



АГРАРЕН УНИВЕРСИТЕТ – ПЛОВДИВ
ФАКУЛТЕТ „РАСТИТЕЛНА ЗАЩИТА И АГРОЕКОЛОГИЯ”
Катедра „Микробиология и екологични биотехнологии”

ДЕСИСЛАВА ГОСПОДИНОВА АНГЕЛОВА

**Оползотворяване на утайки от пречиствателни
станции за отпадъчни води чрез компостиране и
вермикомпостиране**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертационен труд за присъждане на образователната и научна
степен „Доктор”**

Професионално направление 4.4. Науки за Земята
Научна специалност „Екология и опазване на екосистемите“

Научен Ръководител:
Доц. д-р Стефан Шилев

Пловдив, 2021 г.

Дисертационният труд е написан на 273 страници и съдържа 38 таблици и 97 фигури. Литературният указател включва 481 източника, от които 9 на кирилица и 472 на латиница

Трудът е обсъден и насочен за защита от разширен Катедрен съвет на катедра “Микробиология и екологични биотехнологии”, факултет по „Растителна защита и агроекология“, Аграрен университет – Пловдив, проведен на 28.09.2021 г.

Номерацията на разделите, фигурите и таблиците не съответства на тази в дисертацията.

Специализираното научно жури:

Вътрешни членове:

Проф. д-р Виолина Ризова

Доц. д-р Екатерина Вълчева

Външни членове:

Доц. д-р Дилян Георгиев

Доц. д-р Гана Гечева

Доц. д-р Ивелин Моллов

Защитата на дисертацията ще се състои на2021 г. отч. в зала №, на Аграрен Университет – Пловдив. Материалите във връзка със защитата са на разположение на сайта на АУ-Пловдив.

Съдържание	3
I. Въведение	4
II. Цел и задачи на дисертационния труд	5
III. Методи и материали	5
3.1.Опитна постановка	5
3.2.Използвани материали за залагане на опитите	6
3.2.Технология на компостиране	6
3.4.Избор на метод за вермикомпостиране	7
3.5.Изпитване влиянието на компост и вермикомпост върху опитни растения	8
3.6.Методи за математическа и статистическа обработка на данните	9
IV. Резултати и обсъждане	9
4.1.Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ и биоразградими отпадъци от селското стопанство	9
4.2.Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ и градски биоразградими отпадъци от паркове и градини	14
4.3.Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ при комбиниран подход	19
4.4.Биотестови опити с компости и вермикомпости при контролирани условия	27
4.5.Приложение на получените компости и вермикомпости при отглеждане на домати и пипер в полски условия	32
4.6.Анализ на съответствието на качеството на компостите и вермикомпостите с изискванията на Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.	42
4.7. Приложение на разработената технология за рециклиране на утайките в ПСОВ-Хисаря, ПСОВ-Сопот и ПСОВ-Карлово	44
V. Заключение	45
5.1. Изводи	46
5.2. Приноси	47
5.3. Списък на публикациите по темата на дисертацията	48

I. ВЪВЕДЕНИЕ

Процесът на пречистване на битовите отпадъчни води е свързан с формиране на утайки, резултат от биологичното стъпало на градските ПСОВ. Те са хетерогенна маса, чиито компоненти варират значително в зависимост от използвана технология, степента на пречистване, начините на стабилизация и др. Днес, голяма част от проектираните ПСОВ в България не отразяват проблема наречен утайка и задълженията им произтичащи от йерархията на отпадъците в българското и европейското законодателство. Приема се, че този отпадък е непотребен и следователно трябва да се обезвреди чрез депониране. Образованите в България неопасни утайки от 45 бр. ВиК оператори и 13 бр. локални пречиствателни станции за отпадъчни води през 2018 е 53082,62 t/СВ, от които 4 810 t са генерирани в област Пловдив (НПУО 2021-2028). На национално ниво, 56% от утайките са употребени в земеделието, 11% са използвани за рекултивация на нарушени терени, 7% са депонирани, 20% са временно съхранени, а само 6% са компостираны.

Оползотворяването на утайките от ПСОВ в земеделието може да крие рискове за околната среда. Веднъж внесени, металите се натрупват в почвата или се инфилтрират в дълбочина и могат да предизвикат и замърсяване на повърхностните и подземните водни тела. От друга страна, утайките от ПСОВ са богати на органични вещества, микро- и макроеlementи, които биха могли да са от полза в земеделското производство. Високото съдържание на органична материя в утайките може да подобри физикохимичните свойства на почвата, като способност за задържане на вода, структура, биологичните й свойства и др.

Поемайки по пътя на оползотворяването, утайките трябва да бъдат третираны по начин, който да ги превърне в продукт, подходящ за използване в земеделието. Такъв процес на рециклиране, при който органичните вещества от утайките и другите биоразградими компоненти се използват за първоначалните им цели, е компостирането. То е познато от древността, но в последното десетилетие е по-детайлно проучен.

У нас не е реализирано задълбочено проучване на възможностите за оползотворяване на утайките в земеделието след компостиране. Потенциалът ни за третиране на утайките на мястото им на образуване е голям поради факта, че има значителен брой малки ПСОВ, не са необходими съществени инвестиции, а крайният резултат е продукт подходящ за използване в земеделието, за озеленяване и други.

II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Направеният анализ на състоянието на проблема определи основната **цел** на дисертацията:

Оптимизиране на оползотворяването на утайки от градски пречиствателни станции за отпадъчни води чрез компостиране и вермикомпостиране и превръщането им в продукт полезен за селското стопанство и околната среда.

За постигане на така формулираната цел се поставиха следните конкретни **задачи**:

1. Извеждане на съвместно компостиране и вермикомпостиране на утайки от ПСОВ с други биоразградими отпадъци от селското стопанство и от парковете и градините на населените места.

2. Изследване наличието или отсъствието на фитотоксичност на получените компости и вермикопости по отношение на семената на някои растения.

3. Прочуване възможностите за приложение на получените компости и вермикопости при отглеждане на домати и пипер.

4. Анализ на съответствието на качеството на компостите и вермикопостите с изискванията на Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци.

III. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

3.1. *Опитна постановка*

Настоящият дисертационен труд има практическа насоченост, породена от необходимостта да се оптимизират, да се подобрят процесите на рециклиране на един устойчив и упорит отпадък, какъвто е утайката образувана от биологичното стъпало при пречистването на отпадъчните води в ПСОВ (код 19 08 05, Наредба 2 за класификация). Факт е, че рециклирането (R3) на този отпадък е недостатъчно в нашата страна.

Първоначално се извърши компостиране на утайките от ПСОВ заедно с избрани различни биоразградими отпадъци. Полученият компост беше вермикомпостиран със земни червеи. Получените крайни продукти от двата процеса (компост и вермикомпост) бяха изпитани по отношение на изискванията на Наредбата ат 2017 г., липса или наличие на фитотоксичност и приложение при зеленчукови култури. В края на изследването се извърши анализ на съответствието на получените резултати с изискванията на нормативната уредба (*фиг. 1*).



Фигура 1 Схема на последователността на изследванията в дисертационния труд

3.2. Използвани материали за залагане на опитите

Компостирането и вермикомпостирането бяха изведени върху бетонна площадка, на територията на обекта „База за производство на биотор“, община Марица, област Пловдив. За получаване на компост се заложиха смеси в различни съотношения на утайки от ПСОВ, оборски тор, слама, дървесен чипс, окосена трева и сухи листа. Използваните за целите на експеримента утайки бяха от ПСОВ – Пловдив. Оборският тор и останалите биоразградими материали (слама, дървесния чипс, окосената трева и сухи листа) бяха доставени от местни фермери и ОП „Градини и паркове“ гр. Пловдив. Всички входящи материали бяха се анализираха преди началото на опитите.

3.3. Технология на компостиране

Избраният за целта на експеримента метод беше компостиране на купове (откоси). Биоразградимите отпадъци в съответните съотношения бяха размесени и оформени на компостни купове (фиг. 2). Дизайнът на куповете беше с височина 1,50-1,70 m и ширина 2 m, а дължината беше различна при различните опити в зависимост от количеството използваните биоразградими отпадъци. Аерацията се осъществяваше посредством механично преобръщане, при което постепенно материала от центъра се изваждаше на повърхността и обратното. Разбъркването се провеждаше ежеседмично чрез използването на челен товарач. Влагата беше мониторирана ежедневно и поддържана между 50-60%.

Извършиха се три експеримента, при които утайките се смесваха с различни биоразградими отпадъци: i) от селското стопанство; ii) от градските озеленителни дейности; iii) комбиниран подход. Първият опит

се заложи с биоразградими отпадъци от земеделието (оборски тор и слама). Оформиха се пет варианта с различно съотношение на утайка и оборска тор (80:20, 60:40, 40:60, 100:0, 0:100), а сламата се използваше за прецизиране на концентрацията на С. Общото количество на използвания материал за този опит беше 14,2 t утайка, 13,2 t оборска тор и 9,2 t слама, а съотношението между тях се прецизира така, че С:N=27,21-27,75.



Фигура 2 Залагане и разбъркване на компостни купове при различните опити

Вторият опит се заложи с утайки и биоразградими отпадъци от градските озеленителни дейности (окосена трева и дървесен чипс). Бяха оформени два варианта: утайка и дървесен чипс (В-1) и утайка, дървесен чипс, окосена трева (В-2). Общото количество използван материал за опита беше: 4,9 t утайка, 3,6 t дървесен чипс и 1 t трева, а съотношението С:N беше 26,32 и 26,64, съответно.

При третият опит използвахме комбиниран подход при избор на биоразградими отпадъци. Оформиха се два варианта: утайка (4 t), листа (3 t) и чипс (1,5 t, С:N=26,40) и утайка (5 t), слама (1,7 t) и чипс (2,7 t, С:N=26,25). Поради относително сухите входящи материали по време на залагането се наложи добавяне на вода с цел осигуряване на оптимална влага за протичане на биодеградиационните процеси. Процеса на компостиране продължи 18-19 седмици.

3.4. Избор на метод за вермикомпостиране

Използвана беше смесена популация от видовете *Eisenia fetida* (Sav.) и *Lumbricus rubelus* (Hoff.), тъй като те имат различна толерантност по отношение параметрите на средата и хетерогенността на утайката от ПСОВ. За обезпечаване на експеримента бяха използвани общо 10 m² червей, като всеки 1 m² съдържаше между 30-40000 индивида.

Вермикомпостирането беше заложено съобразно технологията на реакторите за една партида в реактори тип „легло“ и такива тип „компостер“ (фиг. 3).

Материала от опит №1 беше прехвърлен за вермикомпостиране на 30.10.2015 г., а този от опит №2 на 15.12.2015 г. При двата опита бяха използвани реактори тип „легла“. Те бяха снабдени с дренаж и изработени от полупропусклива материя. Всяко едно от „леглата“ беше с размери: дължина 3,50 m., ширина 0,60 m, дълбочина 0,50 m. Към всяко бяха добавени по 1 m³ компостиран материал от съответния вариант и по 1 m² смесена популация от видовете *E. fetida* (Sav.) и *L. rubellus* (Hoffm).

Опит №3 беше прехвърлен за вермикомпостиране на 01.07.2016 г. При този опит, с цел на осигуряване на по-добра аерация и дрениране на излишната вода, бяха използвани дървени компостери с размери от 1 m² (100 x 100 cm), като към всеки се добавиха по 0,5 m³ компост от съответната партида с височина на слоя от около 50 cm. Във всеки компостер бяха добавени по 0,5 m² смесена популация от видовете *E. fetida* (Sav.) и *L. rubellus* (Hoffm). Осигуряването на адекватна аерация за протичане на вермикомпостирането беше осъществено чрез ежеседмично механично преобръщане, осъществявано ръчно с вила. Поддържането на адекватна влага от около 70-75% се осъществи чрез напояване и засенчване.



Фигура 3 Вермикомпостиране при различните опити

3.5. Изпитване влиянието на компост и вермикомпост при опитни растения

Основната цел на проведените биотестове беше оценяване влиянието на получените компости и вермикомпости върху покълването на семената, растежа и развитието на избраните видове. Лабораторните опити за изследване на кълняемостта се проведеха със семена от кресон

(*Lepidium sativum* L.), а съдовите със семена от градински грах (*Pisum sativum* L.) сорт „Метеор“.

Опитите при полски условия се проведоха със зеленчуковите култури от разсад домати (*Solanum lycopersicum* L.) сорт „Миляна“ и пипер (*Capsicum annuum* L.) сорт „Куртовска капия“. Биотестовите бяха заложен в две концентрации, съответно 25% и 50% компост или вермикомпост (v/v).

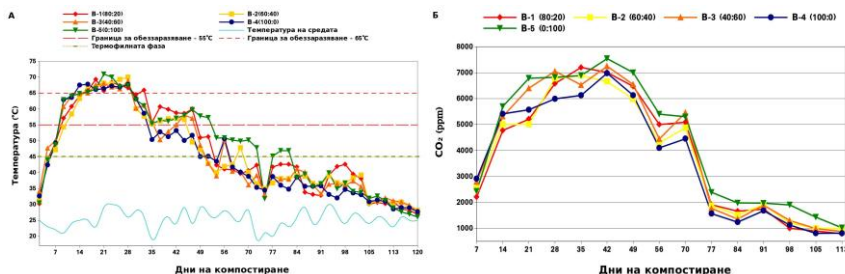
3.6. Методи за математическа и статистическа обработка на данните

Всички получени резултати са обработени посредством open-source софтуер за Linux – libreOffice calc и libreOffice math версия 6.3.0.4. Диаграмите са изобразени посредством GnuMetric версия 1.12.35. Всички използвани изображения са обработени посредством GIMP версия 2.10.12. За обработка на данните се използва и еднофакторен дисперсионен анализ (ANOVA) със софтуер SPSS (SPSS Statistics, USA).

