извършения мониторинг върху почвения органичен въглерод във вариантите на полския опит в Тръстеник, Русе, не е установена ясна тенденция за промените му през 2021 и 2022 г. (Фиг. 6). Прилагането на минимални противоерозионни технологии (Т2) се проявява положително при ротация

царевица-пшеница-царевица, където средно за тригодишния период SOC е 1.47% в слоя 0–20 cm, спрямо 1.37% в T1 и 1.33% в контролата T0.



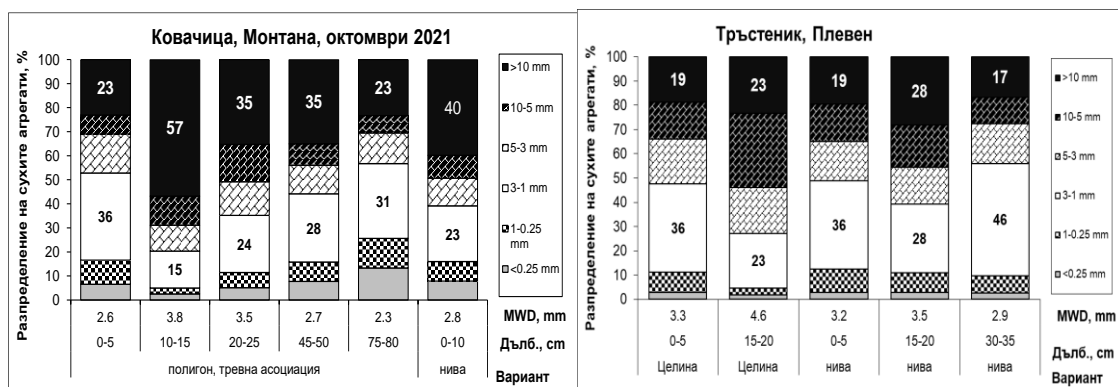
Фиг. 6 Динамика в съдържанието на почвен органичен въглерод (SOC). T0–традиционна обработка по наклона на склона, T1– традиционна обработка напречно на наклона на склона, T2 – минимална обработка с покривна култура. Ротация w–m–w (пшеница–царевица–пшеница), Ротация m–w–m (царевица–пшеница–царевица). Вертикалните отсечки отбелязват стандартните отклонения.

Катионно–обменният капацитет ($T_{8.2}$) във всички хоризонти на изследваните профили варира в тесни граници – между 22 и 26 cmol/kg почва и е класифициран като голям (Пенков и кол., 1991). Той се състои изцяло от базични катиони, предимно калциеви (20–24 cmol/kg) и в много по–малка степен от магнезиеви катиони (около 2.5 cmol/kg), което е отразено в 100% степен на наситеност с бази.

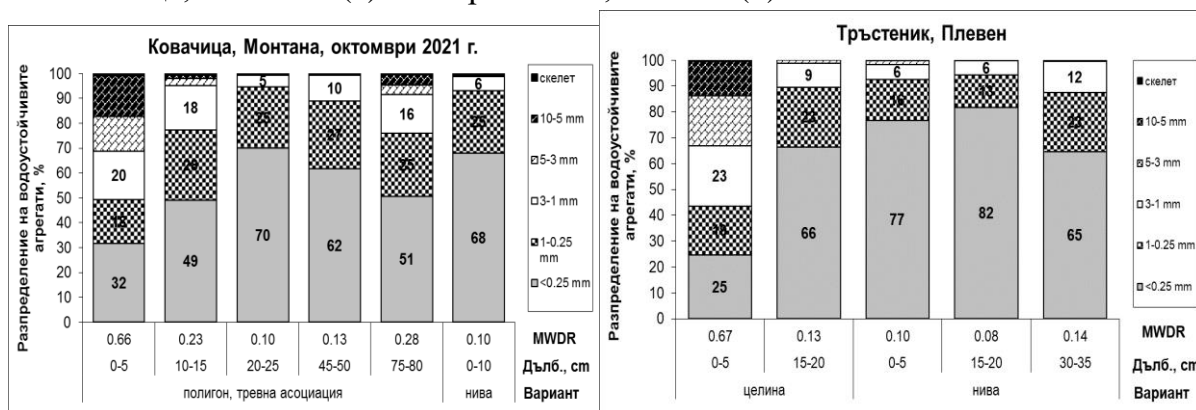
СТРУКТУРНИ И ХИДРОЛОГИЧНИ СВОЙСТВА НА ПОЧВАТА

Карбонатни Черноземи от равнинни площи

Разпределението на агрегатите по размери в изследваните хоризонти на Карбонатни Черноземи в с. Ковачица и с. Тръстеник, Плевен, под трева и в повърхностния слой на обработваемите площи, показва преобладаване (над 50%) на агрономически ценните агрегати (10–0.25 mm), като процентите в 0–5 cm слой са по–високи (78.6%) в почвата в с. Тръстеник, Плевен в сравнение с Ковачица (70.4%) (Фиг. 7). Водоустойчивостта на почвените макроагрегати е най–висока ($MWDR_{\Phi 10-0.25} = 0.66$ и 0.68) в повърхностния 0–5 cm слой под тревна растителност и в двата обекта и се оценява, като много добра (Фиг. 8).



Фиг. 7. Разпределение на сухите агрегати по размери при Карбонатен Чернозем в с. Ковачица, Монтана (а) и с. Тръстеник, Плевен (b).



a)

b)

Фиг. 8. Разпределение на водоустойчивите агрегати по размери в съставна проба от хоризонти на Карбонатни Черноземи в с. Ковачица, Монтана (а) и с. Тръстеник, Плевен (b).

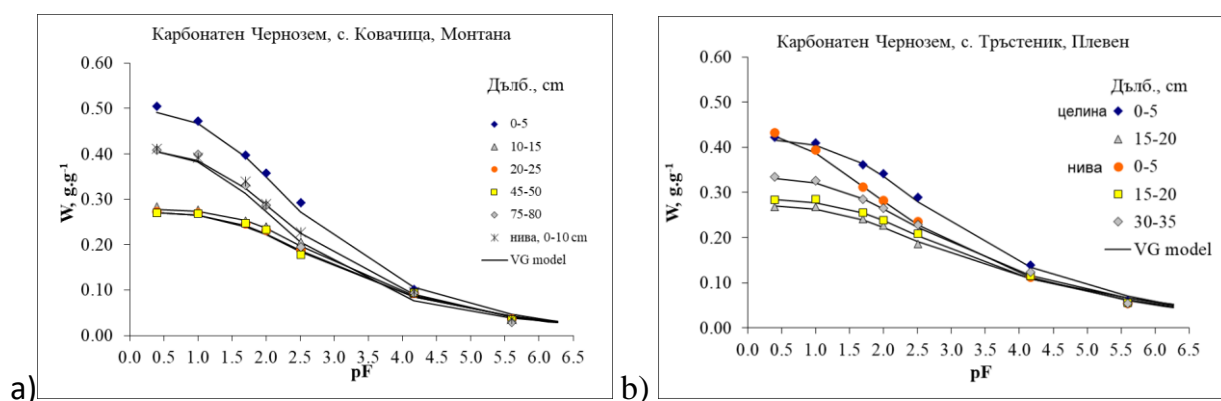
При необработваемите варианти, обемната плътност в слоя 0–5 cm е по-ниска в Ковачица - 0.99 g cm^{-3} в сравнение с Тръстеник, Плевен - 1.22 g cm^{-3} , което може да се дължи на високата влажност (29.9%) в повърхностния слой при пробовземане в Ковачица. Степента на уплътненост на дълбочина 20 cm е висока ($PD > 1.75 \text{ g cm}^{-3}$), както при необработваеми условия (трева), така и при обработваеми (Таблица 4).

Таблица 4. Специфична ($D_s, \text{g.cm}^{-3}$) и обемна плътност на почвата ($D_b, \text{g.cm}^{-3}$), влажност при пробовземане ($W_{пр.}$), обща порьозност ($P_t, \% \text{ vol.}$) и степен на уплътненост ($PD, \text{g cm}^{-3}$) на Карбонатни Черноземи.

Хор. cm	Дълб., cm	$D_b, \text{g cm}^{-3}$	$W_{пр.}, \% \text{ w/w}$	$D_s, \text{g cm}^{-3}$	$P_t, \% \text{ vol.}$	$PD, \text{g cm}^{-3}$	оценка
Ковачица, тревна площ, бивша метеорологична площадка							
Ak, 0-16	0-5	0.99 ± 0.13	29.9 ± 2.3	2.651	62.7 ± 4.9	1.19	ниска
	10-15	1.52 ± 0.02	20.9 ± 1.3	2.696	43.6 ± 0.9	1.74	средна
A k, 16-37	20-25	1.53 ± 0.08	20.7 ± 0.2	2.702	43.2 ± 2.8	1.76	висока
Ak, 37-50	45-50	1.52 ± 0.04	19.8 ± 0.6	2.699	43.4 ± 1.6	1.74	средна
Ak, 50-85	75-80	1.15 ± 0.06	10.7 ± 0.3	2.651	57.5 ± 2.2	1.31	ниска

Ковачица, нива, угар							
Арк	0-5	1.19 ±0.06	23.8 ±1.1	2.702	56.6 ±2.1	1.39	ниска
ОП Тръстеник, Плевен, трева, храсти							
А	0-5	1.22 ±0.01	22.3 ±1.0	2.660	55.2 ±0.6	1.43	средна
	15-20	1.55 ±0.02	17.0 ±0.2	2.712	41.7 ±0.6	1.80	висока
ОП Тръстеник, Плевен, нива							
Ар	0-5	1.18 ±0.05	19.2 ±0.6	2.706	56.4 ±1.8	1.40	ниска
	15-20	1.54 ±0.03	20.0 ±0.0	2.726	43.8 ±1.1	1.77	висока
	30-35	1.37 ±0.03	22.1 ±0.1	2.733	49.9 ±1.2	1.62	средна

Експерименталните данни за водозадържащата способност при различен матричен потенциал, както и тяхната апроксимация с уравнението (Ур. 10) на ван Генухтен (van Genuchten, 1980) за двата обекта са представени на **Фиг. 9**.



Фиг. 9. Експериментални данни и моделирани с уравнението (Ур. 10) на кривите на водозадържане за Карбонатен Чернозем: с. Ковачица Монтанско, трева и нива (a); с. Тръстеник, Плевен, необработваема (трева, храсти) и нива (b).

Данните за хигроскопична влажност ($W_{5.6}$) и влажността на завяхване ($WR_{4.2}$) (**Таблица 5**) са по-високи с около 2.5% при Карбонатния Чернозем в Тръстеник, Плевенско, което се дължи на малко по-тежкия механичен състав. По-високите стойности на тези показатели в повърхностния 0–5 cm слой се дължат на по-високо съдържание на органично вещество. Водозадържащата способност при $pF_{2.0}$ и 2.5 в двете почви е близка, като в повърхностния 0-5 cm при целинни условия осигурява висок усвояем воден капацитет на растенията (над 20% vol.) и при двете почви. В дълбочина и при обработваеми условия, ППВ намалява, като по-високият дял на неусвояема от растенията вода ($WR_{4.2}$), води до по-ниски стойности на усвояемия воден капацитет на Карбонатния Чернозем в Тръстеник, Плевенско. Въпреки това, тези стойности са на границата на оптималното. Ниските стойности на аерационния капацитет (под 10% vol.) и високата относителна пределна полска влагоемност (над 0.7) в подповърхностния хоризонт потвърждават недостатъчна аерация. Индексът на Декстър S показва много добро качество в повърхностния 0–5 cm слой и при целини и при обработваеми площи, както и на дълбочина 75-80 cm (**Таблица 5**), а в останалите

изследвани слоеве качеството е добро S [0.035÷0.050) за почвата в Ковачица, а на дълбочина 15-20 cm в Тръстеник, Плевен, качеството по този показател се оценява като лошо (<0.035) и в затревената площ и в нивата.

Таблица 5. Водозадържане (W) при потенциали рF 2.0, 2.5 и 4.2, усвояем от растенията воден капацитет (PAWC), относителна пределна полска влагоемност (RFC), аерационен капацитет (AC), индекс на Декстър (S).

