

маг. инж. Светослав Стефанов Атанасов

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА МИКРОКЛИМАТИЧНИ
ПАРАМЕТРИ НА ПОЧВАТА ВЪРХУ ЦВЕТОВИ ПРИЗНАЦИ НА
ОРАНЖЕРИЙНИ ДОМАТИ С ОГЛЕД АВТОМАТИЗАЦИЯ НА
НАПОЯВАНЕТО**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на **ДИСЕРТАЦИЯ**

за присъждане на образователна и научна степен

“ДОКТОР”

по професионално направление

5.2. Електротехника, електроника и автоматика,
научна специалност “Автоматизирани системи за обработка на информация и
управление (по отрасли)”

Научни ръководители:

проф. д-р инж. Таня Иванова Пехливанова-Гочева

проф. д-р инж. Пламен Иванов Даскалов

Рецензенти:

- 1.
- 2.

Ямбол, 2024 г.

Дисертационният труд е с обем 199 страници и се състои от въведение, пет глави, общи изводи, приноси, 3 приложения и списък на цитираната литература със 142 източника, 11 от които на кирилица, 131 на латиница и 21 интернет източника. Дисертацията съдържа 75 фигури и 36 таблици.

В автореферата всички означения, номерацията на фигурите, таблиците и формулите са според означенията в дисертацията.

Докторантът е зачислен в редовна докторантура в катедра “Електротехника, електроника и автоматика” към факултет „Техника и технологии“ при Тракийски университет – Стара Загора.

Дисертационният труд е обсъден на 10.01.2024 г. на заседание на катедра „Електротехника, автоматика, компютърни системи и комуникации“ към Тракийски университет и насочен за защита пред научно жури.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2024 г. от ... : ... часа в залана ФТТ, на открито заседание пред научно жури, назначено от ректора на Тракийски университет.

Материалите на докторанта са на разположение на заинтересованите в катедра „Електротехника, автоматика, компютърни системи и комуникации“. Авторефератът е публикуван в сайта за развитие на академичния състав на университета.

Автор: маг. инж. Светослав Стефанов Атанасов

Заглавие: „Изследване на влиянието на микроклиматични параметри на почвата върху цветови признаци на оранжерийни домати с оглед автоматизация на напояването“

Списък на използваните съкращения

Δ	Максимална относителна грешка на $\bar{x}$
θ	Влажност на почвата, почвена влажност
A_1	Преди поливка (качествен фактор / фактор-признак)
A_2	След поливка (качествен фактор / фактор-признак)
B	Синя цветова компонента от модела RGB (количествен фактор)
C_1	Млади листа (качествен фактор / фактор-признак)
C_2	Стари листа (качествен фактор / фактор-признак)
FDR	Рефлектометрия във честотната област (Freq. Domain Reflectometry)
G	Зелена цветова компонента от модела RGB (количествен фактор)
H	Цветова компонента цветност от модела HSL (Hue)
HSL	Цветови модел (Hue Saturation Luminance)
L	Цветова компонента яркост от модела HSL (Luminance)
LAI	Leaf area index (Индекс на листната площ)
n	Брой измервания, големина на извадката
N	Брой променливи
NDVI	Нормализиран разликов вегетационен индекс
NIR	Near-infrared (Близък инфрачервен регион от електромагн.излъчване)
PA	Precision agriculture (Прецизно земеделие)
R	Червена цветова компонента от модела RGB (количествен фактор)
RGB	Цветови модел (Red Green Blue)
RS	Remote sensing (Дистанционно наблюдение, изследване)
s	Средноквадратично (стандартно) отклонение
S	Цветова компонента наситеност от модела HSL (Saturation)
t	Критерий на Стюдънт
T	Температура на почвата, почвена температура
TAW	Използваем воден запас (Total Available Water)
TDR	Рефлектометрия във времевата област (Time Domain Reflectometry)
UAV	Unmanned aerial vehicle (Безпилотни летателни апарати)
VWC	Обемно водно съдържание (Volumetric Water Content)
$\bar{x}$	Средна (средно-аритметична) стойност на x

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Запасите от прясна вода за напояване трябва да се използват пестеливо и разумно, тъй като водата е безценен природен ресурс, който е в недостиг в голяма част от Земята. Напояването е от решаващо значение за продуктивността на земеделието в световен мащаб. Въпреки това, ефективността на използване на водата за напояване и опазването на водните ресурси често са по-ниски, отколкото се очаква. Изчислено е, че селското стопанство използва *над 70% от световните запаси от прясна вода, като около половината от тях се губят и пилеят*.

Според Програмата за развитие на ООН (United Nations Development Programme) от 2021 г., глобалните системи на селското стопанство и храните са под постоянен огромен натиск. Смята се, че до 2050 г. световното население ще нарасне до почти 10 милиарда души и за да бъде то изхранено, настоящото производство на храни трябва да бъде увеличено с 59-98%. В световен мащаб около една трета от произведената храна се губи или се изхвърля. Селскостопанските хранителни продукти са в основата на Програмата 2030 на Обединените нации и оказват влияние върху всички 17 цели за устойчиво развитие.

През 2019 г. двадесет и шестте държави-членки на ЕС подписват декларация за сътрудничество в подкрепа на успешна цифровизация на селското стопанство и селските райони в Европа. В нея те признават потенциала на цифровите технологии за подпомагане в справянето с важни и неотложни икономически, социални, климатични и екологични предизвикателства, пред които са изправени сектора на селскостопанските хранителни продукти и селските райони на ЕС.

През 2022 г. Организацията за прехрана и земеделие на Обединените нации (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) призовава към спиране деградацията на почвата. До 95% от световното производство на храни зависи от почвата. В резултат на неустойчиви земеделски практики, прекомерната експлоатация на природните ресурси и нарастващото население една трета от почвите вече са деградирани и експертите изчисляват, че ерозията на почвата може да доведе до 10 процента загуба на реколтата до 2050 г. Почвите също са пълни с живот и съдържат приблизително 25% от световното биоразнообразие.

Обект на изследването е цветът на листната маса на домати насаждения (*Solanum lycopersicum*) и влиянието на параметри на микроклимата в оранжерията (влажност и температура на почвата) върху него. Листната маса е изследвана при четири качествени фактора - млади листа (C_1) преди (A_1) и след поливка (A_2), стари листа (C_2) преди и след поливка. Цветът на листната маса на домати се установява с помощта на експериментално изследване. Изследвани са индетерминантни домати от сорт Панекра. Засадени са в края на юли. Експериментите са провеждани през септември - 24 часа след напояване и 24 часа преди поливка.

Цел и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е да се разработи автоматизирана система за отдалечено автономно наблюдение на посева и управляване процеса на поливане.

Задачите, които е необходимо да се решат за постигане на поставената цел са следните:

1. Разработване на интелигентен и евтин метод за директно получаване на стойности на почвената влага въз основа на промяната на цвета на листата на домати растения в оранжерия, чрез избор на информативни

- количествени (цветови – RGB и HSL) и качествени (млади-стари листа, преди-след поливка) признаци.
2. Изследване на връзката между цвета на листата на оранжерийни домати и микроклиматични параметри.
 3. Проверка на точността на получените модели.
 4. Разработване на модел на система за отдалечено автономно наблюдение на посева и автоматично управление на процеса на поливка.

Методи на изследването

Експерименталните изследвания описани, в Глава II са проведени в отопляеми стъклени оранжерии на фирма „Ния“ ЕООД), намиращи се в Пловдив (собственост на доц. Николай Вълчев от Аграрен факултет при Тракийски университет), където всички параметри на околната среда и здравето на растенията се поддържат в оптимални граници. Разработена е методика за събиране на данни, която може да се използва и при други обекти и условия на изследвания.

Експерименталните изследвания, описани в Глава IV са проведени в лабораторни условия.

Обработка на получените цветови и почвени данни включва статистически оценки на изследваните признаци, построяване и анализ на хистограми за определяне на нормалното разпределение, двуфакторен регресионен и многофакторен дисперсионен анализ.

При избора на информативни количествени фактори за определяне нуждата от поливка е използвана нелинейната оценка (Nonlinear Estimation) от типа частично-линейна регресия (Piecewise linear regression) в програмният продукт за статистическа обработка на данни Statsoft Statistica.

Научна новост на изследването

Цветът на здрави домати листа се използва като индикатор за необходимостта от поливане и е свързан с директна оценка на водния статус на растенията и стойността на почвената влажност.

Доказано е наличието на нелинейна връзка между изследваните една зависима (цветови компонент) и две независими променливи (θ и T), посредством модели (3.4) и (3.5) показващи висок коефициент на детерминация R^2 между цветовете компоненти и влажността и температурата на почвата.