IV. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

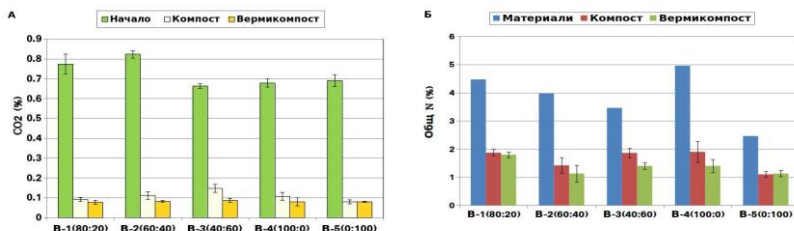
4.1. Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ и биоразградими отпадъци от селското стопанство

При настоящия опит се наблюдаваше типичната крива за процесите на компостиране. Тя се характеризираше с бързо покачване на температурата и достигане на термофилна фаза съпътствано от увеличаване на количеството на отделяния CO₂, още през първата седмица от залагане. След ден 70, стойностите на CO₂ се установиха на едно относително ниско ниво, което съответстваше на рязкото намаляване на температурата през този период (след първите 65-70) дни на процеса, в резултат от изчерпването на лесните за биоразграждане органични вещества и забавяне интензивността на процеса (фиг. 4).



Фигура 4 Изменение на температурата (А) и отделяния CO₂ in-situ (Б) от опитните купчини от вариантите на опит №1

Интензивността на отделения CO_2 при лабораторни условия, показва високи стойност по време на процеса компостиране при всички варианти. С напредване на процеса (след 120 дни компостиране) отделянето на CO_2 намаля значително, като най-ниски стойности бяха измерени при готовия вермикомпост. Интересно е да се отбележи, че количеството на отделения CO_2 от крайния продукт компост изразено като процент от отделеното количество в началото на процеса, се увеличаваше с увеличаване на количеството на оборския тор добавен към утайката от ПСОВ. Обратна зависимост се наблюдаваше при вермикомпоста спрямо компоста. По-съществено намаление на отделения CO_2 има при вариантите с по-голямо начално съотношение утайка: оборски тор, съответно по-високи начални стойности на CO_2 (Фиг. 5А). По време на вермикомпостирането, участието на двата вида земни червеи *Eisenia fetida* (Sav.) и *Lumbricus rubellus* (Hoff.) благоприятстваше трансформацията на компоста и на органичните вещества в него и доведоха до редица промени, включително до стабилизиране на органичната материя, както и до редуциране на съотношението C/N, което е един от основните индикатори за намаляване на биологичната активност и за зрялост на компоста. В резултат на вермикомпостирането, практически имаше изравняване на количеството отделен CO_2 в края на етапа.

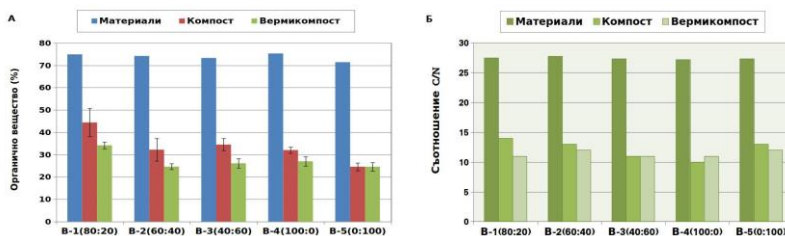


Фигура 5 Количество отделен CO_2 измерен по метода на „затворените съдове“ (А) и количество общ азот (Б) при вариантите на опит №1

След 120 дни компостиране при всички варианти се забелязваше многократното намаляване на концентрацията на азот спрямо началното състояние, изчислено на база входящите суровини. Тази тенденция се запази със забавени темпове и по време на вермикомпостирането, като установените стойности в проценти бяха пропорционални на получените при компоста (фиг. 5Б). Загубата на азот зависеше, до голяма степен, от добавяните въглеродни материали и съотношението C/N. Тя беше по-голяма при вариантите заложили с по-богати на азот материали (утайките

от ПСОВ) и продължи, както по време на компостирането, така и по време на вермикомпостирането. При тези варианти процесът беше по-продължителен, а стабилизация на материята, значително по-бавна. Вариантът без утайки В-5 (0:100), при който имаше най-малък процент азот при залагането, постигна най-бързо стабилизация, като количеството общ азот установено при компоста и вермикомпоста от този вариант беше сходно.

В същото време концентрацията на органично вещество също показва низходяща градация, която е естествен резултат от биоразграждането (фиг. 6А). Първоначалната по-незначителна загуба при вариантите съдържащи утайка от ПСОВ и с добавена по-голямо количество слама, може да се отнесе към присъствието на по-голям процент стабилни органични компоненти. При процеса на вермикомпостиране със забавени темпове продължаваха процесите на редукция. Най-ниско съдържание на органично вещество и на азот, както при компоста, така и при вермикомпоста беше отчетено при вариант 5 (0:100). Това беше вариантът, при който бяха наблюдавани най-високите температури и най-голяма концентрация на отделен CO_2 в резултат на относително по-високата микробиологична активност при този вариант и липсата на утайки. Крайните резултати, както при компостите, така и при вермикомпостите от всички варианти на опит № 1 по показателя органично вещество отговарят на изискванията за качество на компоста (15-50 %) от Наредбата за разделно събиране на биоотпадъците и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017.

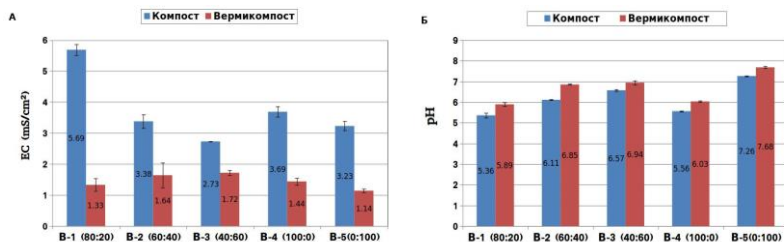


Фигура 6 Органично вещество (А) и съотношение C/N (Б) при вариантите на опит № 1

Загубата на въглерод беше по-голяма от тази на азот, поради което във всички варианти съотношението C/N намаляваше (фиг. 6Б). При крайните продукти, компост вермикомпост бяха наблюдавани стойности на C/N под 15, което е признак за зрялост. Интерес представлява фактът, че във вариантите с утайка и тор, с увеличаването на съдържанието на тора се наблюдаваше намаляване на съотношението C/N. Тъй като

процесите на хумификация при компоста, във вариантите от 1 до 4, са в напреднала фаза, вермикомпостирането не оказва съществен ефект, а намаляването на съотношението е в обратен ред, от вариант 4 към 1.

Електропроводимостта при вариантите на опита намаляваше с течение на времето и при двата процеса (фиг. 7А). Крайните стойности при всички вермикомпости отговориха на изискванията за стабилности на компоста по отношение на граничните стойности при използване в частното градинарство и за растежни почвени среди в съответствие с *Наредбата от 2017 г.* ($\leq 3 \text{ mS.cm}^{-2}$). В допълнение, реакцията на средата на използваната утайка в началото на процеса се установи на 6,98, т.е. неутрална. След 120 дни компостиране, петте варианта имаха сравнително разнообразни стойности (фиг. 7Б), но най-ниски бяха при вариантите с най-висока концентрация на утайка [(В-1 (80:20) и В-4 (100:0)], което е признак за все още незавършен процес на биодеградация.

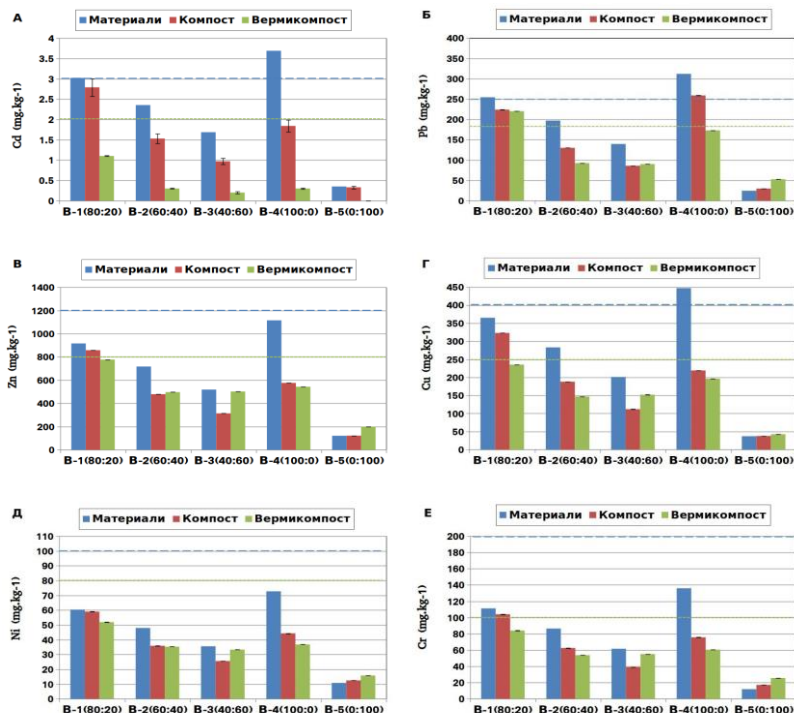


Фигура 7 Електропроводимост (А) и рН (Б) при вариантите на опит № 1

По време на прилагане на тази технология за третиране на биоразградимите отпадъци настъпиха редица промени свързани с концентрацията на изследваните тежки метали в крайните продукти на процесите – компост и вермикомпост (Фиг. 8). При компостите на опит №1 се наблюдава значително намаляване на концентрацията на повечето тежки метали. Това беше най-вече резултат от добавянето на обемни биоразградими материали (слама) с цел регулиране на C/N съотношението в началото на процеса. По този начин значително се увеличи обема на компостните купове, а очакваната начална концентрацията на тежки метали беше съществено редуцирана. Концентрацията на добавена слама беше 26,5% при вариант В-1 (80:20), 23,5% при вариант В-2 (60:40), 18,5% при вариант В-3 (40:60), 30% при вариант В-4 (100:0) и 11,5% при вариант В-5 (0:100).

От друга страна, увеличението на съдържанието на някои тежки метали (Ni, Cr, Pb, Zn и Cu), каквото се наблюдаваше при компоста на В-5 (0:100), можем да отнесем към намаляването на първоначалния обем,

вследствие на интензивната микробиална дейност, водеща до съществена минерализация на органичните фракции и респективно значителни загуби на С под формата на CO_2 .



Фигура 8 Съдържание на Cd (А), Pb (Б), Zn (В), Cu (Г), Ni (Д) и Cr (Е) в материалите, компоста и вермикомпоста за вариантите на опит №1

Наблюдаваните резултати на намаляване на концентрацията на тежките метали след етапа вермикомпостиране могат да се обяснят със способността на земните червеи да акумулират някои метали в своите тъкани. В допълнение, редукцията в концентрацията на тежки метали можем да отнесем към изтичането на инфилтрат от използваните компостери тип “легла” по време на вермикомпостирането, вследствие на валежите и напояването. При някои от вариантите (В-2, В-3, В-5) се наблюдаваше увеличение на концентрацията на тежки метали в готовия вермикомпост. Това са вариантите с относително по-малък или никакъв процент утайка, по-малко количество добавена слама и с най-голямо намаляване на обема, както при компоста, така и при вермикомпоста, в

резултат на активната биодеградация. В този смисъл можем да заключим, че определено количество оборска тор стимулира развитието на МО имащи отношение към биодеградацията на органичната материя при компостиране и вермикомпостиране на утайки от ПСОВ.

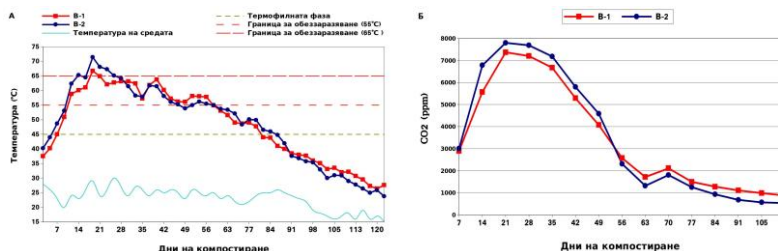
Крайните резултати от анализа на съдържанието на метали в компостите и вермикомпостите при всички варианти показват намаляване на количеството, от една страна поради добавянето на голямо количество биоразградими материали (слама) с ниски концентрации на метали, а от друга възможната акумулация от използваните за вермикомпостиране видове *E. fetida* и *L. rubelus*. Вермикомпостите от В-2 (60:40), В-3 (40:60), В-4 (100:0) В-5 (0:100) отговарят на изискванията за продукт „компост“ по отношение на съдържанието на Cd, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn, съгласно наредбата *Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.* Съдържанието на олово при В-1 (80:20) надхвърли граничните стойности заложили в *Наредбата* за продукт „компост“ от 180 mg.kg^{-1} но „покри“ изискванията за продукт „органичен почвен подобрител“ от 250 mg.kg^{-1} .

След направените микробиологични анализи, имащи за цел установяването на наличието или отсъствието на патогенни МО в крайните компости и вермикомпости, се установи отсъствие на *Salmonella* sp. в проба от 20 g, както във вложената утайка, така и в пробите от компост и вермикомпост. От друга страна, *Escherichia coli* присъства в 0,001 g от използваната утайка, докато в компоста и вермикомпоста минималният обем, в който патогенът е открит е 1 g при всички варианти на опит №1. Третият микробиологичен показател беше присъствието на *Clostridium perfringens*. Патогенът се установи в 0,001 g, както в утайката, така и в компоста и вермикомпоста на всичките пет варианта на опита. Запазването на постоянна концентрацията на *Clostridium perfringens* вероятно се дължат на свойството на грам-положителната бактерия да образуват ендоспори, които могат да оцелеят дълго време в природата при неблагоприятни условия.