Хор.	Дълб. cm	W _{2.0} , % w/w	W _{2.5} , % w/w	WP _{4.2} , % w/w	W _{5.6} , % w/w	PAWC, % vol.	RFC	AC, % об.	S
Ковачица, трева, бивша метеорологична площадка									
Ак	0-5	35.8 ±2.8	29.2 ±2.2	10.1 ±0.04	3.76 ±0.04	25.1 ±0.7	0.56	27.6 ±6.8	0.073
	10-15	24.1 ±1.5	20.6 ±1.4	9.1 ±0.05	3.53 ±0.01	22.7 ±1.9	0.84	7.1 ±1.1	0.038
Ак	20-25	23.2 ±0.6	18.8 ±0.2	9.2 ±0.04	3.55 ±0.02	21.3 ±1.0	0.82	7.8 ±4.2	0.036
Ак	45-50	23.2 ±0.9	17.8 ±0.6	9.5 ±0.07	3.41 ±0.00	21.0 ±0.8	0.82	8.0 ±1.5	0.035
Ак	75-80	28.7 ±0.9	19.5 ±0.5	9.3 ±0.01	2.95 ±0.00	22.2 ±0.2	0.57	24.6 ±2.8	0.066
Ковачица, нива, угар									
Арк	0-5	29.0 ±2.2	22.7 ±0.5	9.5 ±0.07	3.54 ±0.12	23.1 ±2.0	0.61	22.1 ±2.3	0.059
Тръстеник, Плевен, трева и храсти									
А	0-5	34.1 ±1.5	28.9 ±2.6	14.0 ±0.23	6.1 ±0.02	24.4 ±1.6	0.75	13.8 ±1.0	0.051
	15-20	22.7 ±0.4	18.7 ±0.1	11.8 ±0.01	5.9 ±0.04	17.0 ±0.5	0.85	6.4 ±0.5	0.028
Тръстеник, нива, угар									
Ар	0-5	28.2 ±0.8	23.5 ±0.5	11.3 ±0.04	5.4 ±0.03	19.9 ±1.0	0.59	23.2 ±3.0	0.052
	15-20	23.8 ±0.4	20.9 ±0.1	11.5 ±0.06	5.5 ±0.01	18.9 ±0.2	0.83	7.3 ±1.2	0.031
	30-35	26.5 ±0.6	22.9 ±0.4	12.4 ±0.07	5.5 ±0.03	19.4 ±0.5	0.73	13.5 ±1.5	0.037

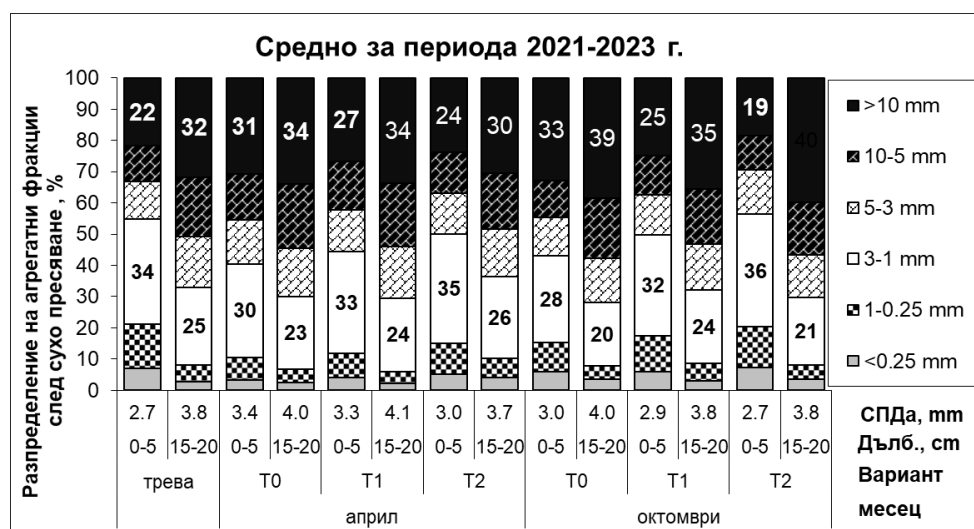
Коефициентът на филтрация е средно висок в повърхностните слоеве на почвата в Тръстеник, Плевен, а в подповърхностния в обработваемата площ е най-нисък – 0.101 cm/h (Таблица 6). Въпреки че аерационният капацитет е сходен при целина и нива на тази дълбочина, ниските стойности на филтрацията говорят за прекъсване на връзките между порите, което води до намалена водопроводимост. В Ковачица на дълбочина 10–15 cm, Kf е средно нисък, а на дълбочина 45–50 cm е висок.

Таблица 6. Коефициент на филтрация (Kf), измерен в лабораторни условия на проби от повърхностните почвени слоеве на вариантите в ОП Тръстеник Плевенско и Ковачица, Монтанско.

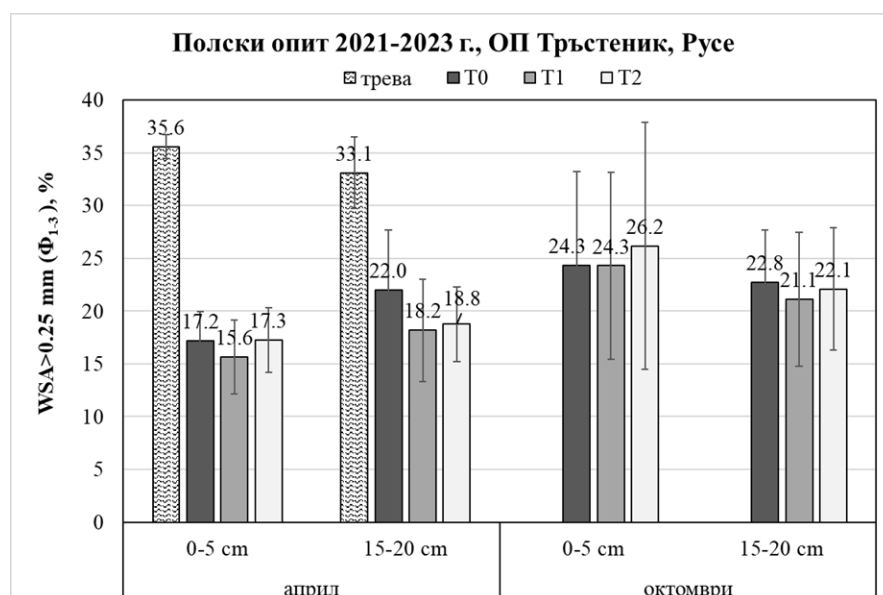
Обект	Земеползване	Дълб., cm	Kf, cm/h	stdev.	Cv, %	клас
Ковачица	трева	10–15	0.280	0.152	54	Средно нисък
		45–50	2.146	0.903	42	Средно висок
Тръстеник, Плевен	трева, храсти	0–5	0.416	0.205	49	Средно висок
		15–20	0.631	0.455	72	Средно висок
	нива	0–5	0.428	0.281	66	Средно висок
		15–20	0.101	0.115	114	Средно нисък

Полски опит върху средно ерозиран Карбонатен Чернозем

При полския опит в с. Тръстеник, Русе, също доминират агрономически ценните агрегати, като варират от 61 до 74% в слоя 0–5 cm и от 57 до 64% в слоя 15–20 cm (Фиг. 10). При есенните пробоземания водоустойчивостта на агрегатите е по-висока, като след изключително продължителното засушаване през 2023 г., се наблюдава значително повишаване на водоустойчивостта на агрегатите (Фиг. 11, Таблица 7). В слоя под 30 cm съдържанието на водоустойчивите почвени агрегати е значително по-високо и е средно около 33%, което се дължи на по-високото съдържание на карбонати (Таблица 7).



Фиг. 10. Разпределение на агрегатните фракции след сухо пресяване, средно за периода 2021–2023 г. СПДа – среднопретеглен диаметър на агрегатите.



Фиг. 11. Средно съдържание на водоустойчивите агрегати (WSA > 0.25 mm) в единична фракция (Phi 1-3 mm) за трите години (2021, 2022 и 2023 г.) и двете култури (пшеница и царевица) по варианти на почвообработка в повърхностните

0–5 и 15–20 cm слоеве на средно ерозиран Карбонатен Чернозем от района на ОП Тръстеник, Русенско.

Таблица 7. Многофакторен дисперсионен анализ на съдържанието на водоустойчиви агрегати ($WSA_{1-3} > 0.25$ mm, % w/w) по дълбочина и по варианти, култура, сезон и години за слоя 0-20 cm в ОП Тръстеник, Русе

дълбочина		Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0-5	20.6 ^a	T0	21.6b	пшеница	20.1a	април	18.2 ^a	2021	20.2b
15-20	21.0 ^a	T1	19.6a	царевица	21.5a	октомври	23.4 ^b	2022	17.7a
35-40	36.2 ^b	T2	21.6ab					2023	24.5c
60-65	32.7 ^b								
F	55.9		2.8		3.64		48.3		29.5
p	0.000		0.06		0.06		0.000		0.000
0-5	35.6	целина							
15-20	33.1								

Обемната плътност в повърхностния 0–5 cm почвен слой не се различава между вариантите и е средно 1.31 ± 0.1 g cm⁻³ за целия период (**Таблица 8**). При средно съдържание на глина (<.002 mm) 26% в повърхностните 0–5 и 15–20 cm, граничната стойност на обемната плътност, която съответства на висока степен на уплътненост ($PD > 1.75$ g cm⁻³) е 1.52 g cm⁻³, а тази, при която уплътнеността на почвата е ниска ($PD < 1.4$ g cm⁻³) е 1.17 g cm⁻³. Във всички варианти при пшеница, с изключение на T2 през октомври, се наблюдава високо подпочвено уплътняване (**Фиг. 12**). Това се дължи на образуване на плужна пета в резултат на дискуванията на дълбочина 10-12 cm. При царевицата уплътняването се оценява като средно, но вариантът с минимална обработка (T2) показва по-висока плътност в сравнение с (T1), който е при традиционна обработка, но също напречно на наклона на склона.

Таблица 8. Многофакторен дисперсионен анализ на факторите влияещи върху обемната плътност (Db , g.cm⁻³) (a) и общата порьозност (b) във вариантите на полски опит в ОП Тръстеник, Русенско.

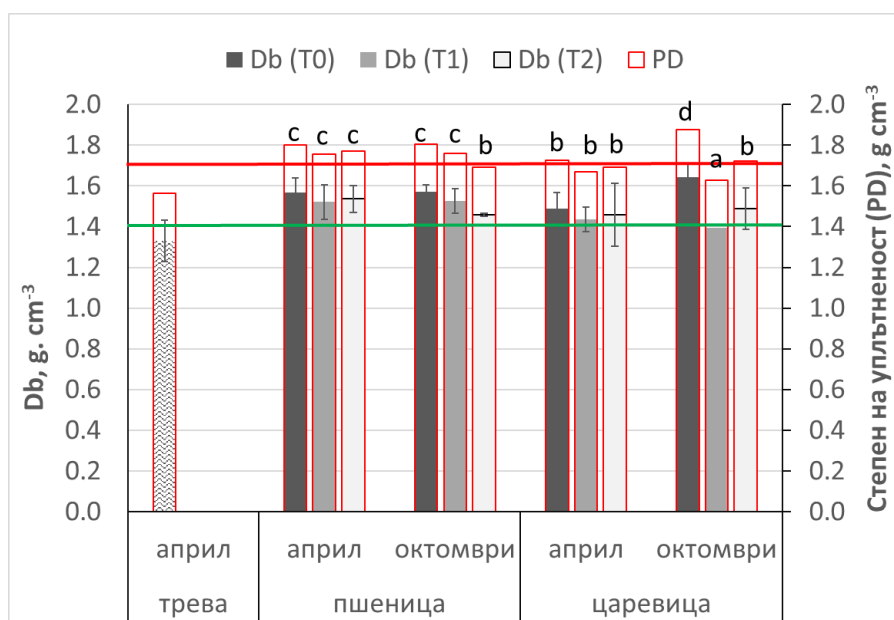
а) Обемна плътност (Db , g cm⁻³)

дълбочина cm		Повърхностни почвени слоеве (0–5 и 15–20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0–5	1.31a	T0	1.45b	пшеница	1.43a	април	1.41	2021	1.43b
15–20	1.51b	T1	1.39a	царевица	1.40a	октомври	1.41	2022	1.38a
35–40	1.38b	T2	1.39a					2023	1.43b
60–65	1.28a								
F			11.5		5.83		0.29		7.57
p			0.000		0.016		0.59		0.001
0–5	1.05	трева							
15–20	1.33								

b) Обща порьозност (Pt. % vol.)