Изследвани са количествените (цветови – RGB и HSL) и качествени (млади-стари листа, преди-след поливка) признаци. Установи се, че най-информативни за нуждата от поливка са младите листа преди поливка.

Практическа полезност на изследването

Предложеният подход е изцяло насочен към използване на метод, който е достатъчно ефективен по отношение на бърза и директна оценка стойността на почвената влажност и в същото време даващ задоволителна точност.

На база създадените модели е разработена програма, която се използва не само за получаване и обработка на цифрови изображения, но и за управление на автоматизирана поливна система.

Апробация на работата

По темата на дисертационния труд има направени 5 публикации. Две от тях са отпечатани в Сборник научни трудове на Русенски университет „Ангел Кънчев“, една в Сборник научни трудове от XXIV Международна научна конференция "Мениджмънт и качество" за млади учени. Останалите две публикации са в индексирани в Scopus

Обем и структура на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от въведение, пет глави, общи изводи и приноси. Той е с обем от 199 страници, в които са включени 75 фигури и 36 таблици. Номерата на включените в автореферата фигури, таблици и формули съвпадат с тези в дисертационния труд. Библиографията обхваща 142 заглавия, 11 от които на кирилица, 131 на латиница и 21 интернет източника.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО

В глава първа е разгледана актуалността на проблема, свързан с използваните в момента методи и техническите средства за отдалечено наблюдаване на растителните и почвените параметри в агри-културните практики. Разгледани са както съвременните дигитални софтуерни и хардуерни технологии, намиращи приложение в селското стопанство и прецизното земеделие, така и използваните за това сензори. Направен е анализ на съвременните методи и технологии за дистанционно изследване (RS) на растителни и почвени параметри в селското стопанство, използвайки подхода от общото към частното, започвайки от RS на културите и почвената влажност на глобално ниво, преминавайки през ниво поле (посев), RS на културите и почвената влажност на ниво оранжерия, след това на ниво растение и накрая е анализирано RS на културите на ниво листо. Направен е също преглед на съвременните авангардни технологии в това отношение. Представени са характеристики и стопанското значение на растението домати в национален и в световен мащаб.

Доматите изискват стотици литри вода на квадратен метър. Изследване отбелязва, че средно 300-400 L вода се използват за производството на 1 kg пресни домати, което показва, че използването на вода за напояване е изключително високо. Авторите посочват, че две други неща са специфични за поливането на домати: те изискват умерено количество влага в почвата, а ако се прекали с поливането, за кратко време образуват мощна вегетативна маса и по-малко плод. Друг важен факт, произтичащ от „удавянето“ е, че домите са доста чувствителни към недостига на кислород в почвата.

Доматите губят повече от 90% от водата, която абсорбират чрез транспирация от листата си, следователно листата са по-податливи на воден стрес, отколкото други органи като плодовете.

От друга страна, по време на процеса на напояване, по-голямата част от водата се оттича в почвата и само малка част от нея се абсорбира от растението. Това нагала водата да се пести, защото тя е безценен природен ресурс, който е оскъден в много региони на нашата планета.

Съществуват множество различни методи и сензори за измерване и изследване параметрите на селскостопанските култури и влажността на почвата – директни и индиректни, безжични или не, дистанционни или проксимални. Като цяло те са скъпи, особено когато са безжични или ако пък са кабелни, това пречи на инфраструктурата в нивата или оранжерията. Процесът на измерване на растителните и почвените параметри е трудоемък, дори непосилен за земеделски полета с огромен размер от няколко хиляди ha, тъй като параметрите не са еднакви навсякъде и разполагането на хиляди сензори е ненужно скъпо.

След анализа на литературата може да се направи извода, че липсва информация цветът на листата да се използва като индикатор за необходимостта от поливане и по-точно да е свързан с директна оценка на стойността на почвената влажност.

Всичко това изисква търсене на алтернативен, по-интелигентен подход за определяне на връзката между напояването и количеството на абсорбираната вода. Метод, който предоставя информация, че растението е добре напоено и който елиминира недостатъците на наличните сензори. Този метод трябва да бъде достатъчно обективен, за да осигури оптимално напояване и пестене на вода.

Този труд предлага малко по-различен подход, базиран на физическо наблюдение на растенията. Задача е да бъде предложен индиректен интелигентен, бърз метод, потвърждаващ дълггодишните наблюдения на фермерите.

Авторът на това изследване смята, че самите растения могат да бъдат един вид биосензор или „високотехнологичен био-елемент“ (high-tech biogadget), индикатор за почвената влага въз основа на промяната на цвета на листата на доматени растения в оранжерия и чрез моделиране на тази взаимовръзка да се прогнозира нуждата от поливка.

ГЛАВА II. ОБЕКТ И МЕТОДИКИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

В настоящата глава са описани обектът на изследването и приложените методики. Представени са мястото, условията на измерване, използваните при експериментите измервателни уреди и характеристиките на почвата в оранжерията. За проследяване на връзката между параметри на микроклимата в оранжерия и определени характеристики на растението домати, е направено проучване на съществуващата терминология на български и английски език с цел да се уточнят понятията, с които ще се бори в следващите етапи на изследването. За тази цел е извършено следното:

- Направен е преглед на параметрите и понятията, използвани при измерване на почвената влажност.
- Проучена е взаимовръзката между обемното водно съдържание, гравиметричното водно съдържание и обемната плътност.
- Проучени са английските аналози на термините, някои от които коренно се различават от българските им аналози.
- Дадени са конкретни реални примери за влажностни параметри на някои от типовете почви в региона на Пловдив, където се провежда и дисертационното изследване.

Проведено е калибриране на FDR безжичен сензор за почвена влажност при специфичната почва в оранжерията, за постигане на възможно най-добрата точност на измерванията на VWC в нея. Изведено е калибрационно уравнение и е получен коефициент, с който трябва да се коригират измерените показания за почвена влажност.

При конкретния тип почва се наблюдава трудност при работата с нея след снемане на петото отчитане – става прекалено лепкава, трудно поема повече вода и трудно се взема почвена проба с желаната обемна плътност.

Получените резултати за VWC кореспондират с предварително известни за алувиално-ливадният тип почва.

Поради нееднородността на напояването е нужно или да бъдат разположени множество сензори за влажност (което е скъпо) или да се предложи по-интелигентен подход за установяване на влажността, какъвто е предложен в Глава III и Глава V.

Описана е създадената и приложена методика при събирането на данните за почвена влажност и цвета на листата.

Определен е по четири способа необходимият минимален размер на извадката при провеждане на полеви експерименти.

Изследванията се провеждат в отопляеми стъклени оранжерии на фирма „Ния“ ЕООД, намиращи се в Пловдив, където *всички параметри на околната среда и здравето на растенията се поддържат в оптимални граници*. За отоплението им през зимния период се използва топла вода от намиращ се в съседство ТЕЦ – водно отопление. Размерите на оранжерията са около 50 m на 35 m (в дължина 15 колонки по 3 m, в широчина всеки ред е по около 2 m. Доматите тук се отглеждат целогодишно в рамките на две реколти (от януари до юли и от август до декември).

Оранжерията разполага с два термометъра за минимална и максимална температура, показанията на които задействат капациите - например при 24°C се отварят, а при 22°C се затварят. През лятото, когато температурата е винаги висока „прозорците“ стоят постоянно отворени. Когато се следи 24 часа температурата, е важно не само до колко тя е паднала, а и за какъв период – половин час или два часа е била минимална. Също има значение и разликата между външната и вътрешната температура.

2.2. Инструментариум

Инструментариумът включва:

- Безжичен сензор за измерване влажността на почвата;
- Безжичен сензор за измерване температурата на почвата;
- Колориметър за измерване цвета на листната маса;
- Комбиниран уред за измерване на влажността и температурата на въздуха и осветеността;
- Статистическа обработка на данните е проведена в Русенския университет, използван е продуктът Statsoft STATISTICA 10.01.11;
- Цифрова фото-камера за документиране на процеса;
- Преносим компютър.

2.3. Почва в оранжерията

Почвата в оранжерията е алувиално–ливадна. Основните ѝ водно-физични свойства се характеризират със следните показатели за слоя 0-40 cm: обемната плътност е 1,33 t/m³, влажността при ППВ е 30,9% и максималният воден запас е 164,4 mm. Големината на поливната норма (m) се изчислява за навлажняване на слоя 0 – 0.40 m, като при това е поддържана предполивна влажност над 80% от ППВ.