4.2. Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ и градски биоразградими отпадъци от паркове и градини

В началото на компостирането беше наблюдавано бързо покачване на температурата и количеството отделен CO_2 и при двата варианта на опита, което съответстваше на увеличаването на микробиалната активност (Фиг. 9А). Термофилната фаза беше с продължителност между 75 и 80 дни, като тя беше по-кратка при В-1. Този факт и относително по-ниските температури може да се обяснят с намалената микробиална активност поради наличието на повече утайки от ПСОВ (60% обема на купа, спрямо 45% при В-2).

Както беше наблюдавано и при някои от вариантите на опит №1, добавянето към системата на компостиране на голямо количество утайки, материал имащ свойството да абсорбира и задържа вода, е предпоставка за наличието на по-висока влажност. Резултатът беше по-кратка термофилна фаза и респективно намалената микробна активност. Пиковите стойности от 67 °C (B-1) и 72 °C (B-2) бяха достигнати между ден 18ти и ден 20ти, като с цел регулиране на температурния режим и избягване на прекалено високи температури през следващите няколко седмици беше провеждано многократно механично разбъркване (охлаждане) и на двата варианта.



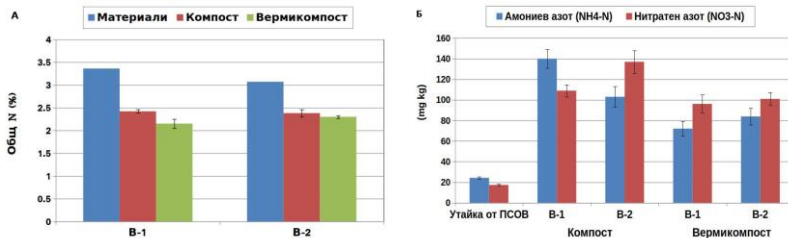
Фигура 9 Изменение на температурата (А) и динамика на отделянето на CO₂ (Б) опитните купове от вариантите на опит №2

Пикът на емитиране на CO₂ съвпаднаше с този на температурата (Фиг. 9Б). До ден 54ти по-високи нива на отделяне на CO₂ бяха констатирани при B-2, което може да се обясни с наличието на голямо количество окосена трева, сравнително по-лесен за биоразграждане материал в сравнение с дървесния чипс, явяващ се основния източник на въглерод при B-1. След изчерпване на лесните за биоразграждане целулозни материали количеството на CO₂ постепенно започна да намалява, като през втората половина на изследването отделения CO₂ от B-1 беше по-голямо.

След 120 дни на биологично третиране в двата варианта се забеляза многократното намаляване на концентрацията на общ азот, спрямо началното състояние, изчислено на база входящите суровини (Фиг.10А).

Интересно е да се отбележи, че загубата на азот при B-1, заложен с по-голям процент утайка, е по-голяма и продължава както по време на компостирането, така и по време на вермикомпостирането. При този вариант температурата и количеството отделен CO₂ са сравнително пониски и респективно стабилизацията на материята е по-бавна и

продължителна. Данните кореспондират с резултатите получени при вариантите съдържащи по-голямо количество утайки на опит №1.



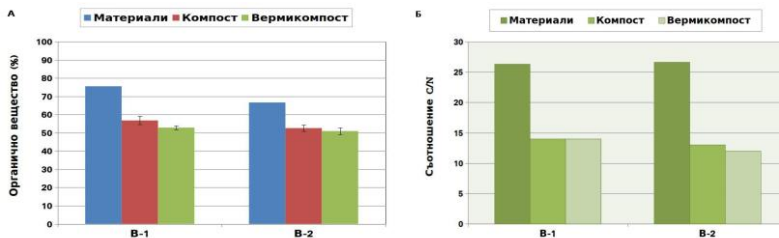
Фигура 10 Съдържание общ азот (А) и амониев и нитратен азот (Б) в опитните купове на вариантите

В резултат на протичащото аеробно биоразграждане от микрофлората и на нитрификацията, съдържанието на амониевия и на нитратния азот при двата варианта се увеличи значително (Фиг.10Б). При готовия компост от В-1 все още преобладаваше $\text{NH}_4\text{-N}$ в сравнение с $\text{NO}_3\text{-N}$, което е признак за бавен или незавършен процес на нитрификация. В крайните вермикомпости преобладаваше $\text{NO}_3\text{-N}$, като съдържанието му беше по-ниско от това при компостите, вероятно в следствие на изтичане с инфилтратата по време на вермикомпостирането.

Подобно на наблюдаваното при първия опит, резултатите при опит №2 показваха низходяща градация на съдържанието на органичното вещество при биологичното третиране, което е естествен резултат от биоразграждането (Фиг.11А). По време на компостирането стойностите намаляваха, като в края на процеса съдържанието на органично вещество беше по-високо при В-1 (56,8%), спрямо В-2 (52,6%). По време на вермикомпостирането се установи незначително намаляване на стойностите на показателя. Присъствието на значителни количества трудни за биоразграждане материали изискваха по-продължителен процес на биоразграждане, за да достигне компостиращата се маса необходимото ниво на стабилност. Дори в края на вермикомпостирането в готовия материал се наблюдаваха неразградени агрегати от дървесен чипс. Резултатите по отношение на показателят органично вещество при вермикомпостите от двата варианта на опит №2 са на границата за да отговарят на изискванията за качество според *Наредбата* (15-50 %).

Важен параметър за определяне стабилността и зрелостта на компоста и вермикомпоста е съотношението C/N. При В-1 се наблюдаваше намаление на показателя до 14:1 след 120 дни компостиране, а при В-2 крайната стойност беше 13:1. Подобно на вариантите на опит №1 и тук, по време на компостирането, загубата на С

беше по-голяма от тази на N, поради което в компостните купове C/N съотношението намаляваше (Фиг.11Б). След вермикомпостирането изчисленото съотношение при В-1 остана същото – 14:1 а при В-2 се установи на 12:1. От получените данни можем да заключим, че вермикомпостирането не влияе съществено на редуцирането на съотношението C/N, особено когато системата на компостиране включва голям процент трудни за биоразграждане материали.



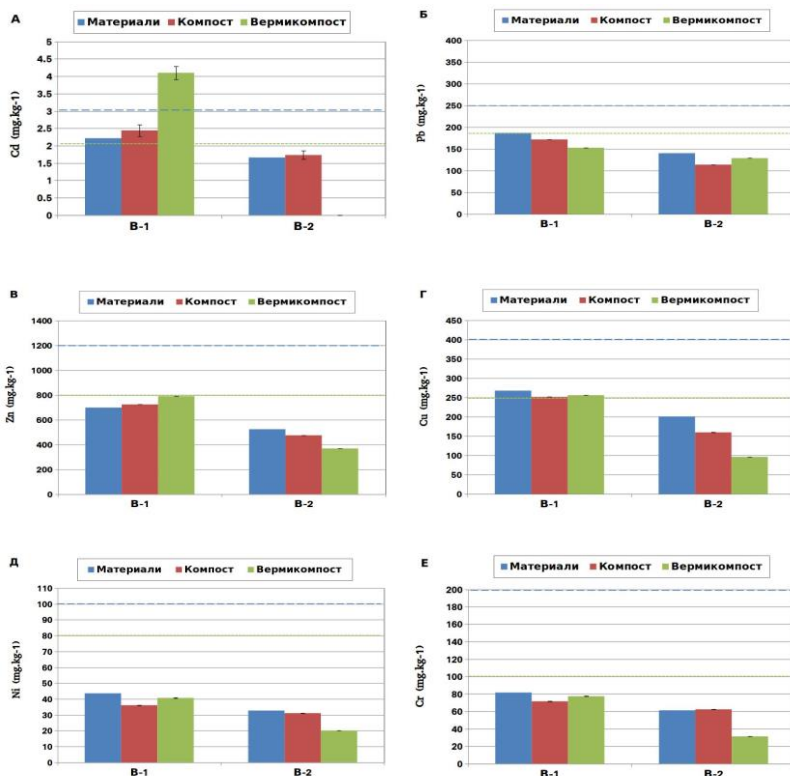
Фигура 11 Съдържание на органично вещество (А) и съотношение C/N (Б)

Вследствие на биологичното третиране настъпиха редица промени свързани с концентрацията на изследваните тежки метали в крайните продукти на процесите, компост и вермикомпост (Фиг.12). При компостите се наблюдаваше известно намаляване на концентрацията на някои тежки метали (Pb, Cu, Ni и Cr). Това беше най-вече резултат от добавянето на голям процент обемни биоразградими материали (дървесен чипс и окосена трева) с цел регулиране на съотношението C/N. По този начин значително се увеличи обема на компостните купове, а началната концентрацията на тежки метали беше редуцирана. Очаквано концентрациите на тежки метали при В-1, заложен с повече утайка, бяха по-високи. Наблюдаваше увеличение в концентрацията на металите Cd и Zn в компоста и при двата варианта, което можем да отнесем към известно намаляване на първоначалния обем (най-вече при В-2).

След етапа на вермикомпостиране при В-1 се наблюдаваше увеличение на стойностите на Cd, Cu, Cr, Zn и Ni или стойности близки до измерените в компоста. При В-2, увеличение на концентрация на тежки метали беше установена единствено при оловото. Тези резултати кореспондират с данни от научната литературата, според които е възможно значително повишаване на концентрациите на повечето тежки метали по време на процеса на биодеградация, тъй като интензивната микробна дейност води до значителни загуби на С под формата на CO₂, намалявайки общия обем. Намаляването на тежките метали при В-2 може да се отдаде, както на възможността от изтичане на инфилтрат по време

на процеса вермикомпостиране, така и в резултат на акумулиране на тежки метали в тъканите на използваните видове червеи.

Съгласно *Наредба за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци* по отношение граничните стойности на тежки метали за продукт *компост*, продуктите получени след двете фази на третиране при B-1 не покриха нормите заложиени в *Наредбата* по два показателя. Граничните стойности за Cu (250 mg.kg^{-1}) бяха по-ниски от установените при компоста от B-1 от 252 mg.kg^{-1} и от тези при вермикомпоста от 256 mg.kg^{-1} .



Фигура 12 Съдържание на Cd (A), Pb (Б), Zn (B), Cu (Г), Ni (Д) и Cr (E) в материалите, компоста и вермикомпоста

Също така, граничните концентрации за Cd (2 mg.kg^{-1}) бяха значително по-ниски от констатираните при компоста на B-1 ($2,44 \text{ mg.kg}^{-1}$) и при

вермикомпоста на В-1 ($4,1 \text{ mg.kg}^{-1}$). Вермикомпостът от В-1 не покри и заложените изисквания за продукт *органичен почвен подобрител*, където пределните стойности за Cd бяха 3 mg.kg^{-1} . От друга страна, както компостът, така и вермикомпостът получени при В-2 изпълниха изискванията по отношение пределно допустимите концентрации за продукт *компост*.

Трябва да се отбележи също, че след 120 дни компостиране при В-1 дървесният чипс остана до голяма степен неразграден с обем близък до първоначалния и активна микробна дейност. След компостирането при В-2 също имаше наличие на неразградени частици дървесен чипс, но окосената трева беше изцяло разградена, а температурата на купа в края компостирането беше по-ниска от тази при В-1. Също така, по време на вермикомпостирането материалът от В-2 задържахше по-голямо количество влага, поради по-големия процент добре разграден материал и смесената популацията от *E. Fetida* и *L. rubelus* беше значително по-добре развита в сравнение с В-1.

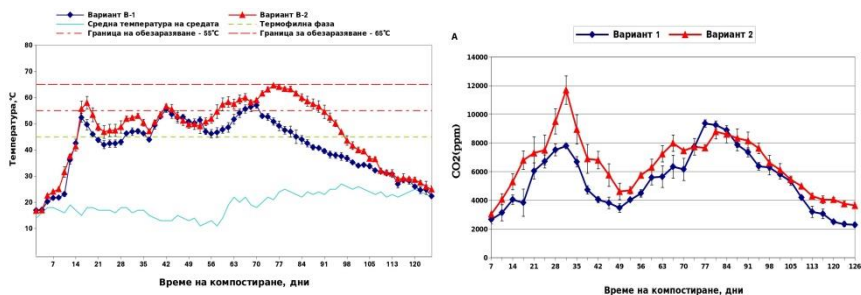
Относно патогенните микроорганизми, при двата варианта температура над 55°C беше измервана за около 40 последователни дни. След направените анализи се установи, че *Salmonella* sp. отсъства в проба от 20 g, както във вложената утайка, така и в пробите от компост и вермикомпост. *Escherichia coli* присъстваше в 0,001 g от използваната утайка, докато в компоста и вермикомпоста минималния обем беше 1 g. От друга страна, присъствието на *Clostridium perfringens* беше установено в 0,001 g както в утайката, така и в компоста и вермикомпоста от двата варианта на опита.

4.3. Компостиране и вермикомпостиране на утайка от ПСОВ при комбиниран подход

При този опит едва в края на третата седмица се наблюдаваше рязкото покачване на температурата, като всички купчини достигнаха стойности от порядъка на $49\text{--}55^\circ\text{C}$ (Фиг. 13). Температурата остана над 55°C при всички повторения на вариант 1 между 5 и 9 дни, а температури над 65°C не бяха наблюдавани при никое от трите повторения на варианта. При вариант 2 високите температури се задържаха относително по-дълго. Температурата остана над 55°C при трите повторения между 27 и 34 дни, като температура над 65°C за 3 дни беше измерена единствено при вариант 2В. Относително по-ниските температури при компостните купове на опит 3 могат да се обяснят с неблагоприятните условия на околната среда по време на залагането им (зимата).

В началото на компостирането беше наблюдавано постепенно и бързо покачване на количеството отделен CO_2 при всички варианти, което съответства на увеличаване на микробиалната активност (Фиг.13). Пикът

на отделения CO_2 беше в края на третата седмица, като количеството при В-2 е значително по-голямо от това във В-1. Това е в съответствие с повишението на температурата през този период. Понижаването на температурата в дните след разбъркването доведе и до забавяне на процеса и съответно на отделянето на CO_2 . Впоследствие, в резултат на изчерпването на лесно разградимите органични съединения, беше констатирано трайно понижаване на отделянето на CO_2 . Установи се положителна корелационна зависимост между двата параметъра проследявани *in-situ* по време на процеса компостиране.