дълбочина cm		Повърхностни почвени слоеве (0–5 и 15–20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0–5	51.6c	T0	46.4a	пшеница	47.3	април	48.1	2021	47.1a
15–20	44.3a	T1	48.5b	царевица	48.6	октомври	47.8	2022	48.9b
35–40	49.4b	T2	48.9b					2023	47.7a
60–65	53.2d								
F	110.1		11.7		7.64		0.31		5.74
p	0.0000		0.000		0.006		0.58		0.004
0–5	61.0	трева							
15-20	51.0								

Най-високо е подпочвеното уплътняване в T0 през есента. Средно за целия период и ротации, уплътняването в слоя 15–20 cm е значително по-високо (с 6%) в T0 (средно $1.57 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$) в сравнение с T1 и T2 (средно $1.48 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$).

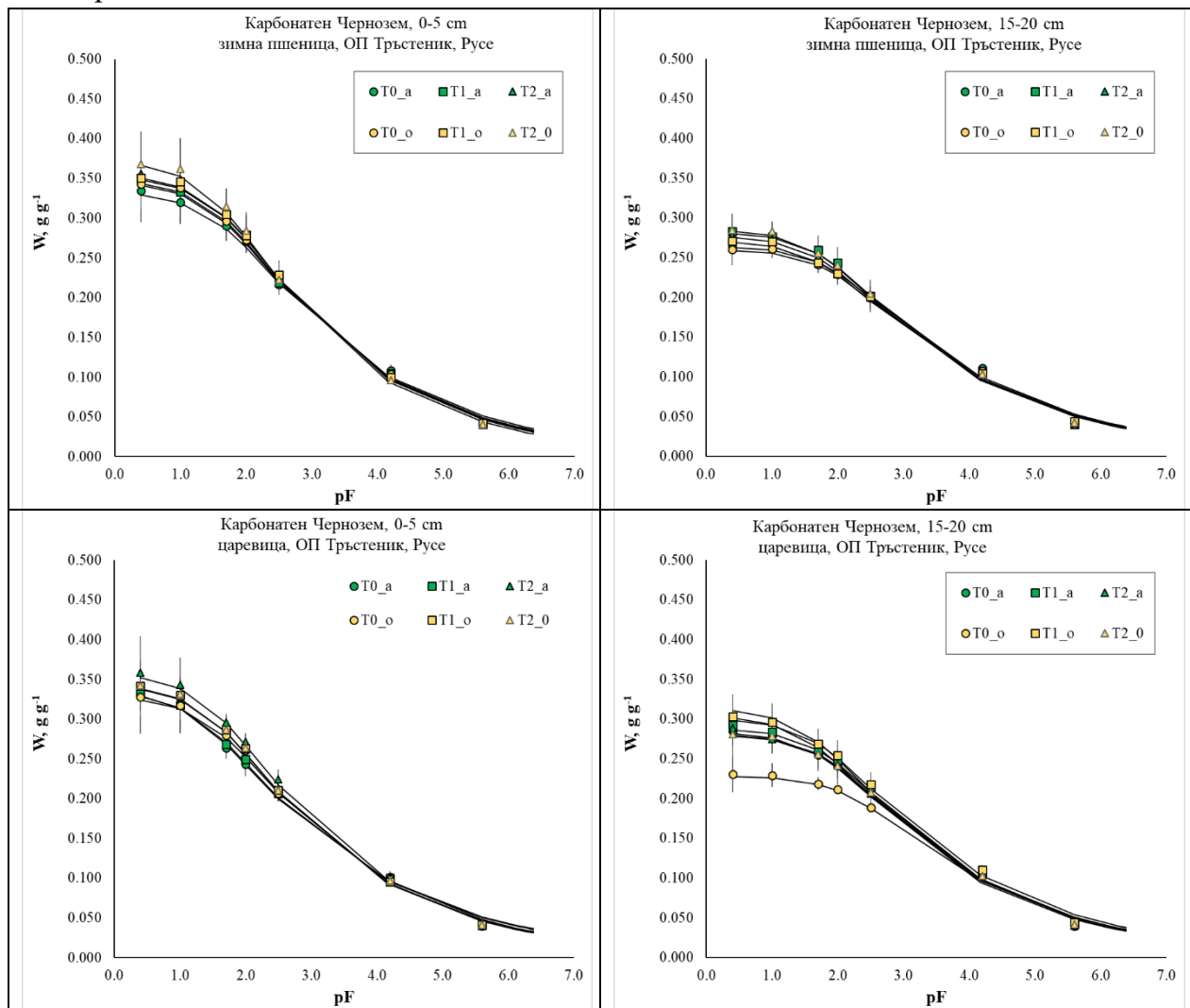


Фиг. 12. Объемна плътност (Db) и степен на уплътненост (PD) в слоя 15-20 cm на Карбонатен Черномозем, ОП Тръстеник, Русенско.

Експерименталните и апроксимирани, с уравнението на ван Генухтен (ур. 10), данни за водозадържащата способност при различен матричен потенциал са обобщени за целия период и са представени на **Фиг. 13**.

Резултатите от дисперсионния анализ показват, че и при трите изследвани потенциала във влажната зона (pF0.4, 1.0 и 1.7), водозадържането се променя в дълбочина), като най-ниско е в слоя 15–20 cm в резултат на уплътняването. Под този слой водозадържащата способност нараства и се доближава до тази в слоя 0–5 cm, което се обяснява с по-ниската объемна плътност в този слой. Почвата при почвозащитните обработки (T1 и T2) е с по-висока водозадържаща способност в сравнение с конвенционалната обработката по наклона на склона (T0), но данните при двата варианта не се различават помежду си. Сезоните и вида на културата не

оказват влияние, с изключение на водозадържането при $pF_{1.7}$ при пшеница, което е по-високо от това при царевица (Таблица 9). Водозадържащата способност във влажната зона при целината е по-висока от тази при обработваемата почва, като разликата е особено добре изразена в слоя 0–5 cm. В подповърхностния 15–20 cm слой, показателите под трева се изравняват с тези в повърхностния 0–5 cm слой на обработваемата почва.



Фиг. 13. Зависимости на водозадържането от матричния потенциал (pF криви) на дълбочина 0–5 и 15–20 cm. Средни за периода 2021–2023 за април (_a) и октомври (_o), експериментални данни и апроксимирани, с уравнението (ур. 10) на ван Генухтен (van Genuchten. 1980).

Водозадържането в т.н. капилярна зона е най-съществено от гледна точка на влагообезпечеността на растенията. Сравнителният анализ на изследваните фактори показва, че ППВ зависи от дълбочината (Таблица 10), като следва да се отбележи, че не се наблюдава увеличение на водозадържането под дълбочина 25 cm.

Таблица 9. Дисперсионен анализ на факторите, влияещи върху водозадържащата способност (W,% w/w) при потенциал **pF1.7**.

дълбочина cm	Повърхностни почвени слоеве (0–5 и 15 – 20 cm)								
	вариант		култура		сезон		година		
0–5	29.0c	T0	26.2a	пшеница	27.5b	април	27.1a	2021	27.4a
15–20	25.2a	T1	27.4b	царевица	26.8a	октомври	27.1a	2022	27.1a
35–40	27.0b	T2	27.7b					2023	26.8a
60–65	27.9b								
F	78.8		11.4		7.45		0.17		1.8
p	0.0000		0.000		0.007		0.68		0.17
0–5	39.3	трева							
15–20	29.4								

При pF2.0, все още се наблюдава ефектът от подпочвеното уплътняване на дълбочина 15–20 cm за намаляване средно с близо 3% на влажността при този потенциал спрямо повърхностния слой (**Таблица 10**), но при по-високия потенциал pF2.5 не се наблюдава този ефект. Запазва се в същата посока и положителният ефект от противоерозионните обработки спрямо обработката по наклона на склона, като разликата е средно с 1%. Прави впечатление, че водозадържането при pF2.0 и 2.5 е по-високо през първата година в сравнение със следващите. Под трева водозадържащата способност и на двете изследвани дълбочини (0–5 и 15–20 cm) е по-висока от тази под вариантите от полския опит. Това отразява по-добрата структура на необработваемата почва и влиянието на тревната растителност.

Таблица 10. Дисперсионен анализ на факторите, влияещи върху водозадържащата способност (W,% w/w) при потенциали **pF2.0 (FC)**

Дълбочина cm	Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)								
	вариант		култура		сезон		година		
0-5	26.7c	T0	24.7a	пшеница	25.6b	април	25.3a	2021	25.8b
15-20	23.9a	T1	25.6b	царевица	25.1a	октомври	25.3a	2022	25.2a
35-40	25.0b	T2	25.7b					2023	24.9a
60-65	25.2b								
F	53.4		7.94		4.95		0.05		4.49
p	0.0000		0.000		0.027		0.83		0.012
0-5	35.5	трева							
15-20	27.2								

Влажността при потенциали pF4.2 (WP - влажност на завяхване) (**Таблица 11**) и pF5.6 (Wh хигроскопична влажност при 75% относителна влажност на въздуха) е тясно свързана с основни характеристики на твърдата част на почвата и отразява слабо олекотяване на механичния състав и намаляването на

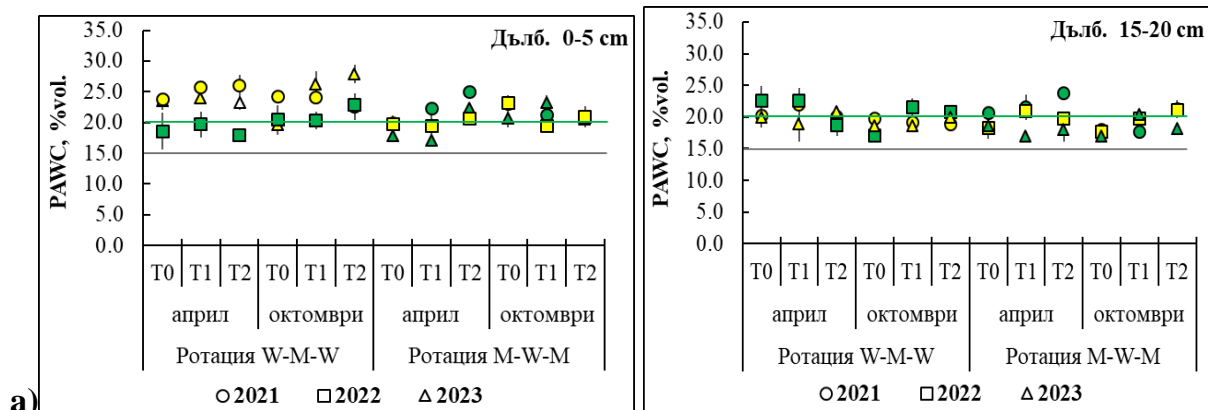
органичното вещество в дълбочина. Въпреки че разликите между различните варианти са под 0.3% за WP, и под 0.1% за Wh, статистическият анализ доказва, че тези разлики са значими. Намаляването на WP води до увеличаване на усвояемия воден капацитет. По-високите стойности на хигроскопичната влажност под трева се дължат на по-високото съдържание на органичен въглерод.