Алувиално-ливадната почва е с нисък използваем воден запас (TAW=116 mm m⁻¹). Състои се основно от пясък – от 68% за повърхностния до 53% и по-ниско разположените хоризонти. Съдържанието на физическа глина е от 9% до 22%. Хидравличната проводимост при насищане се колебае от 62-82 cm day⁻¹ до 10 cm day⁻¹ в глинестия почвен слой 60-100 cm.

2.5. Калибриране на сензора за конкретния тип почва

2.5.1. Инструменти за измерване на водно съдържание in situ

При полевите измервания стойността на водното съдържание се получава на място посредством измервателни уреди по косвен способ, например в резултат от зависимостта между параметри като диелектричната константа/проницаемост на почвата и актуалното водно съдържание и т.н.

Съществуват следните инструменти – сонда за неутронна термализация, двуиглова сонда с топлинен импулс и сонди, базирани на връзката между водното съдържание и диелектричната ѝ проницаемост (диелектрични инструменти).

Неутронната термализация е най-старият метод. Методът използва малък радиоактивен източник като инструмент, който излъчва в почвата епитермални неутрони, които взаимодействайки с водорода в почвата забавят своето движение. Количеството на създадите се термонеутрони може да се свърже с количеството водородни атоми в почвата и оттам с количеството влага в нея. Отчитането става от 14 sec до 2 min, а обемът на измерване/влияние е от 10 до 20 cm в радиус (най-голям), в зависимост от водното съдържание. Недостатъци са радиацията, тежкото и скъпо оборудване (цялата система за около \$5000).

При метода с топлинен импулс се използва факта, че промяната в способността на почвата да съхранява топлина строго зависи от водното съдържание. Може да се създаде калибриране, което свързва способността за съхраняване на топлина на почвата с VWC. Едната игла съдържа нагревател, а другата устройство за измерване на температурата. Използва се пикът на температурата, калкулира се топлинния капацитет и се конвертира в VWC. Нужен е регистратор с прецизно температурно измерване и тези устройства са много чувствителни поради малкото разстояние между иглите и много чувливи.

Диелектричните инструменти използват или рефлектومتрия във времевата област (Time domain reflectometry, TDR), или рефлектومتрия в честотната област (Frequency domain reflectometry, FDR) – капацитивни диелектрични сензори.

При TDR се създава импулс електромагнитна радиация, който отива до сондата и се връща. Времето, за което зарядът се намира в самата сонда е в пряка зависимост със способността на почвата около сензора да съхранява част от електромагнитния заряд. А тази способност се създава именно от водата, намираща се в почвата. Тези системи са много скъпи и сложни (\$4000-8000).

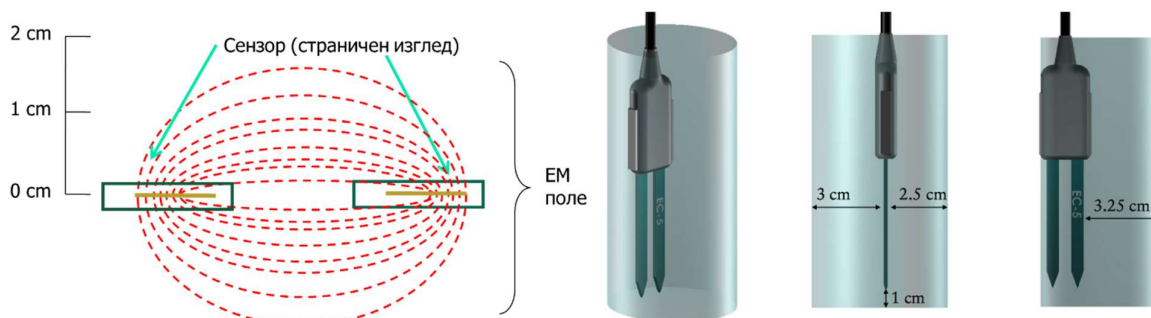
В настоящия експеримент е избран FDR сензор, поради достъпната му цена (регистратор на данни, приемник и сензор в рамките на няколко стотин долара), актуалността му и лесна приложимост от фермерите. Другото му предимство е, че е безжичен, а принципът му на действие е обяснен в следващата точка.

2.5.2. Материали и методи

VWC се получава по косвени метод посредством диелектричната проникваемост на всички материали съставляващи почвата. Диелектричната константа на водата е около 80, тя е безмерна величина, която описва колко добре материалът задържа електричния заряд. Промяната в обема ѝ най-много повлиява промяната на диелектричната проникваемост на почвата, от което пък се възползват напр. диелектричните капацитивни сензори, които са калибрирани да извеждат водата, попаднала в него и оттам стойностите на VWC **директно** на база промяната в заряда на полето.

Сензорът създава електромагнитно поле, водните молекули се подреждат в това поле и съхраняват част от заряда между двете плочи на кондензатора. Калибрирането на тези сензори представлява изчисляването на отношението на съхранявания заряд към VWC и по този начин обема на водата, попаднала в него (което представлява линейна зависимост). Разликата от конвенционалните кондензатори тук е, че плочите на сензора са в една равнина, както е показано на фиг. 2.10, вляво.

Като малък недостатък може да се посочи сравнително малкия обем на измерване (около 0.3 L обем почва; фиг. 2.10, вдясно), което може да бъде компенсирено с множество измервания.



Фиг. 2.10. Принцип на действие на FDR сензор (вляво) и идеализиран обем на измерване на сензор EC-5 (вдясно)

2.5.3. Калибриране на капацитивен (FDR) сензор за специфична почва

HOBOnode сензорите за почвена влага са калибрирани заводски с точност 3,1% (m^3/m^3) и са предназначени за повечето често срещани типове почва.

Калибрирането свързва диелектричната константа на почвата с VWC на даден известен тип почва. За да се провери коректността на калибрирането за специфична почва или ако се изисква да се постигне по-добра точност, напр. 1% VWC, или ако се измерва влажност при нетипична почва е необходимо да се следват посочените по-долу стъпки за персонално калибриране.

Калибрирането се извършва по стандартната процедура за калибриране на капацитивни сензори описана от Starr и Palineanu.

2.5.3.1 Подготовка на почвата

От коренообитаемия слой се взема около 3,8 L почва. Едновременно с това се вземат няколко проби ненарушена почва с уред за почвени проби за да се измери полевата обемна плътност в лаборатория.

Почвата се оставя да изсъхне напълно при естествени условия, след което големите буци се разчупват и почвата се сити, посредством сито с големина на отворите 5 mm.

2.5.3.2. Извършване на измерванията

Почвата се поставя на слоеве и се компактизира добре в калибрационен контейнер, имитиращ полевата почвена плътност (кофичка в която може да се побере сензора заедно с електрическата част вертикално).

Снема се показанието на сензора. Измерването се повтаря няколко пъти при тази почва за да се види коректността на измерването – ако е коректно измерването, получаваме еднакви стойности на отчитане.

После близо до сондата, без да се изважда, се взима проба от калибрационния контейнер с обемен уред за вземане на почвени проби с предварително известен обем. Единственото изискване за уреда за вземане на почвени проби е да се взема почвена проба, без промяна на обемната плътност на почвата.

Взетата проба се поставя в огнеупорен контейнер. Контейнерът за почвено изсушаване може да бъде всеки контейнер подходящ за сушене в пещ и има затваряща се капачка (подходящо е и малко стъкло бурканче с вместимост/обем до 200 ml).

Измерва се масата на всеки сух и чист контейнер за сушене и стойността се записва в табл. 2.6. Нужна е везна с точност 0,01 g или по-висока.

За пещ или сушилня може да послужи всяка, която може да поддържа стабилна температура от 105-110°C. Така се получава първата точка от калибрационната крива. Продължава се с другата точка.

Почвата се връща от калибрационния контейнер в по-голям контейнер и се добавя около 300 ml вода. Бърка се до хомогенна смес. Повтарят се стъпките по вземане на показанието на сензора и вземане на почвена проба с уред.

Продължава се с този процес докато почвата стане пренаситена с вода.