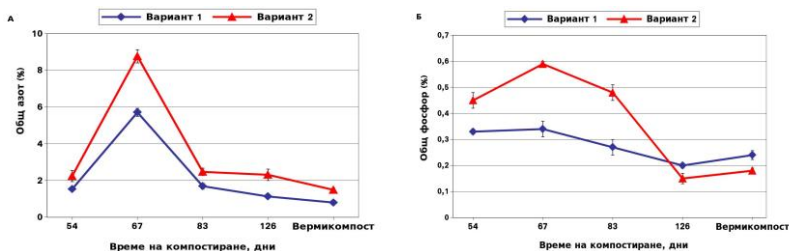
Фигура 13 Динамика на температурата (ляво) и на отделения CO_2 (дясно) по време на компостирането

Количеството на показателя общ азот (Фиг.14А) беше пропорционално на количеството вложени суровини, като по-голямо количество азот се установи при варианта с повече утайки (В-2). За разлика от предходните два опита, към 67ия ден се констатира значително повишение на процента общ N и при двата варианта, което в литература се обяснява с по-слаба интензивност на биодegradацията, намаляване обема на компостиращата се материя или имобилизацията на N.

При следващите замервания се наблюдаваше очакваната редукция на концентрацията на общ азот, като редукцията е по-голяма при повторенията на вариант 1. Стойностите измерени след вермикомпостирането бяха значително по-ниски от тези установени при компоста.

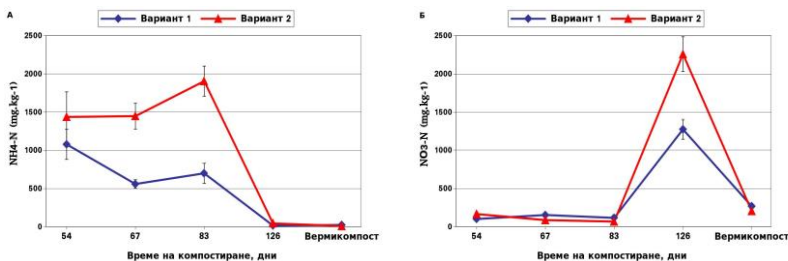
По отношение съдържанието на общ фосфор (Фиг.14Б), също се наблюдаваше слабо повишаване при второто измерване (ден 67). В следствие до края на компостирането концентрацията му постепенно намаляваше и при двата варианта. През периода на вермикомпостиране имаше повишение в готовия вермикомпост, което според наличната литература е резултат от повишена минерализация на органичната

материя или на трансформирането на неразтворимия Р в по-лесно усвоими форми. Интересно е да се отбележи същественото увеличение на подвижните форми на фосфора във вермикомпоста, спрямо компоста и при двата варианта на опита с над 50%.



Фигура 14 Съдържание на общ азот (А) и общ фосфор (Б)

При използваните утайки преобладава $\text{NO}_3\text{-N}$ с концентрация от 263 mg.kg^{-1} и респективно 127 mg.kg^{-1} за $\text{NH}_4\text{-N}$. След първите 54 дни на компостиране наблюдавахме увеличаване на $\text{NH}_4\text{-N}$ (Фиг.15А), докато концентрацията на $\text{NO}_3\text{-N}$ при двата варианта беше сравнително ниска (Фиг.15Б). В началото на втората част на компостирането (след 83 ден) беше наблюдаван процес на намаляване концентрацията на $\text{NH}_4\text{-N}$ за сметка на увеличаване на тази на $\text{NO}_3\text{-N}$ в следствие на по-силното развитие на нитрифициращите бактерии през този период, за които температури над $30\text{-}35^\circ\text{C}$ са лимитиращи.



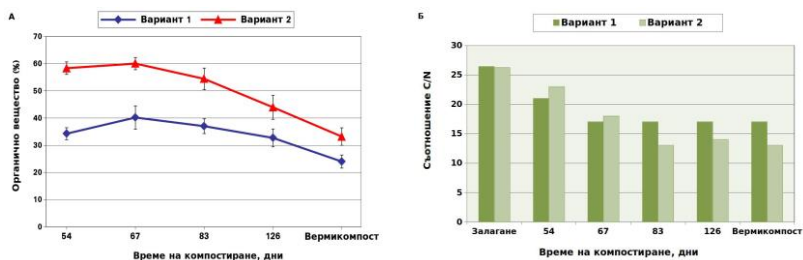
Фигура 15 Съдържание на амониев (А) и нитратен (Б) азот

В края на вермикомпостирането, в резултат на продължаващата нитрификация, съдържанието на амониевия азот продължи да намалява пропорционално на това при компоста, като стойностите за $\text{NH}_4\text{-N}$ бяха по-високи при варианта с по-голямо количество утайки (В-2). При $\text{NO}_3\text{-N}$

също се установи значимо намаляване през вермикомпостирането поради изтичане с инфилтрат.

В допълнение, в началото на компостирането се наблюдаваше низходяща градация по отношение показателя органично вещество, което е естествен резултат от биоразграждането (Фиг.16А). Лекото увеличение, установено при замерването на 67-мия ден от процеса може да отдадем на нееднородността на компостните купове и голямото съдържание на трудни за биоразграждане материали, какъвто е дървесният чипс. В този смисъл вариант 2, който съдържа по-голям процент дървесен чипс, остана с по-висока концентрация на органично вещество до края на процеса. Сухите листа и сламата, от друга стана, бяха относително по-лесни за биоразграждане и бяха разградени напълно.

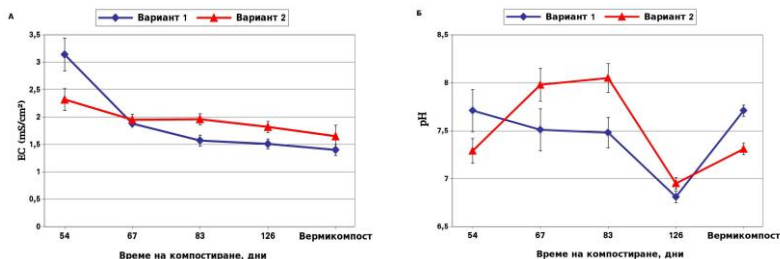
Превръщането на органиката продължи и по време на вермикомпостирането. Наблюдаваната интензивна загуба по време на вермикомпостирането можем да отдадем на земните червеи (дезинтегриране, хомогенизиране, аериране на компостиращата се маса).



Фигура 16 Съдържание на органично вещество (А) и съотношение C/N (Б)

Друг важен параметър е съотношението C/N, което при залагане беше определено на 26,40:1 при В-1 и на 26,25:1 при В-2 (Фиг.16Б). Наблюдаваше се намаляване на съотношението C/N във времето в резултат на по-интензивната загуба на С при биодеградацията. При готовия компост изчисленото съотношение при В-1 беше 17:1, а при В-2 беше 14:1. Последвалото вермикомпостиране не доведе до съществени промени в този параметър.

Намалението или увеличението на ЕС при компостирането показва намаляване или увеличаване на интензивността на процеса. Получените данни показаха намаляване с течение на времето, което беше по-силно изразено при В-1 (Фиг.17А). Установените крайни стойности при вермикомпоста от 1,4 mS.cm⁻² за В-1 и 1,65 mS/cm⁻² за В-2 отговарят на изискванията за стабилност на компоста заложи в Наредбата от 2017 г. ($\leq 3 \text{ mS.cm}^{-2}$).



Фигура 17 Електропроводимост (А) и рН (Б) измерени в динамика

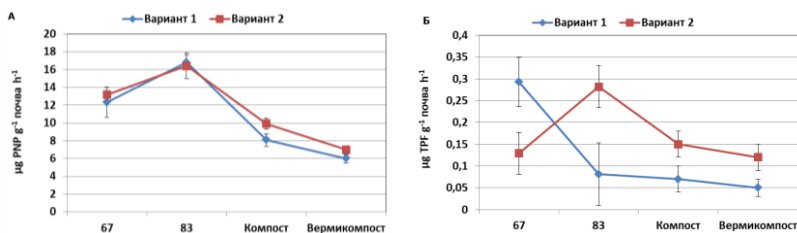
Реакцията на средата на използваните утайки беше в неутралната област 7,11 (Фиг.17Б). В края на компостирането измерените стойности бяха по-ниски, 6,81 и 6,95, съответно. Крайните стойности на този параметър при вермикомпоста от В-1 бяха 7,71, а при този от В-2, 7,31. Постоянните стойности на рН в края на процеса могат да се отнесат към стабилизацията на компоста и намалената му микробиологична активност.

По време на опита в динамика се определяха две ензимни активности, които охарактеризират процеса на компостиране, β -глюкозидазна и дехидрогеназна. През по-голямата част от компостирането се наблюдаваше увеличение на β -глюкозидазна активност (Фиг.18А) поради наличието на въглехидрати. След изчерпване на основните депа и образуването на ензима от микроорганизмите беше забавено и като следствие температурата на куповете намаля.

Тези данни корелират с данните за температурата и отделянето на CO_2 . При В-1 стойностите на температурата започват да намаляват от 70ия ден, а от 56 °C тя пада под 45 °C за две седмици, като процесът излиза от термофилната фаза. Подобна закономерност на промяна на тренда около ден 83 се наблюдава при почти всички показатели, общ азот, $\text{NH}_4\text{-N}$ и $\text{NO}_3\text{-N}$, общ Р, рН, органично вещество, микробна биомаса, което показва преминаване във фаза на зряне и изчерпване на лесноусвоимите органични съединения. В този период от извеждане на опита най-важните показатели описващи баланса на хранителните вещества бяха с по-висока стойност при В-2 в сравнение с В-1, което говори за незавършена първа фаза на биоразграждане.

Данните от изследването в динамика на почвената дехидрогеназна активност (Фиг.18Б) показват по-ранно намаляване на активността на ензима при В-1 в сравнение с В-2. Това може да се отдаде на по-високото съдържание на целулоза във втория и по-дългия период на биоразграждане. Вермикомпостирането също доведе до намаляване на

активността на този ензим и във вермикомпоста дехидрогеназите бяха по-слабо активни в сравнение с тези в компоста.



Фигура 18 β -глюкозидазна (А) и дехидрогеназна (Б) активност

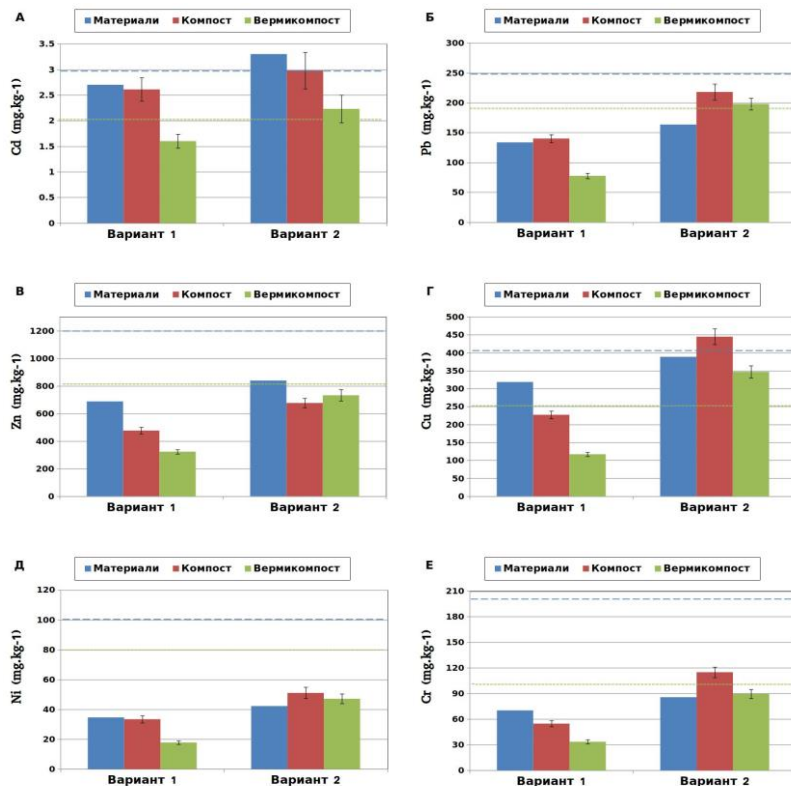
По време на прилагане на компостирането и вермикомпостирането настъпиха редица промени свързани с концентрацията на изследваните тежки метали в крайните продукти, компост и вермикомпост (Фиг. 19). Тъй като съдържанието на тежките метали в използваните биоразградими отпадъци е много ниско в сравнение с това в утайките и тук комбинирането им доведе до намаляване на крайната концентрация на съответния елемент в компоста. При готовите компости от двата варианта се наблюдаваше значително намаляване на концентрацията на някои тежки метали (Cd, Zn), спрямо изчисленото на база входящите суровини.

Биодеградационните процеси доведоха до значително редуциране обема на отпадъците, което от своя страна имаше като резултат повишаването на концентрацията на някои тежки метали (Pb, Cu, Ni, Cr) в компостите. При компоста и при вермикомпоста от В-2, концентрациите на всички метали бяха по-високи от тези във В-1.

По отношение изискванията на *Наредбата от 2017 г.*, компостът от В-1, който съдържаше по-малка концентрация утайки, покри изискванията за продукт *органичен почвен подобрител*. Компостът от В-2 не успя да удовлетвори изискванията за същия единствено по отношение на съдържанието на Cu (445 mg.kg^{-1}) при граничната стойност от 400 mg.kg^{-1} заложена в *Наредбата от 2017 г.*

При вермикомпостите от двата варианта беше наблюдавано намаляване на почти всички метали, спрямо компостите (с изключение на съдържанието на Zn при вермикомпоста от В-2, което се увеличи с 8,28%). Това може да се отдаде на изтичане на инфилтрат от заложения за вермикомпостиране материал, вследствие на валежи или напояване, извършвано през периода на вермикомпостиране. Данни за значително намаляване на концентрациите на елементите Cd, Zn, Cu, Hg, Mn, As и Pb при вермикомпостиране на утайки от ПСОВ присъстват широко в

научната литература и се отнасят към възможна акумулация в телата на червеите. В допълнение, използваната смесена популацията от *Eisenia fetida* и *Lumbricus rubelus* беше значително по-добре развита в сравнение с опит 1 и опит 2. Това може да се отдаде на по-голямата пригодност на компостерната система спрямо системата легла, по отношение на задържане на влагата.