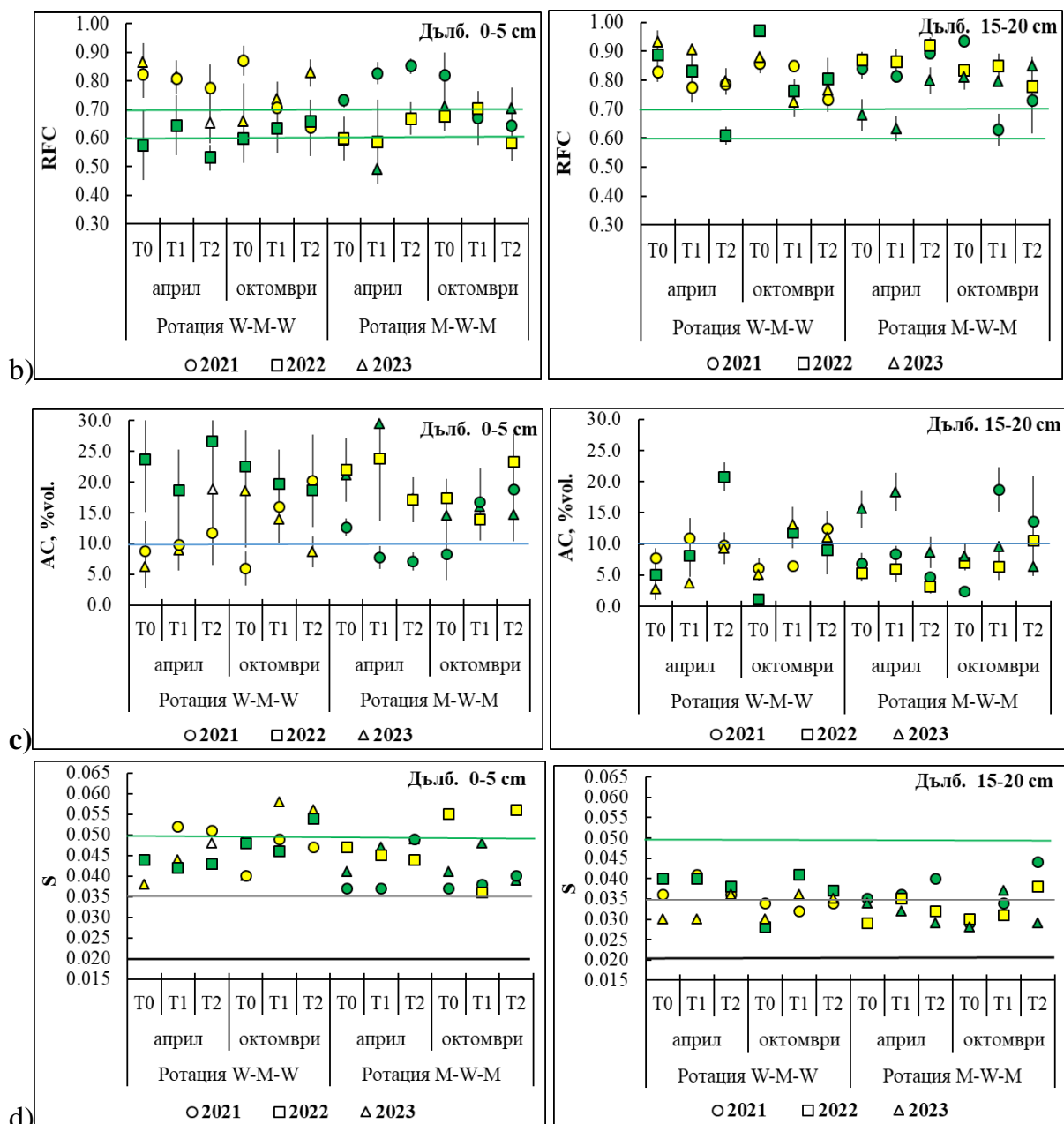
Таблица 11. Дисперсионен анализ на факторите, влияещи върху водозадържащата способност (W,% w/w) при потенциали **pF4.2) (WP)**

дълбочина		Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0-5	10.1b	T0	10.5c	пшеница	10.4b	април	10.4b	2021	10.3a
15-20	10.6c	T1	10.3b	царевица	10.2a	октомври	10.2a	2022	10.3a
35-40	10.1b	T2	10.2a					2023	10.4a
60-65	9.1a								
F	70.5		10.9		2.47		14.3		0.74
p	0.0000		0.000		0.0010		0.000		0.48
0-5	9.8	трева							
15-20	11.3								

Усвояемият от растенията воден капацитет (PAWC), относителната пределна полска влагоемност (RFC), аерационният капацитет (AC) и индексът S на Декстър са основни характеристики на обемното разпределение на порите и се използват като основни индикатори за физичното качество на почвата (Reynolds et al., 2009).

Данните за PAWC в повърхностните 0–5 и 15–20 cm почвени слоеве показват, че усвояемият воден капацитет е съответно над и около оптималната стойност от 20%vol. във вариантите на полския опит (Фиг. 14а), а под трева PAWC достига 27.1% (Таблица 12а). PAWC е средно с 1%vol. по-висок в противоерозионните варианти T1 и T2 в сравнение с контролата T0. През есента, противоерозионните технологии (T1 и T2), които имат положителен ефект за намаляване на подпочвеното уплътнение, като цяло водят до по-малко вариране на PAWC в слоя 15–20 cm (Таблица 12а, Фиг. 14а).





Фиг. 14. Вариране на усвояемия воден капацитет (PAWC) (а), относителната пределна полска влагоемност (RFC) (б), аерационния капацитет AC (в), индекса S за физическо качество на почвата на Декстър (д) на дълбочини 0–5 cm и 15–20 cm при Карбонатен Чернозем, ОП Тръстеник, Русенско. Жълтите символи се отнасят за варианти с пшеница, зелените символи се отнасят за варианти с царевица.

Относителната пределна полска влагоемност (RFC) заема оптимални стойности в тесен диапазон - от 0.6 до 0.7. По-ниската RFC говори за недостиг на вода, докато високите стойности за недостатъчна аерация, необходима за нитрификационните процеси. В повърхностния 0–5 cm, както и на дълбочина под 30 cm, този показател заема в повечето случаи оптимални стойности (**Таблица 12b, Фиг. 14b**). Изключение правят вариантите с пшеница, при които се наблюдава

уплътняване и в слоя 0–5 cm. В слоя 15–20 cm преобладават високите стойности на RFC, което се обяснява с уплътняването на слоя. Под трева и в двата слоя RFC е в оптимални граници (**Таблица 12b**).

Таблица 12. Многофакторен дисперсионен анализ на PAWC (a), RFC (b) и AC (c) по дълбочина и по варианти, култура и години за слоя 0-20 cm

а) усвояем воден капацитет (PAWC, %vol.)

дълбочина		Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0-5	21.8b	T0	20.2a	пшеница	21.3a	април	20.8a	2021	21.9c
15-20	20.2a	T1	21.2b	царевица	20.7a	октомври	21.2a	2022	20.1a
35-40	20.6a	T2	21.6b					2023	20.9b
60-65	20.6a								
F	10.2		6.69		3.27		0.92		10.8
p	0.0000		0.0014		0.07		0.33		0.000
0-5 cm	27.1	трева							
15-20 cm	21.3								

б) относителна пределна полска влагоемност (RFC)

дълбочина		Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0-5	0.69b	T0	0.78b	пшеница	0.78b	април	0.75a	2021	0.79b
15-20	0.82c	T1	0.74a	царевица	0.73a	октомври	0.75a	2022	0.72a
35-40	0.70b	T2	0.74a					2023	0.75a
60-65	0.60a								
F	72.2		6.36		17.12		0.03		10.16
p	0.0000		0.002		0.000		0.86		0.000
0-5 cm	0.61	трева							
15-20 cm	0.72								

в) аерационен капацитет (AC, %vol.)

дълбочина		Повърхностни почвени слоеве (0-5 и 15 - 20 cm)							
		вариант		култура		сезон		година	
0-5	16.5b	T0	10.8a	пшеница	11.0a	април	12.5a	2021	10.3a
15-20	8.2a	T1	12.9b	царевица	13.7b	октомври	12.2a	2022	14.4c
35-40	15.1b	T2	13.5b					2023	12.5b
60-65	21.2c								
F	75.5		5.79		15.39		0.20		11.9
p	0.000		0.004		0.000		0.66		0.000
0-5 cm	23.7	трева							
15-20 cm	14.7								

Най-директният показател, показващ степента на уплътнение е аерационният капацитет АС (**Таблица 12с, Фиг. 14с**). Критичните стойности на аерационния капацитет под 10% vol., водят до липса на достатъчно кислород за развитие на растенията. Въпреки голямото вариране на този показател, ясно се разграничават двата слоя – повърхностният 0–5 cm с преобладаване на много добър, а понякога и излишно висок АС, и слоя 15–20 cm, който е с под оптималните стойности при всички варианти и култури. Голямото вариране на този показател не позволява да се разграничат статистически приложените агротехнологии, освен през октомври, когато определено противоерозионните технологии водят до подобряване на аерираността на този слой.

Според индекса S на качеството на Декстър, повърхностният 0–5 cm и подповърхностният 15–20 cm почвен слой попадат в различни категории. Повърхностният слой в 81% от измерванията през периода 2021-2023 г. е в добро качество, а в останалите 19% в много добро качество. Медианата на |S| за вариант Т0 е 0.041, за Т1 – 0.046, а за вариант Т2 – на границата с много добро качество 0.049. Коефициентите на вариране са близки – 13, 14 и 12% за трите варианта. Медианите на S за слоя 15–20 cm, характеризиращ се с подпочвено уплътняване, са 0.030, 0.035 и 0.036, съответно за Т0, Т1 и Т2, което показва лошо качество за Т0 и добро качество за Т1 и Т2, като и в този случай варирането е 10–12%. Динамиката през сезона и голямото влияние на подпочвено уплътняване върху този показател е илюстрирано на **Фиг. 14d**. През пролетта, почвеният показател S показва добро качество на почвата във всички варианти. През есента по-добре изразеното подпочвено уплътняване определя качеството според S като лошо във всички варианти с изключение на Т2, където то се запазва добро.

Коефициентът на филтрация (Kf) е основният показател, характеризиращ водопроводността на почвата. Характерното за Kf е голямото вариране при измерванията, но при осредняване за тригодишния период, ясно личат тенденциите за двойно по-високи средни стойности при притивоерозионните варианти, както при царевицата, така и при пшеницата (**Таблица 13**).

Таблица 13. Средни за периода на изследване стойности на коефициента на филтрация (Kf), измерен в лабораторни условия на проби във вариантите в ПО в опитно поле Тръстеник. Русенско. Cv – коефициент на вариация.

Вар.	Дата, култура	Дълб., cm	Kf, cm/h	Stdev, cm/h	Cv, %	клас
Т0	угар преди царевица	15–20	9.52	13.62	143.1	висока
Т1	угар преди царевица	15–20	17.96	7.99	44.5	висока
Т2	угар преди царевица	15–20	17.84	29.81	167.1	висока
Т0	пшеница	15–20	0.65	0.40	60.8	средно висока
Т1	пшеница	15–20	1.29	0.56	43.1	средно висока
Т2	пшеница	15–20	1.89	2.44	129.5	средно висока

Сравнителен анализ и взаимовръзки между изследваните структурни и хидрологични показатели

Обобщение на основните структурни и хидрологични показатели, получени при експедиционните проучвания на равнинните обекти (ОП Ковачица, Монтана и ОП Тръстеник, Плевен) и в рамките на 3-годишния полски опит при отглеждане на пшеница и царевица в ротация и прилагане на три варианта на почвообработка (Тръстеник, Русе) е представено в **Таблица 14**.

Въпреки че структурният индекс (SI, ур.6) отразява добре разликите между необработваеми и обработваеми площи, оценката според този индекс е, че дори т.н. целинни почви са деградирани. Причината за това е много високото съдържание на прах, което заедно със съдържанието на глина, според този показател, изисква много по-високо съдържание на хумус за формиране на стабилни структурни агрегати. В същото време повечето от показателите за физично качество в слоя 0–5 cm под целина показват отлично качество. Reynolds et al. (2009) препоръчват използването на комплекс от показатели за оценка на физичното качество на почвите, тъй като представителността на различните индикатори, както и класовете за тяхната оценка, може да не съвпада с оценката по други показатели. В случая, може да се твърди, че вместо SI=5, би трябвало да се използва SI=4, която да отделя деградиралите Карбонатни Черноземи от тези с висок риск от деградация.

Натрупаната база данни от полския опит позволява да се оцени и различната вариабилност и чувствителност на тези показатели. Най-големи са коефициентите на вариация (Cv) на коефициента на филтрация (**Таблица 13**) водоустойчивите агрегати WSA₁₋₃ и аерационния капацитет AC **Таблица 14**.

Приложените варианти на обработка на почвата водят до подобряване на физичните характеристики на подпочвата на T1 и T2 през изследвания 3-годишен експеримент (**Таблица 14**). А именно, средните стойности на PD и RFC относително намаляват, съответно с 3 и 6%, докато S, FC и AC относително се увеличават с 6, 4 и 77%. Освен статистическата значимост на тези относителни промени по отношение на стойностите в T0, в случай на PD те водят до промяна на квалификацията - от високо към средно ($1.4 < PD < 1.75 \text{ g cm}^{-3}$), а за S - от лошо (0.02–0.035) до средно (0.035–0.050) качество.

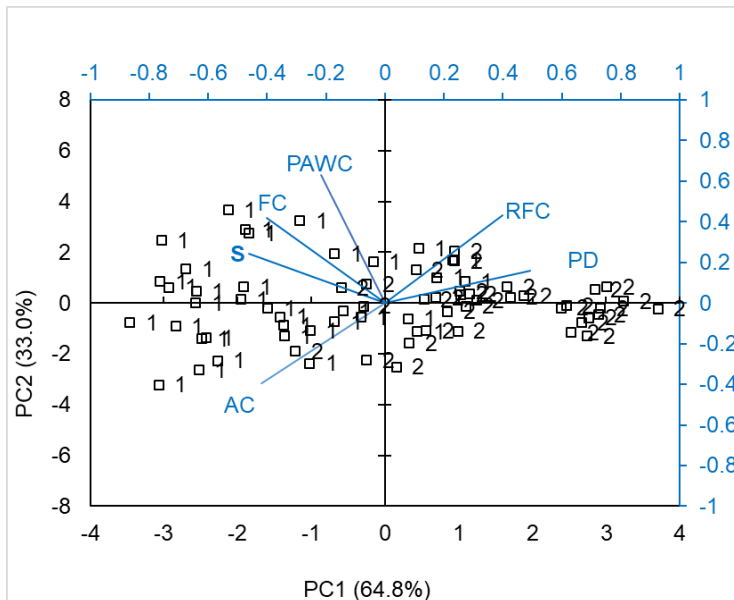
С изключение на WSA₁₋₃ и съдържанието на CaCO₃ във вариантите на ПО в Тръстеник, Русе, всички останали изследвани физични свойства се различават значително в повърхностния 0–5 и подповърхностния 15–20 cm слой (**Таблица 14**). Разликата между двата слоя (0–5 и 15–20 cm) по отношение на повечето индикатори за физично качество е съществена, както при необработваемите тревни площи, така и при обработваемите площи (**Таблица 14**).