Пробите от уреда за вземане на почвени проби се претеглят и се поставят в сушилни за 24 часа на 105°C за да се изпарят двата вида вода (свободна и свързана). След това пак се измерват. Разликата в теглата е водата, която е била в пробите. Целият процес създава 5-7 калибрационни точки. Следвайки горните стъпки, при изследвания тип почва (алувиално-ливадна от региона на Пловдив) се получават изложените в табл. 2.6 резултати:

Таблица 2.6

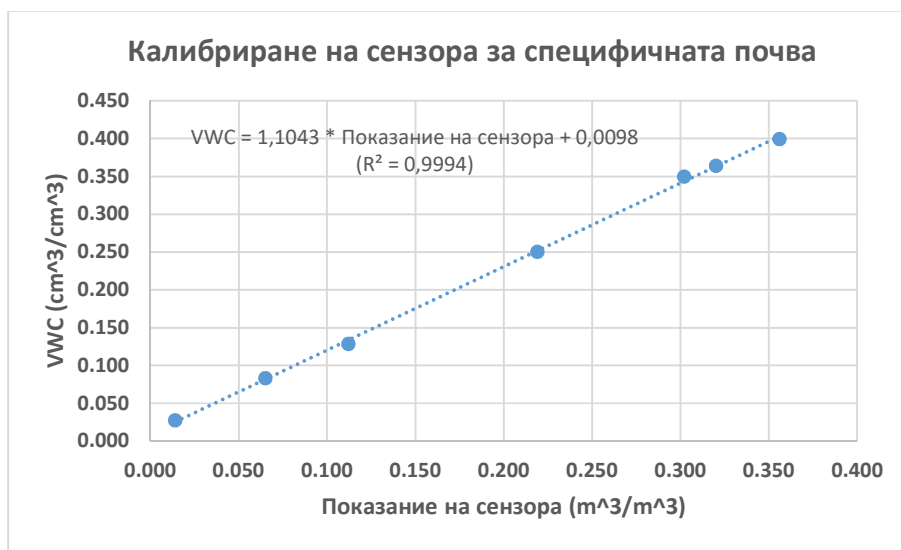
Експериментални данни

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	номер проба	показание на сензора (m ³ /m ³)	буркан маса (g)	обем на пробата (cm ³)	маса на влажната почва + контейнера (g)	маса на сухата почва + контейнера (g)	маса и обем на водата (cm ³)	маса на сухата почва (g)	обемна плътност на почвата (g/cm ³)	VWC (cm ³ /cm ³)
2							=E3-F3	=F3-C3	=H3/D3	=G3/D3
3	1	0.014	111.2520	15.1976	122.9368	122.5197	0.4171	11.2677	0.7414	0.0274
4	2	0.065	112.5420	15.1976	124.9086	123.6483	1.2603	11.1063	0.7308	0.0829
5	3	0.112	113.7894	15.1976	128.0340	126.0835	1.9505	12.2941	0.8090	0.1283
6	4	0.219	113.707	15.1976	131.9514	130.6577	1.2937	16.9512	1.11539	0.2500
7	5	0.302	114.2420	15.1976	134.8693	129.1012	5.7681	14.8592	0.9777	0.3495
8	6	0.320	112.0303	15.1976	135.3706	129.8417	5.5289	17.8114	1.1720	0.3638
9	7	0.356	111.0464	15.1976	133.7150	127.6453	6.0697	16.5989	1.0922	0.3994

2.5.3.3. Конструирание на калибрационна функция от получената графика

Създава се графика с VWC по Y и показанията на сензора по X. Отношението често е линейна функция, но особено при почви с високо съдържание на органична материя то най-добре се изразява с квадратно уравнение.

За създаване на математическия модел на взаимоотношението между двете величини се използва линията на регресията, както е показано на фиг. 2.12:



Фиг. 2.12. Графика с експерименталните данни. Калибрационното уравнение за специфичния тип почва е показано в горния ляв ъгъл на графиката

Това уравнение се прилага към показанието на сензора (умножава се по коефициент 1,1). Ако се използва следящ софтуер може да се приложи директно в него, или да се използват последващи обработки на данните в програми като Excel.

2.6. Описание на създадената и приложена методика при събирането на данните за почвена влажност и цвета на листата

Експериментите са провеждани в различни метеорологични условия, при ясно и слънчево време, влажност в оранжерията 73%, температура 25,7°C, влажност извън оранжерията 65,8%, температура извън оранжерията 25,5°C, осветеност в оранжерията 39-47 kLx. Или при облачно и дъждовно време, влажност в оранжерията 84%, температура в оранжерията 19,8°C, влажност извън оранжерията 85,8%, температура външна 16,8°C и осветеност в оранжерията 5,2-6,2 kLx

Изследванията са проведени в края на отделен специално за целта ред. Изследваният участък е с дължина от 15,53 m с контролирано напояване посредством две кранчета. Преди първото кранче, навътре в оранжерията, както и за цялата оранжерия, поливната норма е 30 m³/декар. Между първото и второто кранче е 20 m³/декар и след второто кранче накрая към бетоновата пътека е 10 m³/декар. Наторяването се осъществява, като се разтвори 20 kg тор и разтворът се пуска за капково напояване с водата с доза 20 m³/декар.

На база на натрупания опит по време на експериментите е създаден следният план на експеримента или следната методика за събиране на данни, на която може да се даде името „12-9-6-3“:

Изследвани са 12 произволно избрани растения (по няколко от всеки от трите участъка на реда) - 9 за създаване на математичен модел и 3 за тестване на модела (преди поливка). При измерванията е използвана шесткратна повтораемост за младите листа и трикратна повтораемост за старите листа - 6 стойности на цвета са взети на случаен принцип от различни листа от короната (върха) на всяко изследвано растение, а 3 стойности на цвета са взети хаотично от най-ниските им листа.

Младите листа са новите, непълно развити листа на върха на растението (или в неговата горната част). Старите листа са големи, напълно развити листа в долната част на растението.

За улеснение на процеса растенията се маркират с лесно видим напр. ален конец (фиг. 2.1). Измерените данни се въвеждат в създаден за целта полеви дневник.

RGB показанията за всяко растение са усреднени с точност до втория знак, въпреки че RGB компонентите нямат дробна част.

Влажността на почвата (θ) и температурата на почвата (T) са измерени многократно и усреднени, близо до растението и корена, в пласта почва 20-30 cm, който е и коренообитаемия.

2.7. Методи за определяне големината на извадката

На база търсения в литературата са систематизирани следните известни начини за определяне обема на извадката:

2.7.1. Извадка $n \geq 30$

Според централната пределна теорема средната стойност за извадката има приблизително нормално разпределение за големи извадки, дори и ако генералната съвкупност няма нормално разпределение. Ето защо проверката за нормалност на данните се прави само при малки извадки. Съществуват различни дефиниции за голяма и малка извадка. В повечето случаи се смята, че извадката трябва да е $n \geq 30$ като понякога се изисква дори $n \geq 50$, за да се смята за голяма. Приема се, че голяма

е извадката, за която броят на наблюденията е равен или по-голям от 30, т. е. $n \geq 30$. Числото 30 е експертно дефинирано и проверено без да следва от конкретен природен закон, теорема или аксиома.

2.7.2. Спрямо Критерий на Стюдънт

$$n = \left(\frac{t_{\gamma;k} \cdot s}{\bar{x} \cdot \Delta} \right)^2, \quad (2.1)$$

където n е брой измервания, големина на извадката

$t_{\gamma;k}$ е критерий на Стюдънт (от таблица), където $\gamma = 0,95 \div 0,99$ (т.е. при 95-99% гаранционна вероятност или ниво на значимост)

s е *опитно получено* средно-квадратично (стандартно) отклонение

$\bar{x}$ е *опитно получена* средно-аритметична стойност на x

Δ е максимална относителна (допустима) грешка на $\bar{x}$; $\Delta \in [5 ; 10 \text{ \%}]$

$$\Delta_{\gamma;k} = \frac{t_{\gamma;k} \cdot s}{\bar{x} \cdot \sqrt{n}} \cdot 100 \text{ \%}, \quad (2.2)$$

или

$$n = \left(\frac{1,96 \cdot 20,29}{118,88 \cdot 0,05} \right)^2 = 44,77, \quad (2.3)$$

2.7.3. С помощта на таблиците на Коен

Размерът на извадката е един от най-важните фактори, който влияе на силата на теста. Коен показва, че силата на теста от 0.80 и повече е достатъчна да се открие средната големина на ефекта при зададено ниво на статистическа значимост алфа от 0.05.