Фигура 19 Концентрация на Cd (А), Pb (Б), Zn (В), Cu (Г), Ni (Д) и Cr (Е) в материалите, компоста и вермикомпоста и стандартната грешка (n=3)

След тримесечно вермикомпостиране, при всички повторения, обемът на материала беше намалял с около 1/3, въпреки че все още се наблюдаваха неразградени частици от използвания дървесен чипс. По отношение заложените изисквания съгласно *Наредбата от 2017 г.*, вермикомпостът от В-1, който съдържа по-малко количество утайки,

отговори изцяло на изискванията за продукт *компост*. Вермикомпостът от В-2 не успя да удовлетвори изискванията за продукт *компост* по отношение на елементите Cu, Cd и Pb, но покри изискванията за *органичен почвен подобрител*.

Потоъкът на отделния от компостните купове инфилтрат съществуваше през целия процес на компостиране, но намаля през втория етап, зрението. След като компостът беше прехвърлен за вермикомпостиране в компостери, при поддържане влагата на материала се извършваше поливане с вода. В резултат на това, но и на падналите валежи, се образуваше инфилтрат от вермикомпоста, чието събиране беше възможно и се извърши с цел установяване на потока на тежки метали напускащи системата. Данните са показани в *таблица 1*.

Таблица 1 Концентрации на някои елементи в инфилтратните води при процеса на вермикомпостиране. Данните показват средната стойност и стандартната грешка ($n=3$)

Елемент (mg.l ⁻¹)	Вариант 1	Вариант 2
Cd	0,05±0,004	0,08±0,01
Pb	1,6±0,1	4,1±0,3
Zn	2,4±0,3	6,1±0,8
Cu	1,8±0,1	2,5±0,5
Ni	0,1±0,01	0,3±0,02
Cr	0,1±0,02	0,4±0,03

В инфилтрата най-значителна беше концентрацията на Pb, Zn и Cu, а най-ниска тази на Cd, Ni и Cr. Съответно, във В-2 се установиха по-високи концентрации на Pb, Zn и Cu от тези във В-1 (*Табл. 2*).

Таблица 2 Съдържание на тежки метали в червеите в края на процеса на вермикомпостиране. Данните показват средната стойност и стандартната грешка ($n=3$)

Елемент (µg.g ⁻¹)	Вариант 1	Вариант 2
Кадмий	0,2±0,01	0,25±0,02
Олово	1,1±0,1	0,9±0,1
Цинк	31±3,2	49,1±3,1
Мед	7,5±0,5	11,6±2,1
Никел	1,4±0,1	2,0±0,17
Хром	0,95±0,12	1,4±0,21

В края на вермикомпостирането на опит 3 се извърши измерване на концентрацията на тежките метали в телата на земните червеи (*Табл. 3*). Най-съществени концентрации бяха натрупани от Zn и Cu, но също така се установи и наличие на Cd, Pb, Ni и Cr. Статистически доказана разликата

между двата варианта на опита в полза на В-2 се установи при Cd, Zn, Cu, Ni и Cr, докато повече Pb се установи при В-1.

Таблица 3 Съдържание на патогенни микроорганизми в използваната утайка от ПСОВ, в средна проба от компост и вермикомпост при вариантите на опит № 3

Показател	Утайка от ПСОВ	Компост		Вермикомпост	
		Вариант-1	Вариант-2	Вариант-1	Вариант-2
<i>Salmonella</i> sp.	Присъст.	Отсъст.	Отсъст.	Отсъст.	Отсъст.
<i>E. coli</i> – титър	0,001	1	1	1	1
<i>Cl. perfringens</i>	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01

В таблица 3 е представено съдържанието патогенни микроорганизми в използваните утайки, в готовите компост и вермикомпост. Един от най-важните индикатори е присъствието или отсъствието на *Salmonella* sp. След направените анализи се установи, че *Salmonella* sp. присъства в проба от 20 g във вложената утайка, докато в пробите от компост и вермикомпост бактерията не се откри.

Escherichia coli – титърът е друг индикатор показващ минималния обем, в който присъства тази бактерия. Той изразява количеството вода (cm³/g), в което се открива една бактерия. Количеството, в което се открива една клетка на *E. coli* при утайките е 0,001 g. След биологичното третиране, в двата варианта компост и впоследствие вермикомпост, минималното количество, в което се открива една клетка е установено на 1 g.

Clostridium perfringens беше установен в 0,001 g в утайката от ПСОВ, както и в компоста при двата варианта на опит 3. Наличието на *Clostridium perfringens* в готовите компости, както и при опит 1 и опит 2 може да се обясни с устойчивостта на бактерията на неблагоприятни условия, благодарение на свойството ѝ да образува ендоспори. При опит 3 честотата на поява на клетки на *Cl. perfringens* беше над нормата (1 cfu/0,001 g = 1000 cfu/g) при готовия компост. След вермикомпостирането се откриха 100 cfu на *Cl. perfringens* в един грам вермикомпост (1 cfu/0,01 g=100 cfu/1 g).

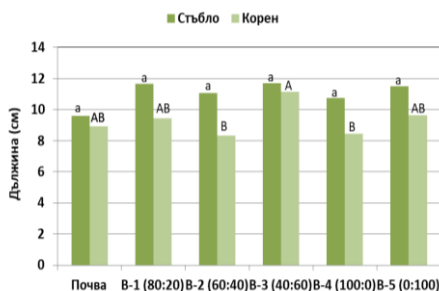
4.4. Биотестови опити с компости и вермикомпости при контролирани условия

4.4.1. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ и биоразградими отпадъци от селското стопанство

Растежът на растенията от грах (*Pisum sativum* L.) в присъствие компост е представен на фигура 20. Статистическият анализ по LSD метода показва липса на доказана разлика при $\alpha=0,05$. При сравняване на

средните стойности, съобразно изискванията заложи *Наредбата от 2017 г.*, дължината на стъблата на растенията при В-1 и В-3 бяха със статистически доказана разлика спрямо растеж върху почва (стандартна грешка, 21,2% и 21,6%).

Дисперсионният анализ по LSD метода показва наличието на четири групи на база резултатите за дължина на корена. Установи се липсата на статистически доказана разлика между контролата (растеж в почва) и останалите варианти без В-3. Най-дълъг корен се установи при В-3 при $\alpha=0,05$. Наблюдаваните стойности на средната дължината на корена при граха между контролата и В-2 и В-4 са в рамките на допустимото по *Наредбата от 2017 г.* (до 10%) от 6,6% и 5,3%, съответно. От резултатите може да се заключи, че използването на смеска 1:1 (v/v) на почва с компостите получени при опит №1 не оказва потискащо въздействие върху развитието на граха. Използването на компост получен с 40% утайка доведе до най-добър растеж, както на надземната част (21,6%), така и на корена (25%).



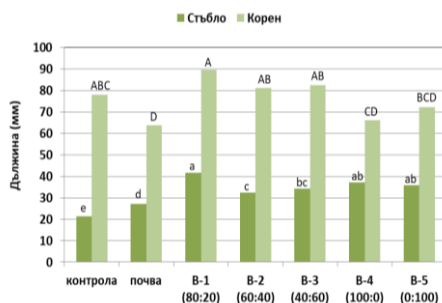
Фигура 20 Дължина на стъблото и корена на грах растящ в субстрат с почва и компост 1:1 (v:v) от опит №1. Статистически доказана разлика съществува между различните букви за различните променливи на база LSD метода на ANOVA при $\alpha=0,05$

При биотеста със семена от кресон и извлекци от вермикомпост се установиха 100% покълнали семена при контролата с дестилирана вода. Същият резултат беше отчетен и при вариантите инкубирани с извлек на вермикомпост от В-2 (60:40) и В-3 (40:60). Кълняемостта на семената заложи с извлек от градинска почва, както и тези с вермикомпост от В-1 (80:20) и В-5 (0:100), беше установена на 95%. Най-ниска кълняемост на семената от кресон (90%) беше наблюдавана при варианта заложен с вермикомпост от утайки В-4 (100:0).

Инкубирането на семената от кресон при различните варианти (дестилирана вода, почвен извлек и извлек от различните вермикомпости)

за период от пет дни доведе до разлики в растежа изразен в дължината на надземната част и на корена на растенията. Въз основа на данните за дължината на стъблото на кресона се оформиха 5 групи резултати, при които средните стойности не се различават значително една от друга (Фиг.21). Най-слаб растеж на стъблото се отбеляза при растенията инкубирани с д.Н₂О, следвани от тези с почвен извлек, а най-силен растеж беше установен при инкубираните с извлек от вермикомпост от В-1. Въпреки тези различия, значима разлика не се наблюдава между растенията от В-1, В-4 и В-5, докато спрямо всички останали В-1 показва най-добри, статистически доказани резултати.

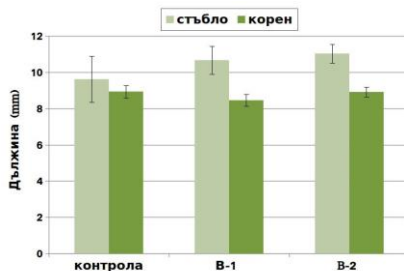
В резултат от дисперсионния анализ на данните за дължината на корена се оформиха 4 групи, в които средните стойности не се различаваха съществено една от друга. Най-голяма беше дължината при растенията инкубирани с извлек от вермикомпост от В-1, следвани от В-3, В-2 и контролата. Въпреки това, анализът по LSD метода при $\alpha=0,05$ доказва липсата на значима разлика между тях. Такава се установи между гореспоменатите варианти и варианта с почвен извлек, при който дължината на корена беше най-малка. Значима разлика се наблюдаваше и между растенията от В-1 и тези от В-4 и В-5. Като резултат от горното може да се заключи, че водният извлек на вермикомпостите от всички варианти не оказват потискащ ефект, както върху кълняемостта на семената, така и върху развитието на вегетативните органи на кресона.



Фигура 21 Средна дължина на стъблото и корена при растения от кресон инкубирани с вода или извлек от почва или вермикомпост от вариантите на опит №1. Статистически доказана разлика съществува между различните букви за различните променливи на база LSD метода на ANOVA при $\alpha=0,05$

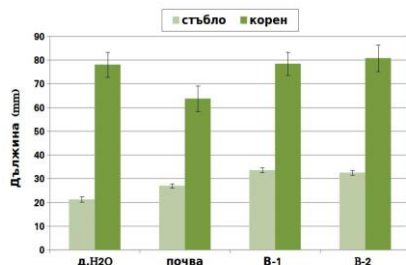
4.4.2. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ и биоразградими отпадъци от паркове и градини

Данните за растежа на граха в субстрат с почва и компост 1:1 са показани на *фигура 22*. Сравнението между контролата и двата варианта, където има внесен компост, показва че няма потискане в растежа на граха, което да е резултат от наличието на компост в почвата. Растенията засадени с компост от В-1 бяха с 11%, а тези в компост от В-2 с 15% по-дълги стъбла от средната стойност при контролата. По отношение показателя дължина на корена се наблюдаваше незначително изоставане в растежа спрямо контролните растения. От статистическа гледна точка не беше установена доказана разлика между растенията засадени в почва и тези от двата варианта на опита, както по отношение показателя дължина на стъбло, така и по отношение показателя дължина на корен на граха.



Фигура 22 Средна дължина на стъблото и корена на граха растящ в почва (контрола) и субстрат с почва и компост 1:1 (v:v)

При изследване влиянието на извлек от вермикомпостите върху развитието на надземната маса и кореновата система на растенията също не се установи фитотоксичен ефект при растенията от кресон (*Фиг. 23*). Средната дължина на стъблото на растенията от В-1 превишаваше контролата с 58%, а на тези от В-2 с 53%. Подобни резултати бяха получени и спрямо растенията с почвен извлек, като при В-1 увеличението беше с 24%, а при В-2 с 20%. При корена, растенията от варианта с д.Н₂О бяха незначително по-развити в сравнение с В-1 и с В-2., докато спрямо тези инкубирани с почвен извлек увеличението беше с 23% при В-1 и 27% при В-2. Следователно, извлекът от вермикомпост не потисна, а напротив, стимулира развитието на растенията от кресон. Подобър растеж на надземната част беше наблюдаван при растенията инкубирани с извлек от вермикомпост от В-1, докато корените бяха по-добре развити при В-2.



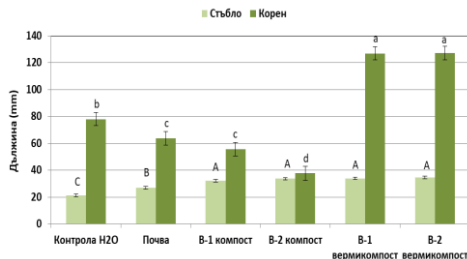
Фигура 23 Средна дължина на стъблото и корена при растения от кресон инкубирани с дН₂О, извлек от почва или вермикомпост.

4.4.3. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ при комбиниран подход

По отношение показателя кълняемост на семената от кресон при контролата с дестилирана вода бяха наблюдавани 100% покълнали семена. Същият резултат беше отчетен и при семената инкубирани с извлекци от вермикомпостите на В-1 и В-2. Кълняемостта на семената заложени с извлек от градинска почва, както и на тези инкубирани с извлек от компост от В-1 беше установена на 95%. Най-ниска беше кълняемостта при компоста от В-2, 90%. От резултатите е видно, че семената заложени в извлек от вермикомпост проявяват по-висока кълняемост, спрямо тези заложени с извлек от компост от същият вариант. Кълняемостта при семената заложени с извлек от вермикомпост от вариант 1 е по-висока с 5,3%, а при тези от вариант 2 с 11%.