Таблица 14. Структурни и хидрологични показатели на изследваните почви. Средни, стандартни отклонения и коефициент на вариация (Cv, %) в трите варианта на почвообработка в Тръстеник, Русе (T0, T1, T2). С различни букви (а, b или с) са означени статистически значими разлики между вариантите на полския опит в Тръстеник, Русе (P < 0.05), букви (x или y) показват статистически значима (P < 0.05) разлика между дълбочините в полския опит (n=42 за дълбочина)

Параметър	Дълб. cm	Ковачица		Тръстеник, Плевен		Тръстеник, Русе						
		целина	нива	целина	нива	целина	T0		T1		T2	
							средно	Cv, %	Средно	Cv, %	Средно	Cv, %
SI	0-5 15-20	4.7 2.9	3.3	4.7 2.5	3.0 2.3	4.0 3.4	2.6		2.7		2.8	
Db, g cm⁻³	0-5 15-20	0.99 ±0.13 1.52 ±0.02	1.19 ±0.06	1.22 ±0.01 1.55 ±0.02	1.18 ±0.05 1.54 ±0.03	1.05 ±0.02 1.33 ±0.10	1.35 ^{a,x} ±0.14 1.53 ^{b,y} ±0.14	10 9	1.31 ^{a,x} ±0.10 1.47 ^{a,y} ±0.09	8 6	1.28 ^{a,x} ±0.07 1.48 ^{a,y} ±0.11	6 7
PD, g cm⁻³	0-5 15-20	1.19 1.74	1.39	1.43 1.80	1.40 1.77	1.26 1.56	1.59 ^{a,x} ±0.13 1.76 ^{b,y} ±0.14	8 8	1.55 ^{a,x} ±0.10 1.71 ^{a,y} ±0.09	7 5	1.53 ^{a,x} ±0.07 1.71 ^{a,y} ±0.10	4 6
MWDa, mm	0-5 15-20	2.6 3.8	2.8	3.3 4.6	3.2 3.5	2.7 3.8	3.2 ^{b,x} ±0.5 3.9 ^{b,x} ±0.5	16 12	3.1 ^{ab,x} ±0.5 3.9 ^{b,x} ±0.5	15 12	2.9 ^{a,x} ±0.4 3.7 ^{a,x} ±0.3	15 8
WSA₁₋₃, w/w	0-5 15-20	47.0 ±1.6 32.6 ±3.3	22.1 ±4.2	61.9 ±1.5 31.5 ±1.7	19.6 ±0.7 14.2 ±1.4	35.6 ± 1.1 33.1 ± 3.4	20.6 ^{a,x} ±6.5 21.2 ^{a,x} ±7.4	31 35	18.8 ^{a,x} ±8.0 18.8 ^{a,x} ±5.5	43 29	20.8 ^{a,x} ±9.0 20.0 ^{a,x} ±5.1	43 25
WP, %w/w	0-5 15-20	10.1 ±0.04 9.1 ±0.05	9.5 ±0.07	14.0 ±0.23 11.8 ±0.01	11.3 ±0.04 11.5 ±0.06	9.8 ±0.03 11.3 ±0.14	10.6 ^{b,x} ±0.6 10.7 ^{a,x} ±0.5	5 6	10.2 ^{ab,x} ±0.6 10.7 ^{a,y} ±0.6	6 6	10.0 ^{a,x} ±0.2 10.5 ^{a,y} ±0.4	2 4
FC, %w/w	0-5 15-20	35.8 ±2.8 24.1 ±1.5	29.0 ±2.2	34.1 ±1.5 22.7 ±0.4	28.2 ±0.8 23.8 ±0.4	35.5 ±0.4 27.2 ±3.4	26.2 ^{a,x} ±1.7 23.0 ^{a,y} ±1.6	7 7	26.7 ^{a,x} ±2.5 24.4 ^{b,y} ±1.8	9 7	27.2 ^{a,x} ±1.9 24.0 ^{ab,y} ±1.4	7 6
PAWC, %vol.	0-5 15-20	25.1 ±0.7 22.7 ±1.9	23.1 ±2.0	24.4 ±1.6 17.0 ±0.5	19.9 ±1.0 18.9 ±0.2	27.1 ±1.0 21.3 ±5.3	20.7 ^{a,x} ±2.6 19.2 ^{a,y} ±2.0	13 10	21.6 ^{a,x} ±2.9 20.2 ^{a,y} ±1.9	13 9	22.3 ^{a,x} ±3.1 19.9 ^{a,y} ±1.6	14 8
AC, %vol.	0-5 15-20	27.6 ±6.8 7.1 ±1.1	22.1 ±2.3	13.8 ±1.0 6.4 ±0.5	23.2 ±3.0 7.3 ±1.2	23.7 ±2.0 14.7 ±9.1	12.6 ^{a,x} ±6.7 4.4 ^{a,y} ±3.4	53 78	13.0 ^{a,x} ±6.1 8.0 ^{b,y} ±4.8	47 59	13.7 ^{a,x} ±5.8 7.8 ^{ab,y} ±4.5	42 57
RFC	0-5 15-20	0.56 0.84	0.61	0.75 0.85	0.59 0.83	0.61 0.72	0.71 ^{a,x} ±0.13 0.84 ^{b,y} ±0.12	19 14	0.69 ^{a,x} ±0.10 0.79 ^{a,y} ±0.08	15 11	0.68 ^{a,x} ±0.10 0.79 ^{a,y} ±0.10	15 12
S	0-5 15-20	0.073 0.038	0.059	0.051 0.028	0.052 0.031	0.076 0.042	0.042 ^{a,x} ±0.006 0.033 ^{a,y} ±0.006	15 17	0.045 ^{a,x} ±0.006 0.036 ^{b,y} ±0.004	13 12	0.047 ^{a,x} ±0.005 0.035 ^{b,y} ±0.003	11 10

SI – структурен индекс, Db – обемна плътност, PD – степен на уплътненост, MWD – среднопретеглен диаметър на сухите агрегати, WSA₁₋₃ – съдържание на водоустойчиви агрегати в единична фракция 1–3 mm, PAWC – усвояем воден капацитет на растенията, RFC – относителна пределна полска влагоемност, S – индекс на качество на Декстър

Този извод е демонстриран и чрез проведения анализ на главните компоненти PCA по данни от полския опит в Тръстеник, Русе (**Фиг. 15**). Главните компоненти в проведения анализ са линейни комбинации от следните показатели: PD (g. cm^{-3}) – степен на уплътненост, PAWC (% vol.) – усвояем воден капацитет на растенията, RFC – относителна пределна полска влагоемност, S – индекс за качеството на почвата на Декстър, FC – пределна полска влагоемност (% w/w), AC – аерационен капацитет (% vol.). Първият главен компонент обяснява 64.8% от варирането, а вторият – 33.0%, общо двата обясняват 97.8%. По този начин се илюстрира разделянето на данните в двата слоя по отношение на първия главен компонент (PC1), който може да се нарече индикатор за уплътняване с положителни стойности за подпочвения слой означен с „2“ (15–20 cm) и отрицателни за повърхностния слой „1“ (0–5 cm). С най-високи тегла в PC1 са степента на уплътняване PD (0.492) и S (–0.463). С най-високи тегла в PC2 са усвояемия воден запас и пределната полска влагоемност.



Фиг. 15. Биplot на първите два компонента от анализ на главните компоненти, извършен върху набор от данни, включващ PD – степен на уплътненост, PAWC – усвояем воден капацитет на растенията, RFC – относителна пределна полска влагоемност, S – индекс за качеството на почвата на Декстър, FC – пределна полска влагоемност (% тегл.), AC – аерационен капацитет (%).

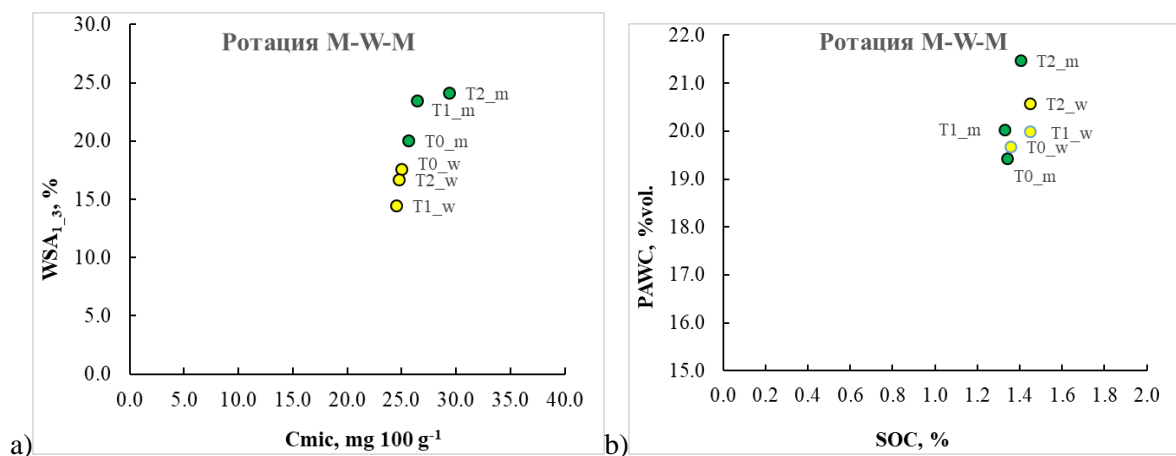
Като се вземат предвид случайните фактори, като климатичните условия през сезона и годината, фазата на отглеждането на културата, текущите и последващите ефекти от обработката на почвата и сеитбооборотите, бе направено сравнение на ефектите от обработката на почвата за реализираните два сеитбооборота (**Таблица 15**). Ефектът от минималната обработка на почвата (T2) за контрол на ерозията е по-силно изразен в ротация W-M-W, отколкото в M-W-M

по отношение на показателите PD, RFC и S. Ротацията M-W-M има по-добър ефект върху WSA₁₋₃ и PAWC за T2 поради двукратното включване на покривната култура като зелено торене преди царевичата.

Таблица 15. Влияние на ротацията и приложената обработка на почвата (T0, T1, T2) върху част от изследваните физични свойства на почвата.