Тогава, за да се намери необходимият размер на извадката N трябва да се отчитат следните четири фактора: (1) коефициентът алфа α (обикновено $\alpha = 0.05$); (2) силата на теста (обикновено е равна на 0.80), (3) големината на ефекта (за средна големина на ефекта се приема $d = 0.35$) и броя на предикторите (два – влажност и температура на почвата). Като се зададат горните четири параметъра с помощта на таблиците на Коен или чрез специализирани компютърни програми се изчислява необходимият размер на извадката N преди да е започнало нейното събиране:

$$N = 31, \quad (2.4)$$

2.7.4. Отношение извадка/независими променливи

Минималното количество наблюдения, което е необходимо, за да се проведе регресионният анализ зависи както от броя на независимите променливи, които ще бъдат анализирани, така и от типа на регресионния модел. Няма еднозначен отговор за минималното количество наблюдения, но най-често се използват следните правила:

- 1) Броят на наблюденията трябва да е поне $N = 40 + k$, където k е броят на независимите променливи (в настоящото изследване $N = 42$)

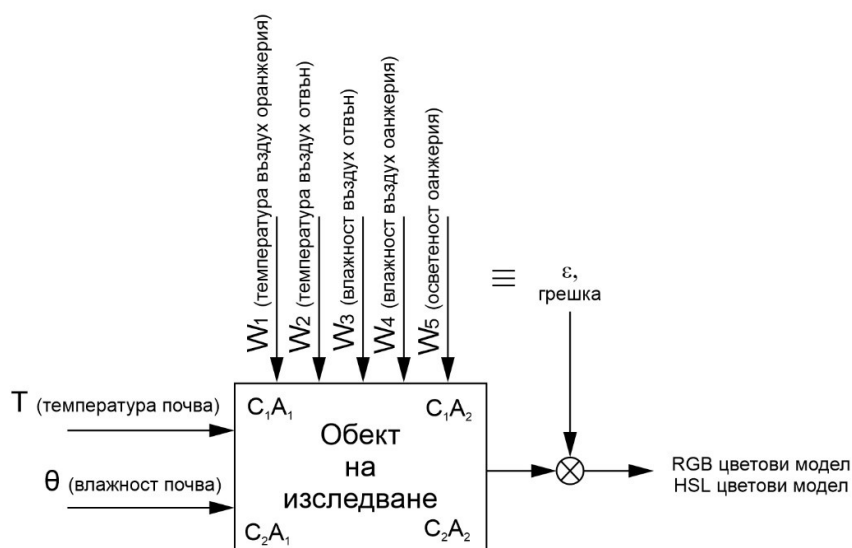
- 2) Препоръчителна извадка е около 15 наблюдения на независима променлива: $N = 15k$ (в настоящото изследване $N = 30$)

В настоящото изследване са взети ръчно с помощта на колориметър 168 цветови проби (84 RGB и 84 HSL) преди и 168 цветови проби (84 RGB и 84 HSL) след поливка, с които в следващата Глава III са извършени регресионен и дисперсионен анализи и са получени модели на зависимостта между цветови компоненти и параметри на микроклимата.

ГЛАВА III. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАВИСИМОСТТА МЕЖДУ ВЛАЖНОСТТА И ТЕМПЕРАТУРАТА НА ПОЧВАТА И ЦВЕТОВИ КОМПОНЕНТИ

3.1. Представяне на обекта на изследване от гледна точка на факторите

По отношение на факторите, които предполагаемо му въздействат и по отношение на факторите, които са сметнати за важни за измерване при този експеримент (на база на експертна оценка от собственика на оранжерията), изследваният обект в дисертацията е многофакторен на входа, на който действа управляемият фактор θ (влажност на почвата) и неуправляемият, но измерим фактор T (температура на почвата). Влиянието на всички останали случайни / смущаващи (W_1 - W_5) и неотчетени фактори е заменено еквивалентно със случайната грешка ε (съвкупно смущаващо въздействие) (фиг. 3.1).



Фиг. 3.1. Обект на изследване с един управляем и един неуправляем фактор

Разгледаната по-горе фигура съответства на т.н. активно-пасивен експеримент и е характерна за реалните обекти.

От гледна точка на математическата обработка на резултатите от многофакторни експериментални изследвания, не е необходимо входните фактори да се разделят на две групи – управляеми и измерими. Ето защо оттук нататък факторите θ и T са разглеждани като независими променливи, а цветовете компоненти като зависими променливи, зависещи от θ и T .

Задачата е да се намери функционална зависимост, описваща връзката между средната стойност на параметрите на цветовете компоненти и факторите θ и T . Използван е принципа на постепенно усложняване на модела, т.е. прехода от по-прости към по-сложни модели, докато се достигне до адекватен на обекта модел.

Понеже факторите θ и T са *измерими* връзката между тях и средната стойност на всеки един компонент на цветовете модели (признак) е проучена чрез методите на *многофакторния регресионен анализ*.

Понеже фактор-признаците „преди/след поливка“ и „младо/по-старо листо“ са качествени тяхното влияние е проучено посредством *многофакторен дисперсионен анализ*.

При изследването на нормалното разпределение е използван целият набор от получените опитни данни (случайни величини), а при регресионния и дисперсионния анализ е работено с усреднените стойности на цветовете компоненти за всяко растение (R_{cp} , G_{cp} , B_{cp} , H_{cp} , S_{cp} , L_{cp}).

3.2. Изследване на разпределението на цветовете компоненти (случайните величини)

Първо е изследвано разпределението на получените експериментални данни за цветовете компоненти за всяко растение. Използвани са направените 168 измервания на листатата преди и 168 измервания на листатата след поливка. Определени са стандартното отклонение и коефициентът на вариация за всяка от измерваните цветови компоненти.

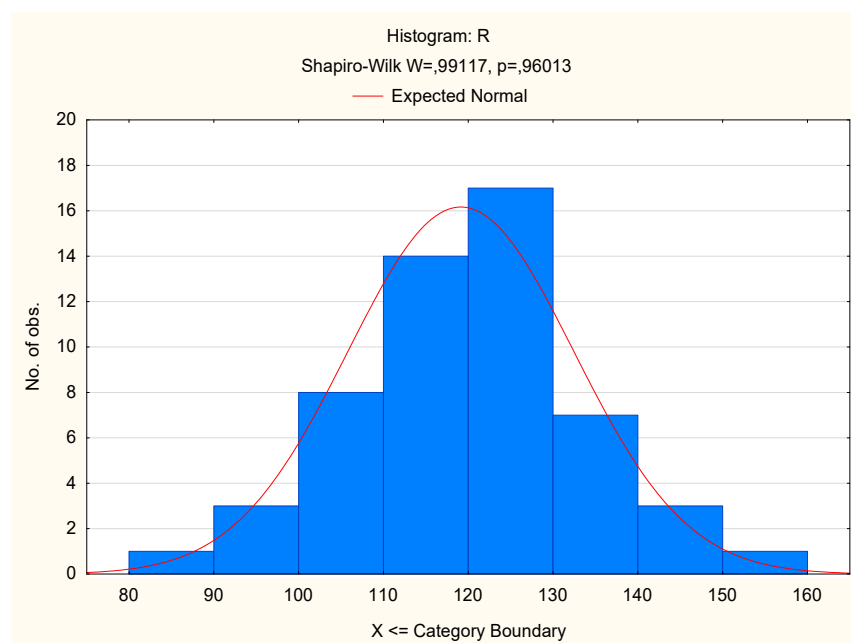
Според предварителна хипотеза, на база дългогодишни наблюдения на растенията на ниво посев от опитни фермери и учени от аграрни университети когато едно растение (каквото и да е – домати, пипер, пшеница и др.) се засуши както младите, така и по-старите листа му стават тъмозелени, потъмняват, а с повишаване на влагата в почвата, листата стават ярко-, светлозелени

Друга предварителна хипотеза, на базата на подобни наблюдения на ниво посев е, че младите листа (на върха на растението) са по-информативни относно необходимостта от поливане и следователно от тях са взети два пъти повече цветови RGB и HSL проби при изследванията.

Избран е Shapiro-Wilk тест за нормалност, понеже *мощността* му е значително по-добра от останалите известни тестове и също така *работата* на класическия тест на Шапиро-Уилк е най-добра при малки и средни по обем извадки.

3.2.1. Изследване разпределението на експериментално установените цветови компоненти при млади листа след поливка (C_1 A_2)

Фиг. 3.2 представя илюстрация на нормалното разпределение на R (червената цветова компонента) при млади листа след поливка, използвайки Shapiro-Wilk тест $W=0,99$ и неговото ниво на значимост (вероятност) $p=0,96$. Понеже $p \gg 0,05$, това показва, че данните са нормално разпределени (с други думи нулевата хипотеза е вярна). Резултатът показва, че компонентата R при млади листа след поливка има Гаусово (нормално) разпределение.