По отношение показателя средна дължина на стъбло при растенията от кресон (Фиг. 24) се забелязаха най-ниски стойности при контролата, следвани от тези при семената заложени с извлек от градинска почва. При останалите варианти не се установиха статистически значими разлики помежду им след направения дисперсионен анализ, но техните резултати бяха доказано по-високи от тези при двете контроли.

Като резултат от горното може да се заключи, че водният извлек на компостите и вермикомпостите от двата варианта не оказват съществен отрицателен ефект, както върху кълняемостта на семената, така и върху развитието на надземната част на младите растения от кресон и те покриват изискванията заложени в *Наредбата за разделно събиране на биоотпадъците и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017.*



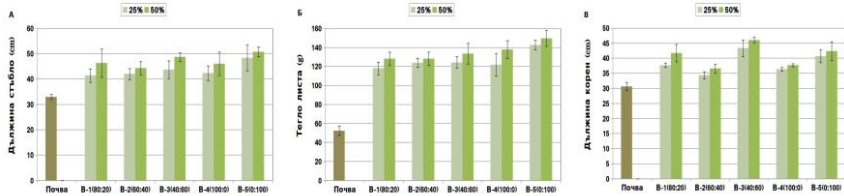
Фигура 24 Средна дължина на съболо и корен при растения от кресон инкубирани с извлек от почва, компост или вермикомпост от опит №3. Показани са средните стойности и стандартната грешка ($n=20$). Различните големи и малки букви показват съществуващи разлики между вариантите (еднопосочен дисперсионен анализ, $p \leq 0,05$)

Най-слаб растеж на корена беше установен при компостите от двата варианта, чиито растеж беше значително по-слаб от този при контролата (51,7% и 28,5%), а при почвения извлек стойностите бяха с 18,3% по-ниски. В противовес на горното, растежът на корените на градинския кресон във вариантите с извлекци на вермикомпостите от беше значително по-силно изразен от този в другите варианти, включително и спрямо контролите. Дължината на корените беше с 62,6% и 63% по-голяма в сравнение с тази на растенията от варианта с д.Н₂O и с 99,1% и 99,6%, съответно, в сравнение с тази от варианта с почвен извлек.

4.5. Приложение на получените компости и вермикомпости при отглеждане на домати и пипер в полски условия

4.5.1. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ и биоразградими отпадъци от селското стопанство

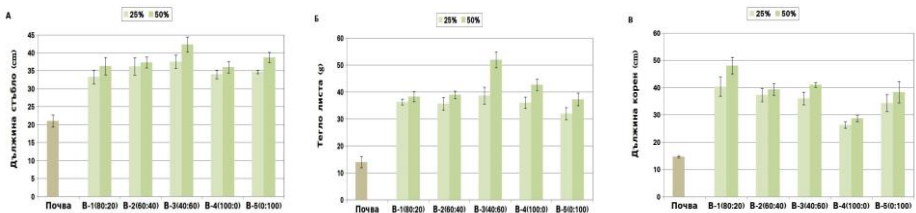
Изследванията при полски условия дават най-реални данни за приложимостта на компостите и вермикомпостите. При отглеждане на домати (*Solanum lycopersicum* L.) се установи, че употребата на вермикомпост от всички варианти на опит №1, в двете изследвани концентрации, не угнетява и дори стимулира развитието, както на кореновата система, така и на надземната част на растенията (Фиг. 25).



Фигура 25 Дължина на стъбло (А), тегло на листната маса (Б) и дължина на корена (В) при растения от домати засадени в почва или в смеска на почва и вермикомпост в концентрация 25% и 50% (v:v)

Всички варианти, в двете изследвани концентрации показаха стойности надвишаващи контролата. Най-добре развити по отношение дължина на стъбло и тегло на листната маса, в двете изследвани концентрации, бяха растенията от В-5 (0:100). По отношение дължината на корена, най-силен растеж се установи при растенията от В-3 (40:60).

Изследванията на биометричните параметри на пипера (*Capsicum annuum* L.) показаха, че употребата на вермикомпост от всички варианти в двете изследвани концентрации не угнетява и дори стимулира развитието, както на кореновата система, така и на надземната част на растенията (Фиг.26). Както и при домати и тук всички варианти при двете изследвани концентрации показаха резултати надвишаващи контролата. Най-дълги стъбла и най-голяма листна маса се установиха при растенията от В-3 (40:60), а най-дълги корени се отчетоха при растенията от В-1 (80:20). В допълнение, употребата на вермикомпост при всички варианти на опита не угнекти, а дори стимулира образуването на плодове при растенията от пипер превишавайки броя на тези отглеждани без вермикомпост (резултатите не са показани).



Фигура 26 Средна дължина на стъбло (А), средно тегло на листната маса (Б) и средна дължина на корена (В) при растения от пипер засадени в почва или в смеска на почва и вермикомпост 25% и 50% (v:v) от опит №1

В таблица 4 е показано съдържанието на Си в надземната маса на доматиите. Установи се, че с увеличаване на съдържанието на Си във вермикомпоста, като резултат от повишената концентрация на утайка в изходните материали, се увеличава и натрупването ѝ в растението. Интересно е да се отбележи, че в растенията засадени с 50% вермикомпост, концентрациите на Си в растенията бяха подобни на тези с 25%. Установи се сравнително добра корелационна зависимост между концентрацията на Си във вермикомпостите и в растенията при прилагане на 50% вермикомпост ($r^2=0,80$), докато при внасяне на 25%, корелацията беше по-слаба, $r^2=0,56$. Анализът на натрупването на Си във варианта само с вермикомпост от оборски тор и слама показва стойности практически равни с тези от варианта само с почва.

Таблица 4 Съдържание на Си в стъблото и листната маса на доматиите засадени във вермикомпости от опит №1. Данните показват средната стойност на трите растения. Стандартната грешка е в рамките на 5 %

Си (mg.kg ⁻¹)	Контрола (почва)	В-1 (80:20)	В-2 (60:40)	В-3 (40:60)	В-4 (100:0)	В-5 (0:100)
25%	68,2	171	172,1	184,3	174,1	60,3
50%		177,1	165,7	178,0	220,3	74,5

Въпреки че, съдържанието на Zn във вермикомпостите е значително по-високо от това на Си, натрупването му в растенията беше по-ниско като абсолютна стойност. При растенията отгледани върху почва с 25% вермикомпост най-висока концентрация Zn се натрупа в растенията от В-3, В-4 и В-2. Най-малка концентрация в надземната маса се установи при растенията от В-1 и В-5 (Табл. 11).

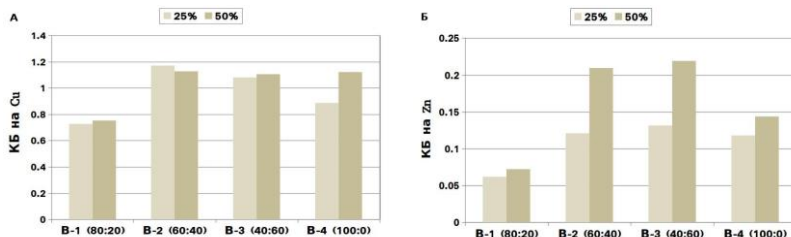
Таблица 5 Съдържание на Zn в стъблото и листната маса на доматиите засадени във вермикомпости от опит №1. Данните показват средната стойност на трите растения. Стандартната грешка е в рамките на 5 %

Zn (mg.kg ⁻¹)	Контрола (почва)	В-1 (80:20)	В-2 (60:40)	В-3 (40:60)	В-4 (100:0)	В-5 (0:100)
25%	36,0	48,1	60,2	66,3	64,1	50,7
50%		56,1	104,4	110,2	78,1	54,6

Като цяло разликите между вариантите с утайка не бяха съществени с изключение на В-1, където концентрацията на Zn беше по-ниска. При контролния вариант растенията натрупаха най-малко цинк – 36 mg.kg⁻¹, а при варианта само с оборски тор концентрацията достигна

50,7 mg.kg⁻¹, което означава, че внасянето на тора допринася с около 41% за натрупването на метала. Всички растения, засадени в 50% концентрация на вермикомпост натрупаха по-голямо количество Zn в надземната си маса, спрямо растенията от градинска почва (контролата). В сравнение с контролата, внасянето на вермикомпостите допринесе за съществено повишаване на концентрацията на Zn, който е важен микроелемент за развитието на растенията.

Натрупването на Cu в доматите имаше като резултат сравнително високи стойности на КБ (коефициент на биоаккумуляция) при различните варианти на опита (Фиг.27А). Двойното увеличение на концентрацията на вермикомпостите в саксиите на доматите не доведоха да съразмерно увеличение на КБ. Прави впечатление, че при използване на 25% вермикомпост по-ниските концентрации на утайка доведоха до по-високи стойности на натрупване в сравнение с по-високите.

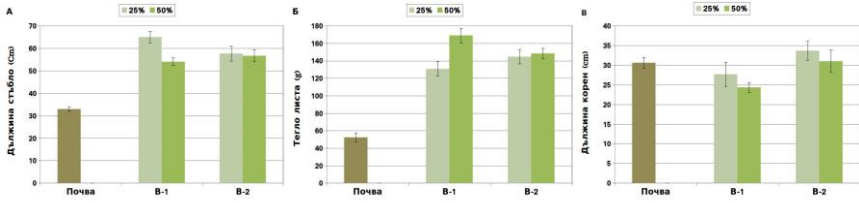


Фигура 27 Коефициент на биоконцентрация на Cu (А) и Zn (Б) в растенията от домати при двете концентрации на вермикомпост 25% и 50% на опит №1

Коефициентът на биоконцентрация на Zn в надземната маса на растенията беше по-нисък като абсолютна стойност в сравнение с този на Cu. Наблюдаваше се тенденция с увеличаване на концентрацията на оборски тор да се увеличава КБ на Zn (Фиг. 27Б).

4.5.2. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ и биоразградими отпадъци от парковете и градините

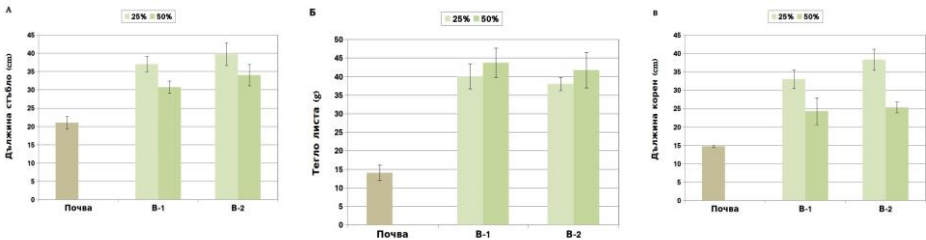
Средната дължина на стъблото и средното тегло на листната маса на доматените растения, засадени във вермикомпост от вариантите, надвишаваха съществено контролата (Фиг.28). При двата варианта на опита, растенията засадени в 25% концентрации на вермикомпост бяха с по-дълги стъбла спрямо вариантите с използване на 50% вермикомпост. От друга страна, по-високо тегло имаха растенията засадени в почва съдържаща 50% вермикомпост от двата варианта, спрямо тези с 25%.



Фигура 28 Средна дължина на стъбло (А), средно тегло на листна маса (Б) и средна дължина на корен (В) при растения от домати засадени в присъствие на 25% и 50% вермикомпост

При двете концентрации на В-1 се наблюдаваше известно изоставане по отношение дължината на корена, спрямо контролните растения (Фиг.28В). Също така, при двата варианта на опит №2 доматените растения засадени в 25% концентрации на вермикомпост бяха средно с по-дълги корени спрямо тези засадени в 50% концентрация. Растения засадени в двете концентрации покриха изискванията по отношение биометричните показатели дължина на стъбло, тегло на листната маса и дължина на корен заложили в *Наредбата от 2017 г.*

По отношение развитието на вегетативните органи на пипера можем да заключим, че употребата на вермикомпост от двата варианта в двете изследвани концентрации не потиска, а дори стимулира развитието, както на кореновата система, така и на надземната част на растенията (Фиг. 29). Двата варианта, в двете изследвани концентрации, показаха резултати надвишаващи контролата. По-добре развити растения по отношение дължината на стъбло бяха тези от В-2, докато по-добре развита листна маса беше установена при двете концентрации В-1. Растенията засадени в 25% вермикомпости от двата варианта имаха по-добре развита коренова система от останалите.



Фигура 29 Средна дължина на стъбло (А), средно тегло на листна маса (Б) и средна дължина на корен (В) при растения от пипер

Броят на генеративните органи (плодовете) на пипера отгледан в смеска с вермикомпост и при двете изследвани концентрации беше по-голям в сравнение с този на контролата. Добавянето на вермикомпост към почвата в изследваните концентрации не доведоха да потискане, а дори стимулираха образуването на плодове. Интересно е да се отбележи, че и тук, както при опит №1, с по-голям среден брой плодове бяха растенията засадени с вермикомпост от варианта включващ по-малко утайки (В-2).

Основните елементи натрупани в листната маса на доматените растения от опит №2 бяха Cu и Zn (Табл.6). От направените анализи се вижда, че единствено при използване на 50% вермикомпост от В-1 има по-съществено натрупване на Cu в надземната маса (над 3 пъти повече), докато в другите варианти стойностите бяха много близки до тази от контролния вариант. При изследване натрупването на Zn се забелязаха същите тенденции, както при Cu. Най-висока концентрация в надземната маса се установи при използване на 50% вермикомпост от В-1, която надвишаваше с 65,3% тази установена при контролата, докато при растеж в 25% вермикомпост от същия вариант концентрацията беше по-ниска. При растенията отгледани в почва с вермикомпост от В-2 (25% и 50%), натрупването на Zn беше малко по-високо от контролата и в двата варианта. При опит №2, подобно на опит №1, коефициентът на биоконцентрация на Zn в надземната маса на растенията беше по-нисък като абсолютна стойност в сравнение с този на Cu (резултатите не са показани).