Параметър	Дълб. cm	Ротация W-M-W			Ротация M-W-M		
		T0	T1	T2	T0	T1	T2
PD, g cm ⁻³	0-5	1.60 ^a	1.56 ^a	1.52 ^a	1.57 ^a	1.56 ^a	1.55 ^a
	15-20	1.81 ^b	1.72 ^{ab}	1.69 ^a	1.78 ^{ab}	1.69 ^a	1.75 ^{ab}
MWDa, mm	0-5	3.2 ^a	3.3 ^a	2.9 ^a	3.2 ^a	3.0 ^a	2.8 ^a
	15-20	3.9 ^{ab}	3.8 ^{ab}	3.6 ^a	4.0 ^b	3.9 ^{ab}	3.9 ^{ab}
WSA ₁₋₃ , %	0-5	23.1 ^a	19.4 ^a	21.3 ^a	19.0 ^a	20.6 ^a	22.2 ^a
	15-20	25.3 ^a	19.1 ^a	19.8 ^a	19.4 ^a	20.2 ^a	21.1 ^a
PAWC, %vol.	0-5	21.6 ^a	23.4 ^a	23.5 ^a	20.7 ^a	20.5 ^a	22.0 ^a
	15-20	19.7 ^{ab}	20.4 ^b	19.8 ^{ab}	18.3 ^a	19.5 ^{ab}	20.3 ^{ab}
RFC	0-5	0.73 ^a	0.73 ^a	0.69 ^a	0.69 ^a	0.66 ^a	0.69 ^a
	15-20	0.89 ^b	0.81 ^{ab}	0.75 ^a	0.83 ^{ab}	0.76 ^a	0.83 ^{ab}
S	0-5	0.042 ^a	0.048 ^{ab}	0.050 ^b	0.043 ^a	0.042 ^a	0.046 ^{ab}
	15-20	0.033 ^{ab}	0.037 ^b	0.036 ^b	0.031 ^a	0.034 ^{ab}	0.034 ^{ab}

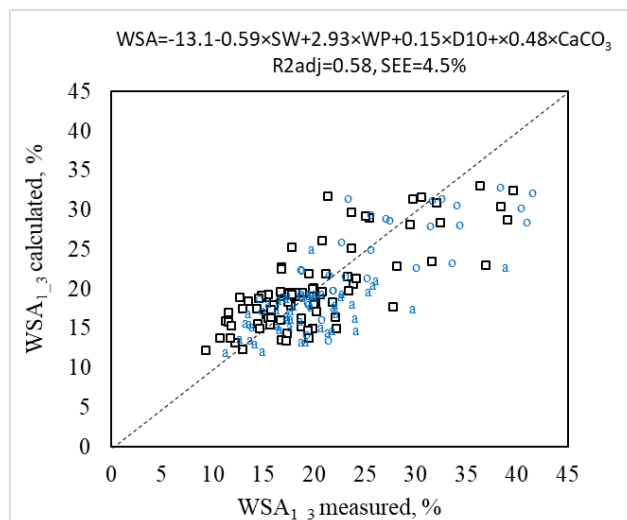
Взаимодействието между биотичните и физичните свойства е добре илюстрирано при ротацията царевича–пшеница–царевича (M–W–M) чрез две зависимости: между микробиалния въглерод и водоустойчивите агрегати WSA₁₋₃ (Фиг. 16а) и между почвения въглерод SOC и усвояемия воден капацитет на растенията PAWC (Фиг. 16б) (Kuncheva et al., 2025). Средните стойности отразяват подобряване на почвените свойства в резултат от приложените противоерозионни практики.



Фиг. 16. Зависимости между WSA₁₋₃ (съдържание на водоустойчиви агрегати във фракция 1_3 mm) и Cmic (a) и между усвояемия воден капацитет (PAWC) и

почвения органичен въглерод SOC (b) при ротация царевица–пшеница–царевица (M–W–M).

Установената множествена регресионна зависимост между водоустойчивите агрегати във фракция 1_3 mm (WSA_{1_3}) с показателите: влажност на почва (SW), влажност на завяхване (WP), съдържание на буци >10 mm (D10) и съдържание на общи карбонати ($CaCO_3$) има прогностична стойност за оценка на сезонната динамика на този показател (Фиг. 22).



Фиг. 17. Прогнозирани спрямо измерени стойности на съдържание на водоустойчиви агрегати във фракция 1_3 mm (WSA_{1_3}), с използване на множествена регресия включваща: влажност на почва (SW), влажност на завяхване (WP), съдържание на буци >10 mm (D10) и съдържание на общи карбонати ($CaCO_3$). Данни от 4 дълбочини (0–10, 10–20, 30–40, 60–70 см). о – данни, измерени през октомври, а – данни, измерени през април.

Физичните показатели, свързани с поровото пространство са взаимозависими, както се вижда от техните коефициенти на корелация и регресионните анализи (Таблицы 16 и 17, Фиг. 18).

Таблица 16. Коефициенти на корелация между показателите за плътност и водозадържане.

	Db	FC	PAWC	AC	RFC	S
Db	1					
FC	-0.668	1				
PAWC	-0.246	0.846	1			
AC	-0.890	0.266	-0.202	1		
RFC	0.884	-0.258	0.188	-0.985	1	
S	-0.813	0.904	0.677	0.490	-0.498	1

При Карбонатните Черноземи от равнинни терени не са установени зависимости между коефициента на филтрация и показатели, свързани с разпределението на порите, а със съдържанието на общи карбонати и с агрегатна фаркация $\Phi < 0.25 \text{ mm}$ във фракция $\Phi_{10-0.25}$ (Таблица 17).

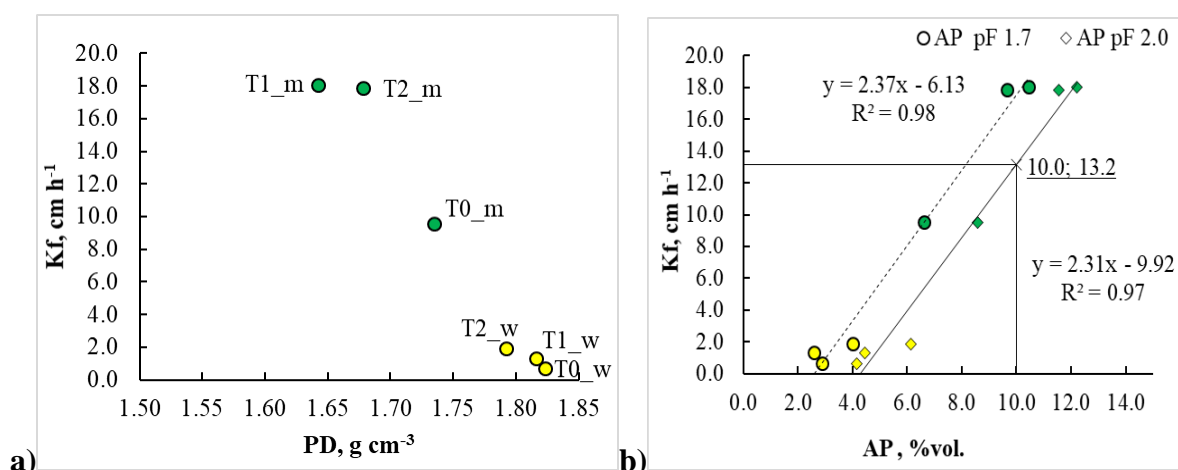
Таблица 17. Корелационни коефициенти на Kf с физични свойства, определени по хоризонти в изследваните Карбонатни Черноземи.

А) равнинни площи (с. Ковачица, обл. Монтана и с. Тръстеник, Плевен)

Db	Pt	W1.7	W2.0	W2.5	AP1.7	AP2.0	PAWC	RFC	S	Wi	CaCO ₃	$\Phi_{<0.25\text{mm}}$
0.224	-0.257	-0.276	-0.279	-0.467	-0.174	-0.171	0.009	-0.156	-0.173	-0.347	0.804	0.915

Б) склонов терен, средно ерозиран Карбонатен Чернозем, Тръстеник, Русе

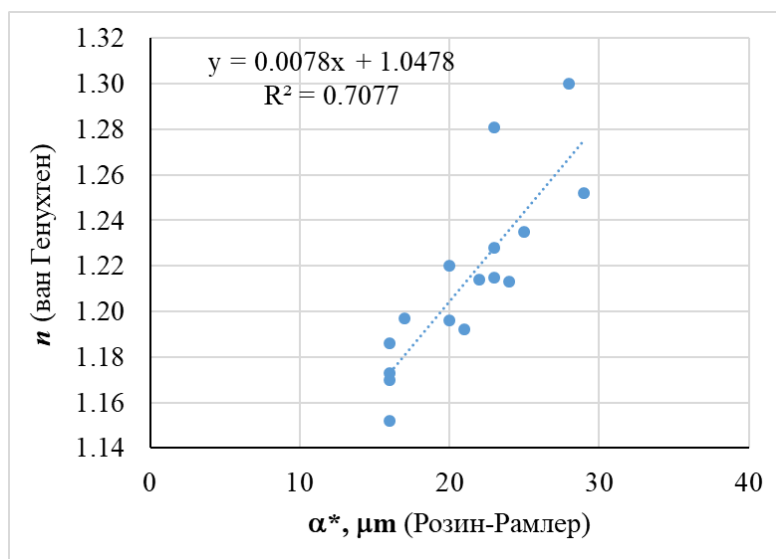
Db	Pt	W1.7	W2.0	W2.5	AP1.7	AP2.0	PAWC	RFC	S	Wi
-0.980	0.992	0.694	0.564	0.275	0.996	0.995	-0.861	-0.997	0.976	0.977



Фиг. 18. Средни стойности за коефициента на филтрация (Kf), измерена през април на 15–20 см дълбочина под пшеница и царевица. а) спрямо степента на уплътненост (PD); (б) спрямо обема на порите, запълнени с въздух, при потенциали pF 1.7 и pF 2.0 (б). Жълтите символи се отнасят за пшеница, зелените символи се отнасят за царевица.

От основните почвени свойства, механичният състав има първостепенно значение върху водозадържащата способност на почвата (Minasny и McBratney, 2018). Обикновено се търсят връзки (педотрансферни функции) между показатели на кривата на водозадържане или хидрологични параметри (FC, WP, PAWC) с текстуроопределящи фракции (глина, прах, пясък). Получените параметри от уравненията, с които са апроксимирани разпределенията на почвените частици (ур. 9, Розин–Рамлер) и на порите по размер (ур. 10, ван Генухтен) от трите обекта, бяха подложени на корелационен анализ. Най–силна корелация бе установена между параметъра α^* от ур. 9 Розин–Рамлер,

характеризиращ преобладаващия размер и параметъра на почвените частици с параметъра n от ур.10 на ван Генухтен, характеризиращ формата на водозадържащата крива и разпределението на порите по размери (**Фиг. 19**).



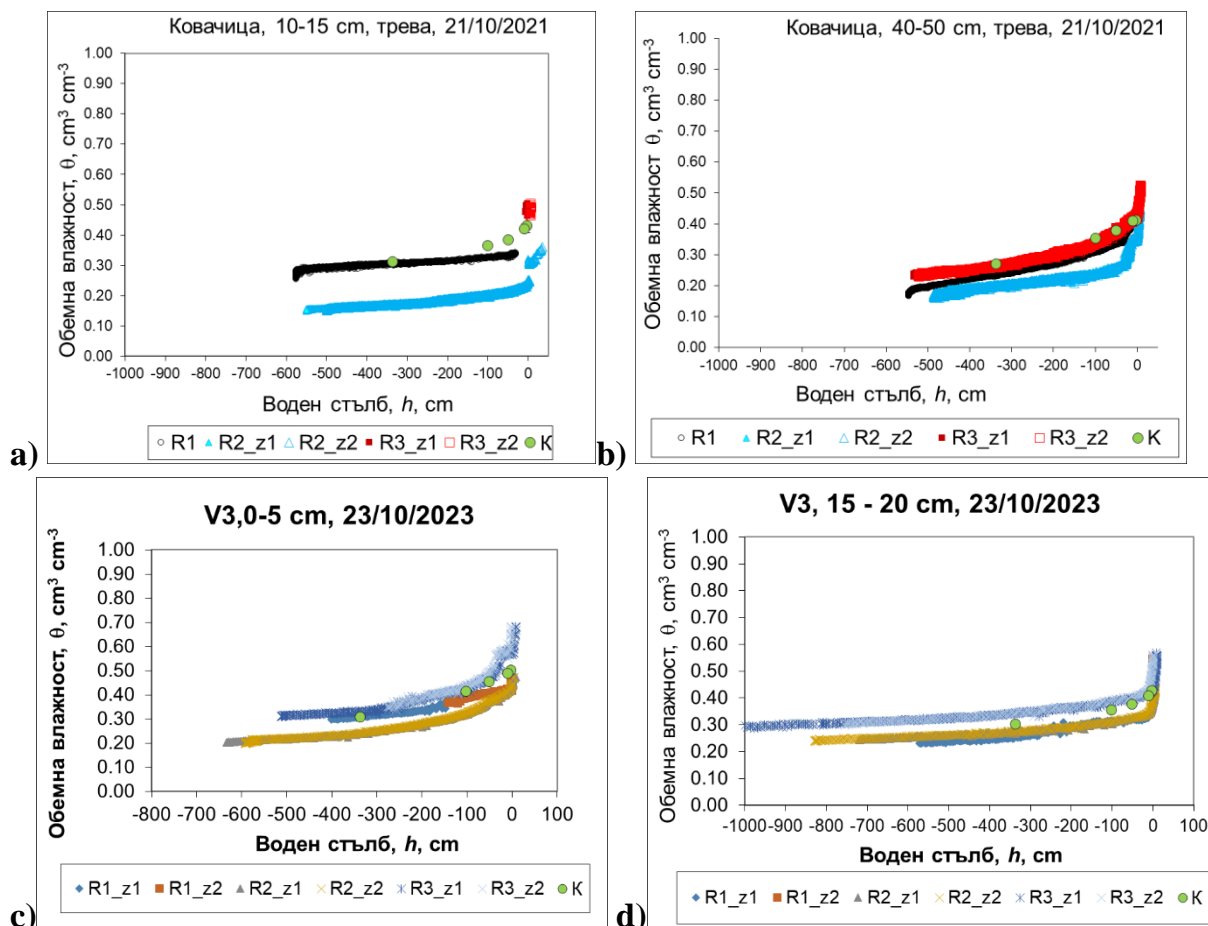
Фиг. 19. Регресионна зависимост между параметър α^* от ур. 9 Розин–Рамлер, характеризиращ преобладаващия размер на частиците (μm) и параметъра n от ур. 10 на ван Генухтен, характеризиращ разпределението на порите по размер.