Variable	Descriptive Statistics (Млади листа, след поливка.sta)							
	Valid N	Mean	Variance	Std.Dev.	Coef.Var.	Standard Error	Skewness	Kurtosis
R	54	119,13	177,587	13,326	11,186	1,813	-0,061	-0,218

Фиг. 3.2. Изследване на разпределението на стойностите на R при C₁ A₂

Под хистограмата са посочени: броя на опитите (54); средно-аритметичната стойност (119,13); дисперсията (177,59); стандартното отклонение (13,33); коефициент на вариация (11,19), равен на стандартното отклонение (средноквадратичната грешка) разделено на средно-аритметичната стойност (средната стойност) (в проценти). В този случай 11% означава че данните са много плътно около средната величина и имат много добра хомогенност. Посочена е и стандартната грешка (1,81). Последните два параметъра показват как е деформирано разпределението: асиметрия (-0,06) и ексцес (-0,22).

По аналогичен начин са изследвани всички параметри на разпределението на останалите цветови компоненти, като се установи следното: повечето цветови компоненти от RGB цветовият модел имат Гаусово разпределение. Изключение прави, само В компонентата при млади листа след поливка.

При HSL има наличие на нормално разпределение при следните цветови компоненти – S и L при млади листа след поливка, S и L при млади листа преди поливка и H, S и L при стари листа преди поливка.

Получените резултати са предпоставки за пристъпване към следващите стъпки: регресионен и дисперсионен анализи с тези цветови компоненти, притежаващи нормално разпределение (които са пригодни за този тип анализи).

3.3. Многофакторен (двухфакторен) регресионен анализ

Регресионният анализ включва решаването на следните основни задачи:

- избор на подходящ вид на регресионния модел;
- определяне на параметрите (коефициентите) на модела (метод на най-малките квадрати);
- статистически анализ на регресионния модел – включва проверка на значимостта на получените оценки на коефициентите на регресия, проверка

на адекватността на получения регресионен модел, извършване анализ на остатъците с цел да се провери дали са спазени предпоставките на регресионния анализ и ако някои от тях са нарушени да се премине към друг вариант на регресионния анализ.

Трите етапа образуват същността на регресионния анализ, бил той едно- или многофакторен.

При многофакторните модели, както и при еднофакторните, липсват строги правила за еднозначен избор на вида на модела. На практика не се среща ситуация при която предварително може да се укаже видът на модела, адекватен на изследвания модел. Ето защо в повечето практически задачи многофакторният модел се построява чрез изпълнения на основните етапи, изброени по-горе, като се използва принципа на постепенното усложняване на модела, т.е. преходът от по-прости към по-сложни модели, докато се достигне до адекватен на обекта модел.

Търсен е такъв модел, такава функционална зависимост между изследваните параметри, при които коефициентът на детерминация R^2 да бъде $\geq 80\%$, за да се счита даденият модел за пригоден, което означава той да има достатъчно голяма сила за прогнозиране на почвената влажност.

При регресионния анализ е доказана непригодността на моделирането с множествена линейна регресия и с полиномна регресия от втора степен, като се достига до два съществени нелинейни модела (3.4) и (3.5).

3.3.3 Моделиране с частично-линейна регресия (Piecewise linear regression)

Данните са моделирани използвайки нелинейна оценка – частично-линейна регресия с точка на пречупване. По време на моделирането на данните е прието, че цветовите компоненти на листата са зависими променливи, които варират спрямо независимите променливи θ и T (като предиктори).

От досега проведените изследвания (множествена линейна регресия и полиномната регресия) е видно, че изследваните фактори на околна среда имат присъщо нелинейно поведение спрямо цвета на листата. С други думи, вариациите на данните за θ и T не следват никаква обособена/разпознаваема линейна комбинация по отношение на цвета на листата. Поради това е трудно такава динамична връзка да бъде моделирана използвайки конвенционалните линейни методи като множествена линейна регресия. Именно затова се преминава към подхода на нелинейна оценка (Non-linear estimation) за намиране/изчисляване на връзката между набора независими променливи и зависимата променлива.

Следващите коефициенти на емпиричното уравнение са получени с помощта на този метод.

Общият вид на модела, изчислен посредством метода на най-малките квадрати, изглежда по следния начин:

$$y = (b_{01} + b_{11}x_1 + \dots + b_{m1}x_m)(y \leq b_n)(b_{02} + b_{12}x_1 + \dots + b_{m2}x_m)(y > b_n) \quad (3.3)$$

Или използвайки параметрите R_{cp} , G_{cp} , B_{cp} , H_{cp} , S_{cp} , L_{cp} , θ и T моделът изглежда така:

$$\{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, H_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} = (b_{01} + b_{11}\theta + b_{21}T) \text{ (за } \{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, H_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} \leq \text{т. пречупване } b_0)$$

$$\text{или } (b_{02} + b_{12}\theta + b_{22}T) \text{ (за } \{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, H_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} > \text{т. пречупване } b_0) \quad (3.4)$$

По този начин, се изчисляват две отделни линейни регресионни уравнения - едно за y стойностите, които са по-малки или равни на точката на пречупване (b_0) и едно за y стойностите по-големи от точката на пречупване.

За цветовия признак R_{cp} при млади листа след поливка по модела (3.4) се получава (фиг. 3.23):

Model is: Piecewise linear regression with breakpoint (Млади листа, след поливка.sta Dependent variable: R Loss: Least squares Final loss: 8,555109364 R= ,99332 Variance explained: 98,669%							
N=9	Const.B0	θ	T	Const.B0	θ	T	Breakpt.
Estimate	868,17	-3,80	-31,49	10,35	-1,06	6,66	119,13

Фиг. 3.23. Моделиране с частично-линейна регресия с точка на пречупване при зависима променлива R_{cp} при $C_1 A_2$

Коефициентът на детерминация е 98,67%. Той показва, че 98,67% от вариацията на R_{cp} се дължи на изменения в процента на θ и T. Останалия 1,33% се дължи на невключени в модела фактори. Същите изводи могат аналогично да бъдат направени и за останалите изследвани цветови компоненти, притежаващи нормално разпределение – G_{cp} , S_{cp} и L_{cp} .

От фиг. 3.23 е установен и *физическият смисъл на точката на пречупване – тя съвпада със средно-аритметичната стойност на дадения цветови компонент!*

Коефициентите на моделите относно останалите цветови компоненти при млади листа след поливка по модела (3.4), са обобщени в табл. 3.3:

Таблица 3.3 Коефициенти и точка на пречупване за R_{cp} , G_{cp} , S_{cp} и L_{cp} модели на цветови компоненти при млади листа след поливка

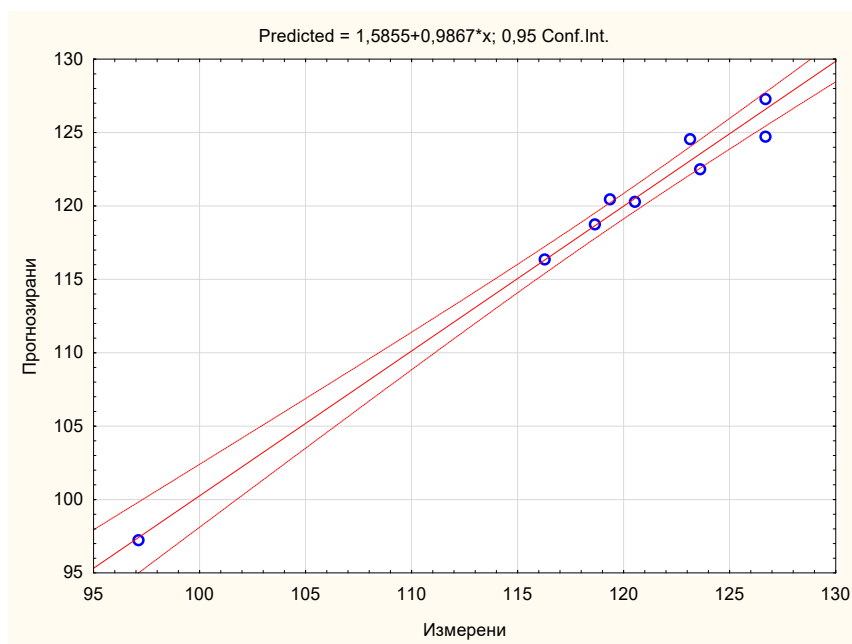
Променлива от модела	Коефициенти	R_{cp}	G_{cp}	S_{cp}	L_{cp}
Константа	b_{01}	868,17	2,35	-0,106	0,781
θ	b_{11}	-3,80	-12,44	-0,007	-0,003
T	b_{21}	-31,49	20,90	0,024	-0,029
Константа	b_{02}	10,35	28,84	0,455	0,052
θ	b_{12}	-1,06	-1,24	-0,002	-0,0005
T	b_{22}	6,66	6,99	-0,007	0,0036
	т. пречупване	119,13	140,09	0,235	0,111
R		0,99	0,99	0,88	0,99
Обхванати вариации (%)		98,67%	98,03%	77,54%	99,47%
R^2		0,99	0,98	0,78	0,99