Таблица 6 Съдържание на тежки метали в стъблото и листната маса на доматите засадени във вермикомпост от опит №2

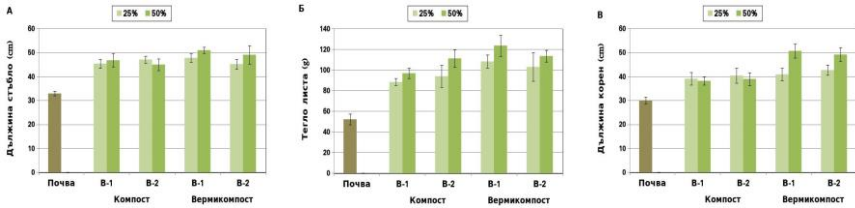
Елементи (mg.kg ⁻¹)	Контрола (почва)	В-1		В-2	
		25 %	50 %	25 %	50 %
Cu	46,1	42	198	46	50
Zn	37	30	62	44	52

4.5.3. Компости и вермикомпости получени от утайки от ПСОВ при комбиниран подход

Едни от най-важните параметри, които дават възможност да се направи обективна оценка на растежа на растенията са дължината на стъблата и колените и теглото на листната маса. Най-добри стойности за всички тези параметри бяха отчетени при 50% вермикомпост от вариант 1, последвани от растенията засадени в 50% вермикомпост от вариант 2 (Фиг.30). Отчитайки всички биометрични параметри може да се заключи, че най-изостанали в развитието си са растенията от контролната проба

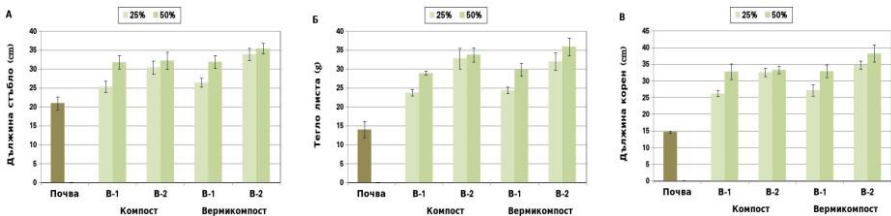
(без компост), което може да се отнесе към по-ниската запасеност с хранителни вещества на използваната почва.

Използването на вермикомпост за отглеждане на домати, имаше по-добър ефект за развитието им в сравнение с компоста, като разликата варираше в широки граници при различните варианти и концентрации. По-ниската използвана концентрация и при двата варианта беше недостатъчна, за да обезпечи хранителния баланс на растенията по време на вегетацията им.



Фигура 30 Дължина на стъблото (А), тегло на листата (Б) и дължина на корена (В) при домати засадени в почва или в смеска на почва и компост или вермикомпост 25% и 50% (v:v) при вариантите на опит №3

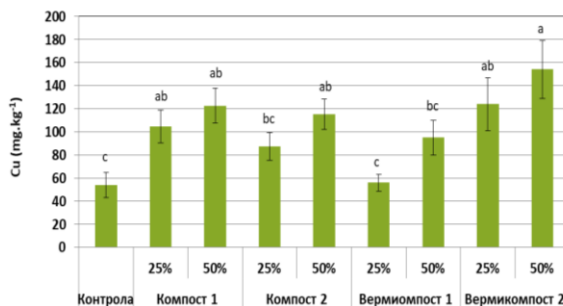
Резултатите от изследване на биометричните параметри на пипера показаха, че употребата на компост и вермикомпост от двата варианта, в двете изследвани концентрации, не угнетява и дори стимулира развитието, както на кореновата система, така и на надземната част на растенията (Фиг.31). Средно с най-дълги стъбла, корени и най-голямо тегло на листната маса бяха растенията отглеждани в 50% концентрация на вермикомпост от вариант 2. Най-ниски стойности на всички измервани параметри се установиха при контролата, което може да се отнесе към ниската запасеност с хранителни вещества на използваната почва. Получените резултати от извършената биометрия и при двете култури отговарят на изискванията за употреба на компост в земеделието от Наредбата от 2017 г.



Фигура 31 Средна дължина на стъбло(А), средно тегло на листа(Б) и средна дължина на корен (В) при растения от пипер засадени в почва или в смеска на почва, компост или вермикомпост 25% и 50% (v:v) при вариантите на опит №3

По отношение на броя на формираните плодове при пипера се установи, че и при двата варианта, в двете изследвани концентрации компост или вермикомпост, средният брой получени плодове превишава този установен при растенията засадени в почва. За разлика от резултатите получени при опити 1 и 2, където повече плодове бяха образувани при вариантите с участие на по-малко количество утайки, в настоящия опит, както при компоста, така и при вермикомпоста, в двете изследвани концентрации, по-голям брой плодове бяха образувани при растенията отглеждани във варианта с продукта получен с по-голямо количество утайка (В-2).

Анализът на съдържанието на Cu в надземната маса на домати показва известна зависимост на натрупването на този тежък метал от съдържанието му в компоста и вермикомпоста (Фиг.32). С увеличаване на съдържанието на Cu в компоста или вермикомпоста, като резултат от повишената концентрация на утайка в изходните материали, се увеличи и натрупването ѝ в растението. Въпреки това, съществена разлика в концентрацията на Cu между компост 1 и компост 2 не доведе статистически доказани различия в концентрацията на този елемент в растенията. Тези стойности, обаче, бяха по-високи от концентрацията в растенията от контролата.

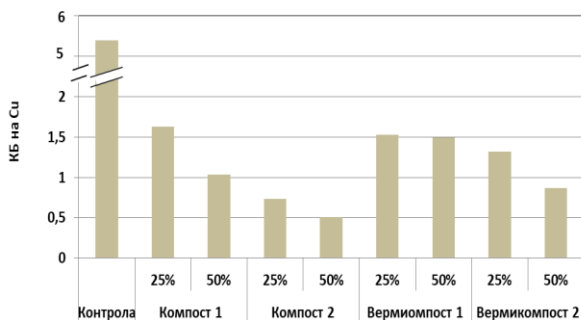


Фигура 32 Съдържание на Cu в листната маса на домати с внесени 25% или 50% вермикомпости от вариант 1 или вариант 2. Данните показват средната стойност и стандартната грешка ($n=3$). Различните букви показват доказани разлики между вариантите при еднопосочен дисперсионен анализ ($p \leq 0,05$)

Установиха се съществени различия в натрупаните стойности Cu при растенията отглеждани с вермикомпости в резултат на различната концентрация в продукта. Акумулираната Cu в растенията с 25% вермикомпост от вариант 1 бяха подобни на тези в контролата. Въпреки, че при тези растения концентрацията беше значително по-ниска от растенията с 50% вермикомпост, нямаше статистически доказани

разлики. Такива се установиха при растенията отгледани при 25% и 50% вермикомпост от вариант 2.

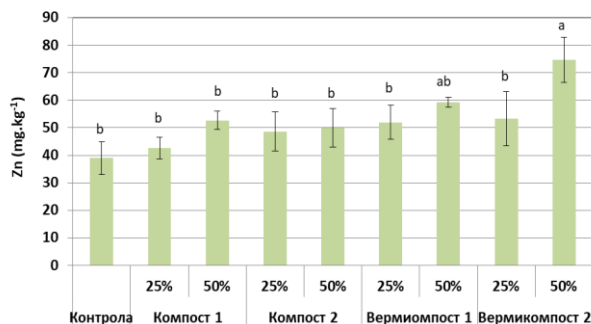
Натрупването на елементите в надземната маса на растенията зависи от тяхната концентрация и достъпност в почвата. В този смисъл, съдържанието на Си в компостите и вермикомпостите внасяни в почвата повлия на натрупването в растенията. Коефициентът на биоконцентрация на Си беше най-нисък при растенията отглеждани с внасяне на компост от В-2 (Фиг.33), въпреки по-високата концентрация на метала в компост от В-1. Това вероятно е резултат от по-слабата достъпност в компоста от В-2 поради по-високото съдържание на въглерод-съдържащи биополимери и недовършения процес на компостиране. Сходна стойност на КБ беше наблюдавана при растенията отглеждани в присъствие на 25% компост от В-1 и в двете концентрации от вермикомпост от В-1, докато при концентрация 50% КБ беше с около 36% по-нисък. Най-ниски бяха КБ на Си при продуктите от вариант 2. При компоста и при вермикомпоста се наблюдаваше намаление на КБ при вариантите с 50%. Въпреки, че концентрацията на Си в почвата беше по-ниска при контролата, КБ в този случай беше най-висок. От горните резултати се налага изводът, че по-високите концентрации на Си в компоста или вермикомпоста от В-2 имат като следствие по-слабо натрупване в надземната част на растенията в сравнение с В-1.



Фигура 33 Коефициент на биоконцентрация на Си в растенията от домати при различните варианти на опит №3

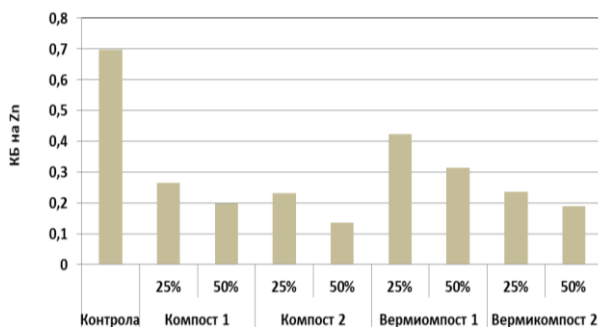
Съдържанието на Zn в компостите от В-2 беше по-високо с 42% от това във В-1. Тези различия не доведоха да статистически значими различия в концентрацията на елемента в листата на домати и в двете използвани концентрации (Фиг.34). При вермикомпостите беше наблюдавана по-голяма разлика в концентрацията на Zn между двата варианта в полза на В-2 (126,6%), което не доведе статистически значими различия в натрупването на елемента при $p \leq 0,05$. Различия се установиха

в съдържанието на Zn при растенията с внесен 50% вермикомпост от В-2 и растенията от всички останали варианти.



Фигура 34 Съдържание на Zn в листната маса на домати с внесени 25% или 50% компости от варианти 1 и 2. Данните показват средната стойност и стандартната грешка ($n=3$). Различните букви показват съществувачи разлики между вариантите при еднопосочен дисперсионен анализ ($p \leq 0,05$)

Коефициентът на биоаккумуляция на Zn следваше същите тенденции установени при Cu (Фиг.35). По-високата концентрация на Zn при компоста и особено при вермикомпоста от В-2 имаше като резултат по-нисък КБ на Zn. При вермикомпоста от В-1 КБ беше значително по-висок от този при компоста, докато при вариант 2 такава разлика се установи само при по-високата концентрация. И при двата варианта на компоста и на вермикомпоста по-високата концентрация в почвата на продукта от биологичното третиране доведе до по-нисък КБ на Zn.



Фигура 35 Коефициент на биоконцентрация на Zn в растенията от домати при различните варианти на опит №3

4.6. Анализ на съответствието на качеството на компостите и вермикомпостите с изискванията на Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.

Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци е основният нормативен документ, който регламентира допустимите биоотпадъци и биоразградими отпадъци за производството на компост (по смисъла на тази наредба, в тази категория попада и вермикомпостът, табл. А1-1 и А1-2). Също така, в нея се описват конкретно и изискванията за качеството на крайния продукт компост или органичен почвен подобрител.

В таблица 7 са обобщени резултатите за съответствието на компостите и вермикомпостите с изискванията на *Наредбата от 2017 г.* И при трите опита вермикомпостите отговарят на изискванията за краен продукт компост. При компостите, получени при опити 1 и 2, несъответствието е свързано с повишена електропроводимост и понижена кълняемост, което говори за незавършен процес на компостиране и недостатъчна зрялост на компоста. Компостите от опит 3 съответстват на изискванията, като известен недостатък е непостигане изцяло на изискуемия температурен режим. Въпреки това се наблюдава съответствие на изискванията по отношение на патогените.

Таблица 7 Съответствие на някои параметри при компостите и вермикомпостите от различните опити с изискванията на нормативната уредба

Параметри/Опити	Опит 1: Утайка+БрОСС	Опит 2: Утайка+БрОПГ	Опит 3: Комбиниран подход
Температурни изисквания	Да	Да	Частично
Органично вещество	Да	Не	Да
Влага	Да	Да	Да
Електропроводимост	Компост: Частично Вермикомпост: Да	Компост: Не Вермикомпост: Да	Компост: Да Вермикомпост: Да
Реакция на растенията/ изпитване за растеж	Кълняемост компост: Не Кълн. вермикомпост: Да Растеж: Да	Кълняемост компост: Не Кълн. вермикомпост: Да Растеж: Да	Кълняемост компост: Да Кълн. вермикомпост: Да Растеж: Да
Индикатор за патогени	<i>Salmonella</i> : Да <i>E. coli</i> : Да <i>Cl. perfringens</i> : Да	<i>Salmonella</i> : Да <i>E. coli</i> : Да <i>Cl. perfringens</i> : Да	<i>Salmonella</i> : Да <i>E. coli</i> : Да <i>Cl. perfringens</i> : Да

* БрОСС – биоразградими отпадъци от селското стопанство; БрОПГ – биоразградими отпадъци от паркове и градини

Важни параметри за качеството на крайния продукт (компости и вермикомпости) е концентрацията на тежки метали, тъй като много често тези елементи са налични в утайките от ПСОВ. Максимално допустимите концентрации на тежките метали са залегнали в табл. А2-1 и А2-3 на *Наредбата от 2017 г.* В някои случаи един продукт не успява да покрие изискванията за компост, но покрива тези за *органичен почвен подобрител*. Докато компостът може да се използва, както в земеделието и градинарството, така и за рекултивация на нарушени терени, то органичният почвен подобрител се използва в земеделието само при култури, които не се използват за храна или фураж, а за рекултивация на нарушени терени и депа и за ландшафтни дейности.