Водозадържаща способност, определена по изпарителен метод

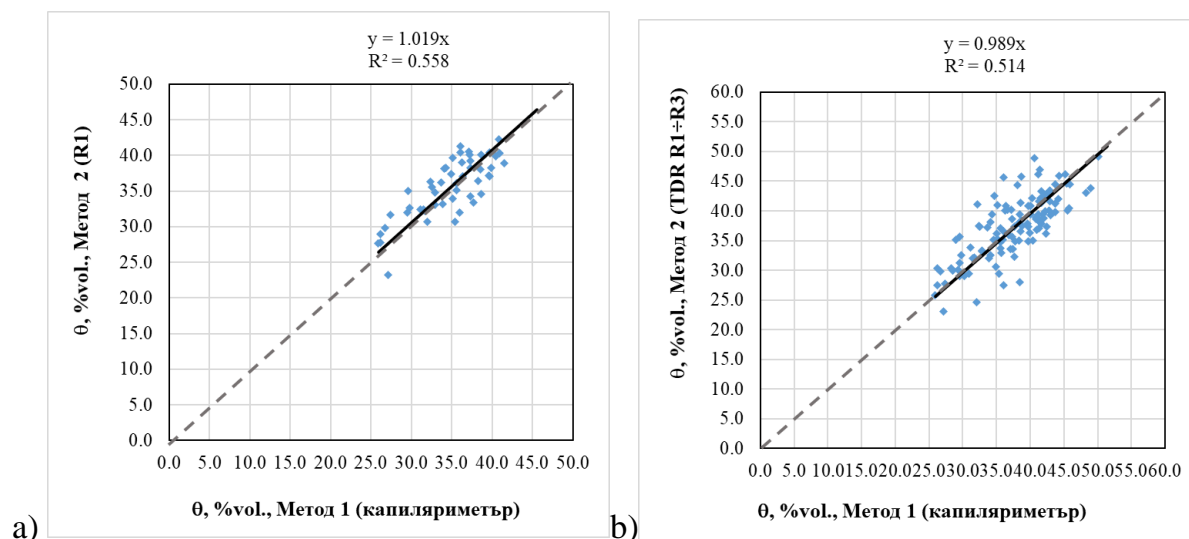
Изпарителният метод за определяне водозадържащата способност на почвите с апарат TDR/MUX/mpts е приложен на 81 проби в ненарушено състояние, взети с пръстени от 200 cm^3 , на които е измерена филтрацията. Данните са сравнени с измерените с капилариметър, свързан с висящ воден стълб и вакуумен съд. Максималното отрицателно налягане, което бе достигнато и измерено с TDR/MUX/mpts е около -1000 cm воден стълб, докато с капилариметъра се достига до -330 cm воден стълб. Реализирани са 27 серии с по 3 паралелни измервания в три пръстена за определяне водозадържащата способност в зависимост от матричния потенциал по изпарителния метод. Изследвани са два варианта на монтиране на тензиометрите в пробата: един мини тензиометър, поставен вертикално в пробата (R1) и два тензиометъра, поставени хоризонтално в пробата на две нива в две повторения (R2 и R3). На **Фиг. 20** са представени за илюстрация четири от сериите. Както се очаква, позицията на тензиометрите на двете нива в пръстените R2 и R3 не оказва влияние на вида на кривата на водозадържане, получена във всеки един от тях по този метод. Тя е една и съща за всеки пръстен, но се отмества с фронта на навлажняване във времето, което позволява изчисляването на водопроводността в зависимост от потенциала. В повечето случаи, получените данни за водозадържащата способност по

изследваните методи имат добро съвпадение, но има и случаи, в които се наблюдават отклонения и прекъсвания (Фиг. 20а). Най-често това се дължи на просъхване в горната част на пръстена в началния момент при измерването и проява на хистерезисен ефект. Прекъсванията в данните при някои от фигурите може да се дължат на преобразуването на грешки в интерпретацията на TDR сигнала.

Тъй като с капилариметъра (Метод 1) се измерва тегловната влажност на проби в пръстени от 100 cm^3 , а по Метод 2 (изпарителен с TDR) – обемната влажност на проби в пръстени от 200 cm^3 , за сравнение на методите са използвани преизчислените в обемни проценти влажности, получени от 4-те пръстена от 100 cm^3 . Сравнителният анализ е направен чрез дисперсионен анализ за потенциалите, при които има измерване и по двата метода и чрез регресии (Таблица 18, Фиг. 21).



Фиг. 20. Криви на водозадържане, получени по изпарителния метод с TDR/MUX/mpts (TDR, поотделно за всеки пръстен R и позиция на мини тензиометрите z1 и z2 и с капилариметър (K средно от 4-те повторения) с висящ воден стълб. Проби от Ковачица (a, b) и от полския опит в Тръстеник, Русе (c, d)



Фиг. 21. Зависимости между обемната влажност (θ) на почвата по изпарителния Метод 2 спрямо традиционния Метод 1 с капилариметър, при едни и същи потенциали, измерени при вертикално поставен мини тензиометър в пръстен R1 (a) и общо от всички измервания в трите пръстена, R1, R2 и R3 (b).

Таблица 18. Средни стойности и стандартни отклонения за влажността (W , % тегловни), измерена по Метод 1 и Метод 2 при потенциали pF 1.0, 1.7, 2.0 и 2.5 на всички изследвани проби. Резултати от еднофакторен дисперсионен анализ и тест за най-малка доказана разлика на средните при 95%.

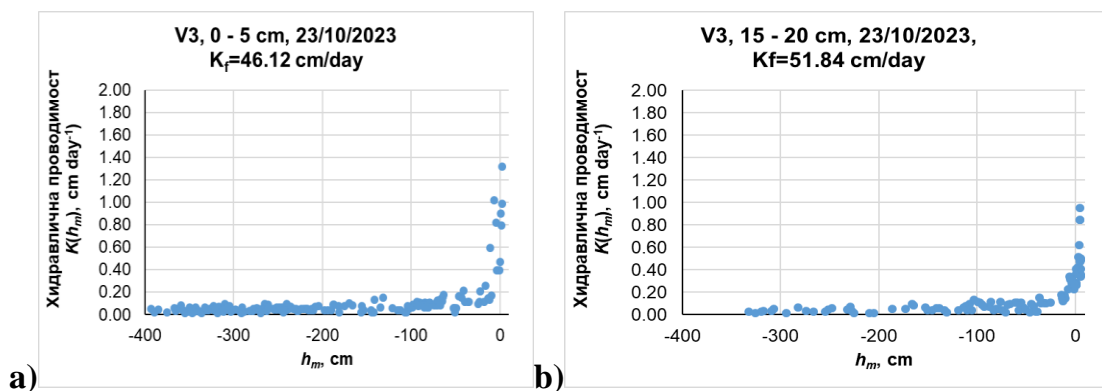
Метод	pF 0.4	pF 1.0	pF 1.7	pF 2.0	pF 2.5
1 (средно от 4 повторения)	42.4a±1.6	40.7a±2.9	38.2a±1.9	35.9a±2.2	30.0a±3.0
2 (пръстен R1)		41.3a±1.0*	38.7a±2.3	36.2a±2.2	31.4a±3.2
2 (средно R2,R3)	42.0a±3.4	41.2a±4.0	38.2a±5.1	35.3a±5.8	31.2a±6.0
2 (средно R1, R2, R3)		41.2a±3.5	38.3a±4.2	35.7a±3.9	31.5a±5.0
n – брой	14	14 (*n=3)	18	18	18
F	0.12	0.07	0.05	0.16	0.46
p	0.88	0.97	0.98	0.92	0.71

Получените резултати показват добро съвпадение в средните стойности, както се вижда от статистическия тест на средните и от наклона (a_1) на регресионните прави ($Y=a_0+a_1 \times X$), който е близо до 1 при фиксирани на свободния член да минава през началото на оста ($a_0=0$) (Фиг. 21). В същото време варирането в зависимост от позицията на тензиометрите е по-високо при хоризонтално поставяне на мини тензиометрите в сравнение с вертикално поставяне на мини тензиометъра. При хоризонтална позиция на минитензиометрите стандартното отклонение варира между $\pm 3.4\%$ и $\pm 6.0\%$, а коефициентът на детерминация е $R^2=0.35$. При вертикална позиция на мини

тензиометъра, стандартното отклонение е два пъти по-ниско ($\pm 1\%$ до $\pm 3.2\%$), а коефициентът на детерминация е значително по-висок $R^2=0.59$ (Папаркова, 2023). След като бе увеличен броя на измерените проби, коефициентът детерминация значително се подобри и при хоризонтално поставени мини тензиометри $R^2=0.51$ (Фиг. 21 b).

На пробите взети през октомври 2023 г. бе извършено измерване само с хоризонтално инсталирани тензиометри, което позволи да се усреднят от три повторения показанията за една дълбочина. Резултатите показват, че от двете дълбочини, при горна позиция на тензиометъра, корелацията между измерените по двата метода влажности е по-висока ($a_1=0.965$, $R^2=0.644$), в сравнение със случая с долна позиция на тензиометъра ($a_1=0.940$, $R^2=0.952$). Усредняването на отчетените влажности при регистриране на търсения потенциал от двата тензиометъра, поставени на двете дълбочини, показва най-добри резултати ($a_1=0.961$, $R^2=0.708$).

Изчисляването на водопроводимостта K (cm/day) в зависимост от матричния потенциал с използване на изпарителния метод е извършено по процедура описана от Masaoka и Kosugi (2018) (ур. 8). Резултатите (Фиг. 20c,d), получени за 0–5 и 15–20 cm във вариант V3, пробовземане на 23.10.2023 г., са използвани за изчисляване на K и са представени на Фиг. 22. Намалването на водопроводимостта в уплътнения слой е осезателно още при по-високи стойности на отрицателния воден напор.



Фиг. 22. Зависимости между хидравличната проводимост (K) от матричния потенциал, изразен като воден стълб (h_m).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Приложени са нови и традиционни методи и модели за определяне на показатели за основни почвени свойства, почвената структура и хидрологичните свойства на Карбонатни Черноземи от необработваеми и обработваеми площи от равнинни терени, както и при тригодишен полски опит с ротация на пшеница и царевица и три системи на почвообработка върху наклонен терен. Получените нови експериментални данни от трите опитни полета (Ковачица, обл. Монтана, Тръстеник, обл. Плевен и Тръстеник, обл. Русе) на ИПАЗР „Н. Пушкин“ за основните почвени свойства на Карбонатни Черноземи позволяват да се направи оценка за актуалното състояние на почвите по отношение на механичен състав по ISO 11277, съдържание и състав на органичен въглерод, съдържание на карбонати, рН, сорбционни свойства.

Получените резултати за основни физични показатели за качество на почвата са анализирани статистически за установяване влиянието на приложената агротехнология, отглежданата култура, сезона и дълбочината на пробовземане при полския опит с изпитване на противоерозионни агротехнологии в ОП Тръстеник, Русе. Направена е оценка на варирането и референтни стойности на структурните и хидрологичните показатели при Карбонатни Черноземи и степента на проявяване на физична деградация при равнинни терени и върху склонове, подложени на водна ерозия.

Данните показват значението на метеорологичните условия в началната и последната година от мониторинга за оценка на ефекта от почвозащитните агротехнологии. Сезонната динамика, дължаща се на промяна в покритието на културите, приложената обработка на почвата и влажностния режим на почвата, може да бъде отчетена чрез предложените подходи за анализ на данните, включващи разглеждане на последователността на културите и сезона, и приложените статистически анализи. Докато покривните култури с минимална обработка на почвата водят до намаляване на повърхностния отток и загубата на почва, ефектът им върху другите свойства на почвата е променлив. Положителните ефекти върху показателите за уплътняване на подповърхностния слой и усвояемия воден капацитет за растенията (PAWC) са по-силно изразени при царевицата. Тези ефекти са по-слабо изразени при пшеница. Резултатите показват, че не може да се регистрира стабилно подобрене на физичното качество на средно ерозиран Карбонатен Чернозем след три години прилагане на технологии за опазване на почвата от ерозия.