Този итеративен метод е подходящ при няколко независими променливи и зависима променлива (цветови компонент) за стойности над и под точката на пречупване. С този нелинеен подход на оптимизация се постигат приемливо малки стойности за остатъците, с прогнозираните стойности много близки до наблюдаваните стойности, както е показано на фиг. 3.24:

Model is: (Млади листа, след поливка.sta)			
Dep. Var. : R			
	Observed	Predicted	Residuals
1	119,33	120,48	-1,150
2	116,33	116,33	-0,000
3	120,50	120,23	0,267
4	118,67	118,67	-0,000
5	126,67	124,80	1,865
6	123,17	124,61	-1,443
7	97,17	97,17	0,000
8	126,67	127,30	-0,633
9	123,67	122,57	1,094

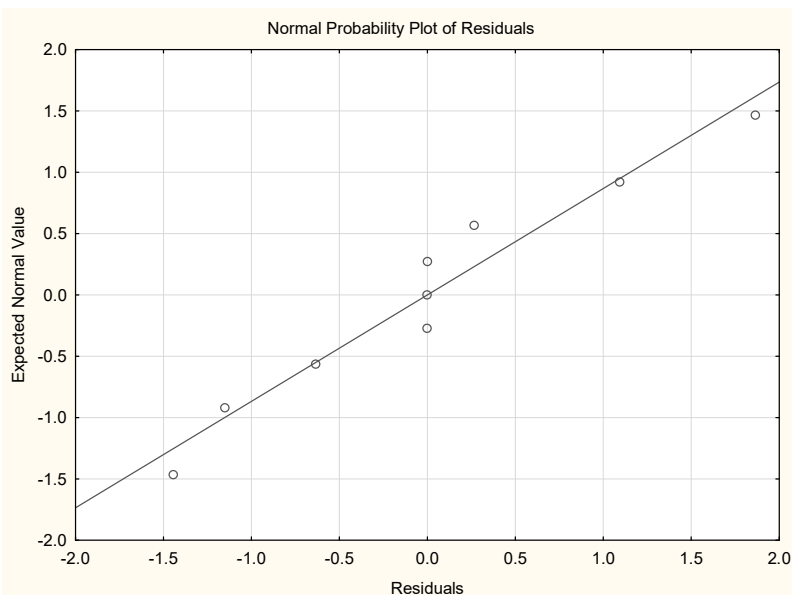
Фиг. 3.24. Измерени, прогнозираны стойности и остатъци за R_{cp} при $C_1 A_2$

От фиг. 3.25 се вижда, че при използвания модел всички експериментални данни попадат в или са много близо до тясната доверителната област (при доверителна вероятност $\gamma = 0,95$) и че линията на регресия минава близо до опитните точки.



Фиг. 3.25. Диаграма на разсейването - прогнозираны спрямо измерени стойности на цветови компонент R_{cp} , при $C_1 A_2$, модел (3.4)

Фиг. 3.26 показва, че стойностите на остатъците са в приемливи граници и с равномерно разпределение. Високата стойност на $R^2 = 0,99$ за R_{cp} при млади листа след поливка, показва че цветовой компонент значително зависи от променливите включени в модела. Точките са разположени близо до правата линия, т.е. може да се приеме, че остатъците имат нормално разпределение.



Фиг. 3.26. Нормална вероятностна графика на остатъците на модела (3.4), за R_{cp} при $C_1 A_2$

Аналогични разсъждения могат да бъдат приложени за всички останали разглеждани цветови компоненти при млади листа след поливка по модел (3.4).

Пълният набор данни относно сравнението между измерени и прогнозирани стойности, за всички цветови компоненти, както и техните диаграми на разсейване са представени в Приложение 2.

Пълният набор нормални вероятностни графики на остатъците на модела са представени в Приложение 3.

Коефициентите на моделите относно цветовете компоненти при $C_2 A_2$ са обобщени в табл. 3.4:

Таблица 3.4 Коефициенти и точка на пречупване за R_{cp} , G_{cp} и B_{cp} модели на цветови компоненти за стари листа след поливка

Променлива от модела	Коефициенти	R_{cp}	G_{cp}	B_{cp}
Константа	b_{01}	-1,61	-201,15	180,44
θ	b_{11}	-0,62	-0,19	-0,54
T	b_{21}	7,22	16,99	-3,06
Константа	b_{02}	110,74	55,37	272,81
θ	b_{12}	-0,84	-1,45	-0,07
T	b_{22}	2,84	7,14	-7,26
	т. пречупване	142,26	163,41	109,85
R		0,86	0,98	0,95
Обяснени вариации:		74,68%	95,52%	89,37%
R^2		0,75	0,96	0,89

Коефициентите на моделите относно цветовете компоненти при $C_1 A_1$ са обобщени в табл. 3.5:

Таблица 3.5

Коефициенти и точка на пречупване за R_{cp} , G_{cp} , B_{cp} , S_{cp} и L_{cp} модели на цветови компоненти за млади листа преди поливка

Променлива от модела	Коефициенти	R_{cp}	G_{cp}	B_{cp}	S_{cp}	L_{cp}
Константа	b_{01}	104,72	137,12	57,18	0,357	0,112
θ	b_{11}	-2,12	-2,59	-0,59	-0,0023	-0,0016
T	b_{21}	2,48	2,57	1,63	-0,0032	0,0014
Константа	b_{02}	-746,30	-1727,72	131,70	0,383	0,105
θ	b_{12}	9,26	19,02	0,25	0,006	-0,132
T	b_{22}	33,59	74,11	-2,98	-0,0127	0,189
	т. пречупване	108,74	133,89	77,35	0,264	0,113
R		0,98	0,99	0,98	0,90	0,77
Обхванати вариации (%)		96,98%	97,51%	95,14%	81,44%	59,22%
R^2		0,97	0,98	0,95	0,81	0,59

Коефициентите на моделите относно цветовите компоненти при C_2 A_1 са обобщени в табл. 3.6:

Таблица 3.6

Коефициенти и точка на пречупване за R_{cp} , G_{cp} , B_{cp} , H_{cp} , S_{cp} и L_{cp} модели на цветови компоненти за по-стари листа преди поливка

Променлива от модела	Коефициенти	R_{cp}	G_{cp}	B_{cp}	H_{cp}	S_{cp}	L_{cp}
Константа	b_{01}	122,18	169,45	122,02	0,288	0,092	0,146
θ	b_{11}	0,53	1,16	0,42	0,0005	-0,005	0,0005
T	b_{21}	0,02	-2,16	-1,25	-0,0033	0,009	-0,0016
Константа	b_{02}	-785,96	-512,82	-222,52	0,374	0,283	-0,385
θ	b_{12}	2,89	2,96	4,80	-0,0005	-0,0034	0,0064
T	b_{22}	44,99	31,73	11,75	-0,0063	-0,0007	0,0192
	т. пречупване	139,15	158,89	112,37	0,239	0,172	0,133
R		0,93	0,95	0,97	0,88	0,96	0,95
Обяснени вариации:		87,42%	91,13%	93,54%	77,10%	92,82%	89,96%
R^2		0,87	0,91	0,94	0,77	0,93	0,90%

Като извод може да се посочи следното: Моделът (3.4) и методът частично-линейна регресия с точка на пречупване могат да бъдат използвани за предсказване с висока прецизност стойностите на цветовите компоненти, на база влажността и температурата на почвата, поради получения висок коефициент на детерминация R^2 . Доказано е наличието на нелинейна зависимост/връзка между изследваните една зависима и две независими променливи. Точката на пречупване съвпада със средната стойност на всяка изследвана цвetoва компонента.

3.4. Проверка на работоспособността на разработения модел (3.4)

Направена е проверка на работоспособността на модел (3.4), изследвайки θ като зависима променлива, а цвetoвия компонент и температурата на почвата като

независими. Целта е да се измерва цвета на растението и да знае дали да полива (т.е. колко е влажността – индиректен интелигентен метод).

За тази цел, по време на експеримента са взети RGB и HSL стойности от три допълнителни контролни растения преди поливка (Растения 10-12), за да бъде проверена нуждата от поливка. С тяхна помощ е апробирана адекватността на модела (3.4).