Резултатите от изследванията на компостите и вермикомпостите от опит 1 (Табл. 8) показват несъответствие с нормативните изисквания при компостите от вариант 1 (Cd, Cr, Cu, и Pb) и вариант 4 (Cr и Pb), което се отдава на по-високата концентрация на утайката в куповете за компостиране. Тези концентрации се намалиха по време на вермикомпостирането в резултат на периодичното оросяване за поддържане на подходяща влажност от 70-75%. Така се получи съответствие на вермикомпостите при всички варианти с изключение на концентрацията на Pb във вариант 1. В този смисъл, двата продукта на биологичното третиране от опит 2 отговарят на изискванията по отношение на концентрацията на тежките метали с изключение на Cd за вариант 1. При третия опит, където се използваха биоразградими отпадъци от селското стопанство и такива от парковете и градините, беше наблюдавано известно несъответствие с натрупаните концентрации. Това се прояви най-вече при компостите за Cd при двата варианта и при Cr, Cu и Pb за вариант 2. Вермикомпостите показаха съответствие с изключение на Cd и Cu при вариант 2.

Таблица 8 Съответствие на съдържанието на тежки метали в компостите и вермикомпостите с изискванията на нормативната уредба (до 2020 г.)

Параметри/ Опити	Опит 1: Утайка + БрОСС	Опит 2: Утайка + БрОПГ	Опит 3: Комбиниран подход
Cd	Компост: без В-1 Вермикомпост: Да	Компост: В-2 Вермикомпост: В-2	Компост: Не Вермикомпост: В-1
Cr	Компост: Без В-1, В-4 Вермикомпост: Да	Компост: Да Вермикомпост: Да	Компост: В-1 Вермикомпост: Да
Cu	Компост: Без В-1 Вермикомпост: Да	Компост: Да Вермикомпост: Да	Компост: В-1 Вермикомпост: В-1
Hg	-	-	-
Ni	Компост: Да Вермикомпост: Да	Компост: Да Вермикомпост: Да	Компост: Да Вермикомпост: Да

Pb	Компост: Без В-1, В-4	Компост: Да	Компост: В-1
	Вермикомпост: Без В-1	Вермикомпост: Да	Вермикомпост: Да
Zn	Компост: Да	Компост: Да	Компост: Да
	Вермикомпост: Да	Вермикомпост: Да	Вермикомпост: Да

4.7. Приложение на разработената технология за рециклиране на утайките в ПСОВ-Хисаря, ПСОВ-Сопот и ПСОВ-Карлово

Въз основа на резултатите и изводите в дисертационния труд, през 2017 г., заедно с ВиК – Пловдив, беше стартиран пилотен проект за оползотворяване на утайките генерирани от *ПСОВ – Хисаря*, съвместно с други биоразградимите отпадъци, на мястото на образуването им. За целта на проекта беше използван метод на аеробно компостиране последван от вермикомпостиране. Използваните биоразградими отпадъци бяха получени от озеленителните дейности в града. От 2011 г. до старта на проекта през май 2017 г. генерираните утайки от ПСОВ – Хисаря се депонираха на РДБО в Карлово, което е на разстояние 30 km от станцията. Годишното количество генерирани утайки с код (19 08 05) е в размер около 350-400 t. Готовият продукт вермикомпост от първата заложенa партида (50 m³) покри изискванията за компост на Наредбата от 2017 г. По този начин технологията се прилага успешно в последните години, като цялото генерирано количество утайки се компостира, а полученият вермикомпост се използва като качествен комплексен тор за поддържане на зелените площи на станцията.

През 2018 г. технологията за компостиране, последвано от вермикомпостиране на утайки от ПСОВ, съвместно с други биоразградими отпадъци, на мястото на образуването им, се приложи и на териториите на *ПСОВ – Сопот* и *ПСОВ – Карлово*. И двете станции разполагат с бетонни площадки предназначени за временно съхранение на обезводнената утайка. От 2011 г. до старта на проекта генерираните утайки от ПСОВ – Сопот са се депонирали на РДБО в Карлово, като годишното количество генерирани утайки с код (190805) от ПСОВ – Сопот е около 300 t, а тези от ПСОВ – Карлово е около 1500 t. Поетапно за компостиране беше заложенo цялото генерирано количество утайки от ПСОВ – Сопот (около 300 t./г.) и ½ от образуваното количество от ПСОВ – Карлово (около 750 t./г.). Използваха се и биоразградими отпадъци от градските озеленителни или селскостопански дейности (окосяна трева, сухи листа, дървесен чипс, бракувана слама). Количество готов продукт от първата заложенa партида на площадката на ПСОВ – Карлово беше около 60 m³, а от площадката от ПСОВ – Сопот около 50 m³, покриващи изискванията за продукт *компост* и *органичен почвен подобрител*,

съобразно *Наредбата от 2017 г.* В последствие продуктът беше използван за озеленителни цели.

Компостирането и вермикомпостирането на утайки от ПСОВ, на мястото на образуването им беше иновативен подход за нашата страна. В резултат на тези проекти се установи, че той може да се използва успешно за решаване на проблема с утайките при съществуващите малки и средни пречиствателни станции, а също така, да бъде залаган като последващо звено при изготвянето на проекти на нови пречиствателни станции. Това от своя страна би довело до изграждане на цялостна концепция за справянето на проблема с генерираните утайки от ПСОВ по иновативен, щадящ околната среда подход.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компостирането и вермикомпостирането представляват най-достъпните методи за превръщането на биоразградимите отпадъци в полезен продукт. Традиционното термофилно компостиране е методът, който най-често се използва за оползотворяване на утайките от ПСОВ. При него материалът преминава през термофилен етап (45-65 °C) на интензивна биодеградация, през който различни видове микроорганизми генерират топлина и спомагат за обеззаразяването на крайния продукт. Постепенно, през периода на зреене, хетерогенните входящи суровини се превръщат в хомогенна хумифицирана материя. По време на вермикомпостирането червеите фрагментират органичната материя, стимулират микробната активност и интензифицират биодеградацията и хумусообразуването. Комбинирането на компостиране последвано от вермикомпостиране доведе до задоволително ниво на обеззаразяване на субстрата, съкрати времето за стабилизиране на органичната материя и произведе продукт с желани характеристики, по-бързо от всеки от двата процеса осъществяван индивидуално.

Такъв тип комбинирано третиране на утайка от ПСОВ не е правено в нашата страна. То има потенциал да предложи решение на един съществуващ проблем при управление на отпадъците, какъвто е оползотворяването на утайките. Известно е, че компостите и вермикомпостите са продукти богати на полезни вещества, микро- и макроелементи имащи положителен ефект за растежа и развитието на различни растения, както декоративни, така и земеделски култури. В същото време, внасянето на компост в почвата повишава концентрацията на органично вещество, подобрява структурата, влагозадържаща способност, както и запасеността ѝ с важни за растежа и развитието елементи. Поради тези ефекти, биотестовите опити с домати и пипер показаха много по-добър растеж на растенията при прилагане на 25% или

50% компост или вермикомпост, спрямо контролата. Въпреки наличието на различни тежки метали в утайката, в растителната маса бяха установени само цинк и мед в концентрации сравними с обичайните за тези земеделски култури.

Компостирането на биоотпадъци се явява процес на оползотворяване и по-специално на материално рециклиране, обозначено с код R3 в Приложение № 1 към § 1, т. 11 на Заключителните разпоредби от ЗУО. То подпомага намаляването емисиите на парникови газове в атмосферата и има сериозен принос при изпълнение на целите по чл. 31, ал. 1, т. 2. В същото време, компостирането е и част от кръговата биоикономика, целяща намаляване използването на природни ресурси, при което „отпадъчните материали се преработват в продукти, материали или вещества за първоначалната им цел или за други цели“. Чрез него се намалява няколкократно обема на отпадъците, предотвратява се депонирането на общинските сметища, намаляват се средствата за транспорт и депониране. Полученият висококачествен продукт може да бъде използван успешно като безопасен комплексен тор при градските озеленителни дейности или в земеделието.

5.1. Изводи

Въз основа на получените резултати, може да се изведат следните по-важни изводи:

1. Технологиията на компостиране последвано от вермикомпостиране е вид *ex-situ* биоремедиация на утайки от ПСОВ, при която вторият процес увеличава ефективността от третиране и води до получаване на качествен продукт.

2. Оптималното време необходимо за получаване на качествен вермикомпост от утайки от ПСОВ в промишлени условия е между 180 и 230 дни. То може да се съкрати при коригиране концентрацията на утайките и на биоразградимите отпадъци, съдържащи целулоза и лигнин.

3. Използването на дървесен чипс над 30% от материалите, може доведе до забавяне на компостирането, недостатъчна трансформация на органичните вещества и да възпрепятства постигането на температури от 55-65 °C, които осигуряват обеззаразяване на материала. В същото време, при наличие на утайки от над 50% може да се получи непълно превръщане на амониевия азот в нитратен, което влошава качеството на получените компости и вермикомпости.

4. Оросяването на куповете с инфилтрат може да намали загубите на органогенни елементи по време на процеса, което е приложимо при утайки с ниско съдържание на тежки метали. Това ще повиши качеството на крайния продукт и запасеността му.

5. Съществува пряка корелационна зависимост между концентрацията на тежките метали в утайките от ПСОВ и концентрацията им в крайните продукти. Отвеждането на инфилтратата при компостиране и вермикомпостиране е подходящ подход за намаляване на тази концентрация, което прави възможно използването на утайки с повишени начални стойности от упоменатите в Приложение № 2 на *Наредбата от 2017 г.*

6. Вермикомпостирането е необходимо биологично третиране след компостирането на утайки, защото води до подобряване качествата на крайния продукт изразени в повишена кълняемост на семената и намаляване на електропроводимостта, но също така и до съществено намаляване на концентрацията на патогените *Salmonella* sp., *Escherichia coli* и *Clostridium perfringens*.

7. Компости и вермикопости получени от материали съдържащи до 50% утайка от ПСОВ и биоразградими отпадъци изпълняват в най-пълна степен изискванията на *Наредбата за разделно събиране на биоотпадъци и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.*

8. Растенията от домати и пипер отглеждани върху почвена смеска с компости или вермикопости от 25% или 50% образуват повече биомаса и са по-добре развити в сравнение с тези отглеждани само върху почва. Това показва добрият краен резултат от комбинираното биологично третиране.

9. Растенията отглеждани върху почвена смеска съдържаща компост или вермикопост натрупват единствено микроелементите Си и Зп, от тежките метали налични в утайките, а концентрациите им са в рамките на обичайните за културите.

10. Получените компости и вермикопости са богати на хранителни вещества и могат да се използват успешно в земеделието, озеленяването, за възстановяване на хранителния баланс при бедни и неплодородни почви, както и за рекултивация на нарушени терени.

5.2. Приноси

5.2.1. Научни приноси

1. За първи път в България се направи комплексно проучване на третирането на утайка от ПСОВ чрез компостиране и вермикомпостиране.

2. Изготвени са модели за оползотворяване на утайки от ПСОВ в земеделието, озеленителните дейности и за рекултивация на нарушени терени.

3. Установен е подход за намаляване на концентрацията на тежките метали произлизащи от утайката от ПСОВ при съвместно

третиране, така че да се получи краен продукт отговарящ на изискванията заложи в *Наредбата за разделно събиране на биоотпадъците и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.*

4. Установен е начин за намаляване загубата на органични елементи в крайните продукти посредством връщане на инфилтрат в системата чрез оросяване, при утайки с ниско съдържание на тежки метали.

5.2.2. Научно-приложни приноси

1. Извършено е подобрение в технологията на вермикомпостиране, като вместо т. нар. легла се приложиха използването на компостери.

2. Нагледно е демонстрирано действието на принципите на кръговата икономика чрез рециклирането на отпадъци от производството и превръщането им в крайни продукти компост и вермикомпост приложени в земеделието.

3. Разработената технология за рециклиране на утайки от ПСОВ се приложи съвместно с ВиК-Пловдив на мястото на образуване в ПСОВ-Хисаря, ПСОВ-Сопот и ПСОВ-Карлово. В резултат на това компостираната утайка възлиза на около 1050 t годишно, а получените *in-situ* вермикомпости покриват изискванията за продукт компост заложи в *Наредбата за разделно събиране на биоотпадъците и третиране на биоразградимите отпадъци от 2017 г.* и се използват като качествен комплексен тор за поддържане на зелените площи.

5.3. Списък на публикациите по темата на дисертацията

Получените при изследването резултати са докладвани на текущи научни форуми и публикувани в научни издания:

1. Д. Ангелова, Ст. Шилев, 2016. Оценка на съвместно компостиране на утайка от ПСОВ и биоразградими отпадъци от паркове за изпълнение изискванията за оползотворяване в земеделието. Сборник с доклади от „Екология и здраве“ 09-10 юни 2016 г., стр. 429-434, ISSN 2367-9530, <http://hst.bg/bulgarian/>

2. Angelova D., Shilev, S., Naydenov, M. 2016. Composting of sewage sludge at large scale for subsequent utilization in agriculture. In: (Filcheva, Stefanova, Ilieva eds). 4th Nat. conf. of BHSS. 8-10 Sept. 2016, Sofia, ISBN 978-619-90189-2-7, 285-295.

3. Shilev S., Azaizeh H., Angelova D. 2019. Biological treatment: a response to the accumulation of biosolids. pp. 149-178. In: Singh, D. P., Gupta, V. K., Prabha, R. (Eds.) Microbial Interventions in Agriculture and Environment, Vol. 2: Rhizosphere, Microbiome and Agroecology. Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-8383-0.

4. Angelova D., S. Shilev S. 2021. Composting and vermicomposting of biosolids for utilization in agriculture. Journal of Environmental Protection and Ecology 22 (3), 1030–1039.