Получените резултати могат да служат за основа за оценка на промените на физичното качество на Карбонатните Черноземи при продължително прилагане на мерки за намаляване на подпочвеното уплътняване и ерозията върху склонови терени, които са основни деградационни процеси при тези почви. Установени са

статистически зависимости между изследваните показатели с цел оценка на факторите и ефекта от прилаганите противоерозионни технологии в полския опит върху структурата и хидрологичните свойства на средно ерозиран Карбонатен Чернозем.

Направено е сравнение между данните за водозадържащата способност, измерена с капиляриметър и чрез изпарителен метод с апарат TDR/MUX/mpts при едновременно измерване на потенциала и влажността на почвени проби, взети в ненарушено състояние. Получените резултати показват добро съвпадение в средните стойности на влажността при едни и същи потенциали. Предимствата на изпарителния метод е възможността за получаване на голям брой данни в широк диапазон от матрични потенциали, което може да се използва за по-детайлно характеризирание на разпределението на порите по размери, разграничване на матричните от структурните пори, а също и за определяне на водопроводността при ненаситено състояние при ниски потенциали.

Основните изводи от проведеното изследване са:

1. Получени са нови експериментални данни за механичния състав на изследваните почви, определен по ISO 11277:2020. Характерното за Карбонатните Черноземи преобладаване (60–70%) на праховата фракция (0.063–0.002 mm) и слабо олекотяване на механичния състав в дълбочина се проявява и в изследваните обекти. Вертикалното вариране (C_v) на праха е от 1 до 3%, докато хоризонталното, изследвано във вариантите на полския опит в ОП Тръстеник, Русе, е 6–7%. Съдържанието на глина (частици <0.002 mm) е между 22 и 27%. Параметризирано е уравнението на Розин-Рамлер, с което е моделирано разпределението на почвените частици по размери.

2. Получени са актуални данни за съдържанието и състава на органичния въглерод, физикохимичните свойства и съдържанието на карбонати в изследваните обекти. Под трева в повърхностния 0–5 cm съдържанието на органичен въглерод (SOC) е високо (2–2.5%), след което при равнинните обекти рязко намалява в слоя 10–20 cm до 1.3–1.38% и по-слабо намалява в Тръстеник, Русе – до 1.7%. В обработваемите площи в трите обекта SOC варира между 1.4 и 1.6%. Прилагането на минимални противоерозионни технологии (T2) се проявява положително при ротация царевица-пшеница-царевица, където средно за тригодишния период SOC е 1.47% в слоя 0–20 cm, спрямо 1.37% в T1 и 1.33% в контролата T0.

3. Проследена е сезонната динамика в съдържанието на карбонати в ОП Тръстеник, Русе, и е установено, че вариантът с минимални обработки и използване на зелено торене (T2) е с най-високо съдържание на карбонати през пролетта. Това се обяснява с по-голямото количество органичен материал, който се внася и създава по-добри условия за разтваряне на иначе слабо разтворимите

карбонати. Разликите между пролетните и есенни стойности на съдържанието на карбонати достига 3% във Т2 и 2% в Т1.

4. В повърхностните хоризонти и на трите обекта преобладават (над 60%) агрономически ценните агрегати с размери 10–0.25 mm. Водоустойчивостта на почвените макроагрегати е много добра в повърхностния 0–5 cm слой под тревна растителност в Тръстеник, Плевенско, и Ковачица, където съдържанието на WSA1-3 е съответно 62% и 47%, и значително по-ниско в Тръстеник, Русенско (33%). В обработваемите площи водоустойчивостта е ниска, като WSA1-3 варира от 19% до 22%. При есенните пробовземания от вариантите в ПО в Тръстеник, Русенско, водоустойчивостта на агрегатите е по-висока, като след изключително продължителното засушаване през 2023 г., се наблюдава значително повишаване на водоустойчивостта на агрегатите. В слоя под 30 cm съдържанието на водоустойчиви почвени агрегати нараства и е средно около 33%, което се дължи на по-високото съдържание на карбонати.

5. Установената множествена регресионна зависимост между водоустойчивите агрегати във фракция 1-3 mm (WSA1–3) с показателите: влажност на почва при пробовземане (SW), влажност на завяхване (WP), съдържание на буци >10 mm (D10) и съдържание на общи карбонати (CaCO₃) има прогностични стойности за оценка на сезонната динамика на този показател.

6. Степента на уплътненост (PD) на дълбочина 15–20 cm е висока (PD>1.75 g cm⁻³), както при необработваеми условия (трева), така и при обработваеми площи. Този извод се подкрепя и от ниските стойности на аерационния капацитет и високата относителна пределна полска влагоемност. По-високият среднопретеглен диаметър на почвените агрегати също показва по-буцеста структура. Влошаването на физичните показатели в слоя 10–20 cm в изследваните затревени площи подкрепя хипотезата, че в миналото те са използвани като обработваеми.

7. Получени са нови експериментални данни за водозадържащата способност на почвата в зависимост от матричния потенциал (pF криви) за изследваните обекти в Ковачица и Тръстеник, Плевен и за всяко пробовземане през тригодишния полски опит в Тръстеник, Русе. Параметризирано е уравнението на ван Генухтен, с което е моделирана кривата на водозадържане за изследваните почвени хоризонти. На базата на получените експериментални данни са определени основни хидрологични параметри (FC - пределна полска влагоемност и WP - влажност на завяхване) и показатели за физично качество, като усвояем воден капацитет (PAWC), аерационен капацитет (AC), относителна пределна полска влагоемност (RFC) и индекс S за физично качество на Декстер, представляващ наклона в инфлексната точка на pF кривата.

8. Според показателя S , повърхностният 0–5 cm слой в 81% от измерванията през периода 2021–2023 г. е в добро качество, а в останалите 19% в много добро качество. Медианата на $|S|$ за вариант T0 е 0.041, за T1 – 0.046, а за вариант T2 – на границата с много добро качество 0.049. Медианите на S за слоя 15–20 cm, характеризиращ се с подпочвено уплътняване, са 0.03, 0.035 и 0.036, съответно за T0, T1 и T2, което показва лошо качество за T0 и добро качество за T1 и T2, като и в този случай варирането е 10–12%.

9. С изключение на съдържанието на WSA_{1-3} и $CaCO_3$, всички останали изследвани физични свойства се различават значително в повърхностния 0–5 и подповърхностния 15–20 cm слой. Подпочвеното уплътняване на дълбочина под 10 cm е в резултат на образуване на т.н. „плужна пета“, предизвикано от приложените почвообработки. Анализът на главните компоненти PCA, извършен с данни от полския опит в Тръстеник, Русе, показва, че данните в двата слоя са ясно разделени по отношение на първия главен компонент (PC1), който може да се нарече индикатор за уплътняване с положителни стойности за подповърхностния слой (15–20 cm) и отрицателни за повърхностния слой (0–5 cm). С най-високи тегла в PC1 са степента на уплътняване PD (0.492) и индекса на Декстър S (-0.463). С най-високи тегла в PC2 са усвояемият воден запас и пределната полска влагоемност.

10. Приложените противоерозионни варианти на обработка на почвата (T1 и T2) в ОП Тръстеник, Русе, водят до подобряване на физичните характеристики на подповърхностния слой 15–20 cm при проведения 3-годишен опит. А именно, средните стойности на PD и RFC относително намаляват, съответно с 3 и 6%, докато S , FC и AC относително се увеличават с 6, 4 и 77%. Тези статистически значими промени спрямо контролния вариант T0, водят до промяна на оценката - от висока към средна степен на уплътненост ($1.4 < PD < 1.75 \text{ g cm}^{-3}$), а за S - от лошо (0.02–0.035) до средно (0.035–0.050) физично качество на почвата. При осредняване на коефициента на филтрация (Kf) за тригодишния период ясно личат тенденциите за двойно по-високи средни стойности при противоерозионните варианти, както при царевичата, така и при пшеницата.

11. Структурният индекс (SI) отразява добре разликите между необработваеми и обработваеми площи, но дори най-високите му стойности (SI=4.7), получени за необработваеми почви с тревна растителност, ги класифицират като деградирани. В същото време повечето от показателите за физично качество в слоя 0–5 cm при този начин на земеползване показват много добро качество. Предлага се вместо SI=5, да се използва SI=4, като гранична стойност, отделяща деградиралите Карбонатни Черноземи от тези с висок риск от деградация.

12. Установена е статистическа връзка между параметъра, характеризиращ преобладаващия размер почвени частици α^* от ур. Розин-Рамлер и параметъра n от уравнението на ван Генухтен, характеризиращ формата на кривата на водозадържане и разпределението на порите по размер.

13. Натрупаната база данни от полския опит позволява да се оцени различната вариабилност и чувствителност на изследваните физични показатели от изследвания комплекс от фактори – сезон, култура, агротехнологии. Най-големи са коефициентите на вариация (C_v) на коефициента на филтрация, водоустойчивите агрегати WSA_{1-3} и аерационния капацитет AC . Усвояемият воден капацитет е оптимален в повърхностните слоеве и показва слабо сезонно вариране. Положителният ефект от противоерозионните обработки спрямо обработката по наклона на склона, се проявява в увеличение на усвояемия воден капацитет средно с 1% vol.

14. Ефектът от минималната обработка на почвата (T_2) за контрол на ерозията е по-силно изразен по отношение на PD , RFC и S в ротацията пшеница-царевица-пшеница. Ротацията царевица-пшеница-царевица оказва по-добър ефект върху WSA_{1-3} и $PAWC$ във вариант T_2 , поради двукратното включване на покривната култура като зелено торене преди царевицата. Взаимодействието между биотичните и физичните свойства е добре илюстрирано при тази ротация чрез две зависимости: между микробиалния въглерод и водоустойчивите агрегати WSA_{1-3} и между почвения въглерод SOC и усвояемия воден капацитет $PAWC$.

15. Получени и сравнени са криви на водозадържане в зависимост от матричния потенциал по два метода – изпарителен с апарат $TDR/MUX/mpts$ и с капилариметър. Направен е анализ на ефекта от позицията и положението на мини тензиометрите, определящи потенциала на водата в почвата. Варирането на измерванията е сравнително по-високо при хоризонтална позиция на мини тензиометрите в сравнение с вертикално поставяне на един мини тензиометър.

16. Въз основа на получените данни за водозадържането на две нива на ненарушени почвени образци, определено по изпарителния метод, е изчислена водопроводимостта K (cm/day) в зависимост от матричния потенциал по процедура описана от Masaoka и Kosugi (2018).

ПРИНОСИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Получена е комплексна база от нови експериментални данни за основни почвени свойства и показатели на почвената структура и хидрологичните свойства на Карбонатни Черноземи при различни условия на земеползване, ландшафт и традиционни и почвозащитни агротехнологии.

2. Направена е оценка на варирането и са определени референтни стойности на структурните и хидрологични показатели при Карбонатни Черноземи и степента на проявяване на физична деградация при различни условия на земеползване, ландшафт и традиционни и почвозащитни агротехнологии.

3. Разработен е методичен подход за оценка на въздействието на почвозащитни технологии върху индикатори на физичното качество на Карбонатен Чернозем при провеждане на полски опит с ротация на пшеница и царевица, който включва избор на показатели, статистически анализи и критерии.

4. Установени са взаимовръзките между изследваните показатели с цел оценка на факторите и ефекта от прилаганите противоерозионни технологии в полски опит върху структурните и хидрологичните свойства на средно ерозиран Карбонатен Чернозем.

5. Предложена е нова по-ниска гранична стойност на структурния индекс (SI), която да отделя деградиралите Карбонатни Черноземи от тези с висок риск от деградация на базата на анализ на комплекс от индикатори за физично качество.

6. За първи път в страната е тестван и приложен изпарителен метод с апарат TDR/MUX/mpts за едновременно измерване на потенциала и влажността на почвата за определянето на водозадържащата способност и водопроводността на Карбонатни Черноземи при ниски стойности на матричния потенциал в ненаситена почва.

СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Папаркова, Ц.** 2023. Приложение на изпарителен метод за определяне на водозадържащата способност на почвата. "Почвознание, агрохимия и екология" Том 57, No 2, стр. 3–11
2. **Kuncheva, G., M. Kercheva, G. Petkova, J. Perfanova, Ts. Paparkova, V. Kolchakov, G. Ginchev, L. Tribis, K. Doneva, M. Mitova.** 2025. Sensitivity and sustainability of soil quality indicators of Epicalcic Chernozem under soil erosion control technologies, *Geoderma Regional*, e00976, ISSN 2352–0094, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00976>, Q1, IF=3.1