Аналитично модел (3.4) се преобразува спрямо θ по следния начин:

$$\theta = (\{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} - b_{01} - b_{21}T)/b_{11}) \text{ (за } \{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} \leq \text{т. пречупване } b_0)$$

или

$$(\{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} - b_{02} - b_{22}T)/b_{12}) \text{ (за } \{R_{cp}, G_{cp}, B_{cp}, S_{cp}, L_{cp}\} > \text{т. пречупване } b_0) \quad (3.5)$$

По този начин се получава модел (3.5).

Резултатите са представени в табл. 3.7 и табл. 3.8.

Таблица 3.7 Апробиране на модела (3.5) при млади листа, преди поливка

	R_{cp}	G_{cp}	B_{cp}	S_{cp}	L_{cp}	θ изм.	T
Растение 10	108,83	131,67	81,50	0,236	0,104	22,00	19,03
θ изчислена	23,32	20,93	25,30	26,13	21,65		
Грешка	+5,99%	-4,85%	+14,98%	+18,88%	+13,77%		

Растение 11	118,67	146,33	81,67	0,284	0,111	23,21	18,96
θ изчислена	24,63	24,66	25,13	23,63	17,22		
Грешка	+6,14%	+6,23%	+8,28%	+1,82%	-9,20%		

Растение 12	110,50	133,50	80,67	0,246	0,105	21,45	18,89
θ изчислена	24,01	20,09	20,37	21,98	20,90		
Грешка	+11,92%	-6,36%	-5,05%	+2,42%	+10,66%		

Таблица 3.8 Апробиране на модела (3.5) при по-стари листа, преди поливка

	R_{cp}	G_{cp}	B_{cp}	θ изм.	T
Растение 10	131,67	152,67	101,33	22,00	19,03
θ изчислена	16,96	20,94	7,48		
Грешка	-22,93%	+4,81%	-66%		

Растение 11	153,67	174,33	128,00	23,21	18,96
θ изчислена	29,93	28,93	26,61		
Грешка	+28,94%	+24,65%	+14,65%		

Растение 12	154,00	175,33	117,33	21,45	18,89
θ изчислена	31,13	30,02	24,56		
Грешка	+45,13%	+39,95%	+14,50%		

Резултатите от табл. 3.7 и табл. 3.8 ясно показват, че по-старите листа не са подходящи за определяне нуждата от поливане, понеже грешката при предсказването на влажността на почвата е твърде голяма (при S и L е дори още по-голяма от посочената, затова не са включени). Младите листа преди поливка са по-

информативни, понеже грешката е приемливо малка, което потвърждава предварителното предположение/допускане от наблюденията че младите листа са по-информативни. Моделът (3.5) и методът частично-линейна регресия с точка на пречупване могат да бъдат използвани за предсказване с голяма точност стойностите на влажността на почвата на база на цвета на листата и температурата на почвата, при младите листа преди поливка.

3.5. Многофакторен дисперсионен анализ

3.5.1. Дисперсионен анализ при RGB цветови модел

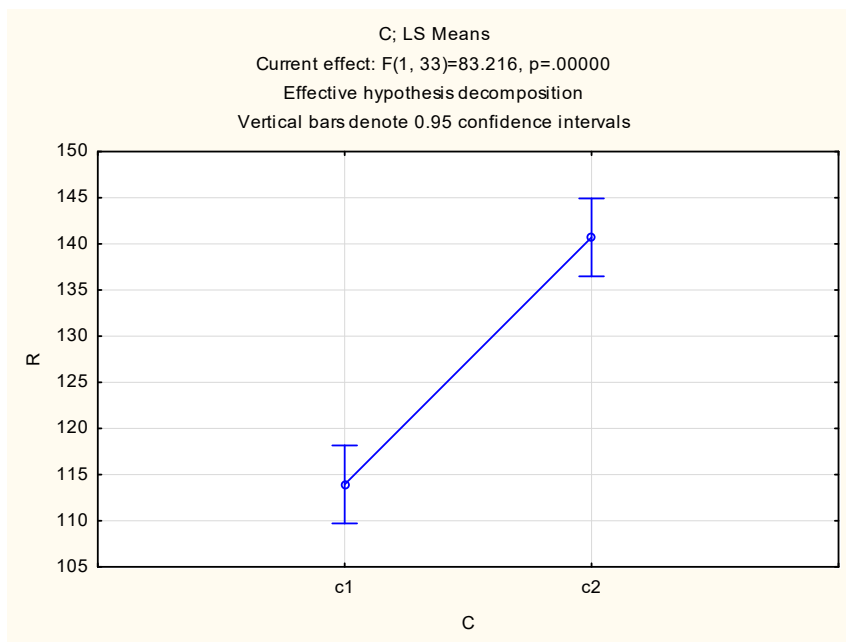
С продукта STATISTICA е приложен методът Main effects ANOVA (фиг. 3.27) за всеки цветови компонент плюс добавени качествени фактори С (млади/по-стари листа) и А (преди/след поливка).

Effect	Univariate Tests of Significance for R (Дисперсионен.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	583568,7	1	583568,7	7530,643	0,000000
C	6449,0	1	6449,0	83,221	0,000000
A	410,1	1	410,1	5,292	0,027887
Error	2557,3	33	77,5		

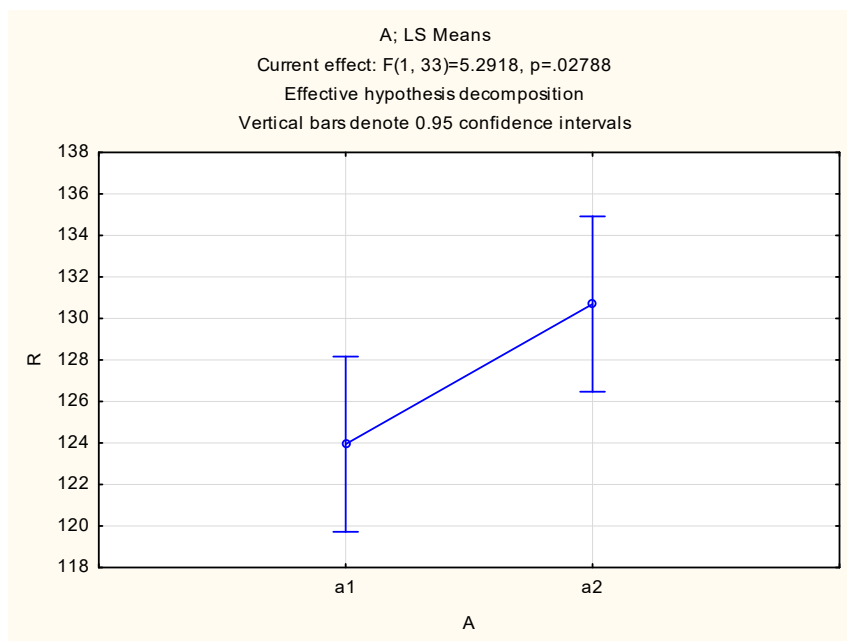
Фиг. 3.27. Резултати от ДА-влияние на факторите С и А върху R_{cp}

Всеки цветови компонент е зависима променлива, а С и А са категорийни (categorical) предиктори (фактори).

От фиг. 3.27 се вижда, че и двата фактора имат съществено влияние върху R_{cp} компонентата, т.к. вероятността p и за двата фактора е по-малка от 0,05. По-силно влияние има факторът С (вижда се и от фиг. 3.29 и фиг. 3.30). Комп. R_{cp} има най-големи стойности при стари листа, след поливка.



Фиг. 3.29. Влияние на фактора С върху R_{cp}



Фиг. 3.30. Влияние на фактора A върху R_{cp}

Следвайки същата процедура за останалите цветни компоненти се получават следните резултати:

Върху G_{cp} и B_{cp} цветните компоненти доказано влияние има само факторът C. Компонентите R_{cp} , G_{cp} и B_{cp} имат най-големи (по-светлозелени, като общ цвят) стойности при по-старите листа след поливка, което несъмнено е доказателство за първата предварителна хипотеза по време на предварителните наблюдения на ниво посев, че при засушаване листата потъмняват.

При HSL цветния модел се установи следното: и двата фактора C и A има съществено влияние върху компонентата H_{cp} . Компонентата H_{cp} има най-големи стойности при млади листа, преди поливка.

Върху компонентата S_{cp} доказано влияние няма нито един от двата фактора C и A. Само факторът C има доказано влияние върху компонентата L_{cp} .

Компонентите H_{cp} и S_{cp} имат най-големи стойности при млади листа, преди поливка. Компонентата L_{cp} има най-големи стойности при стари листа, след поливка.

ГЛАВА IV. МЕТОДОЛОГИЯ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ ВРЕМЕТО ЗА УСВОЯВАНЕ НА ПОЛИВНАТА ВОДА

В тази глава, в набор от лабораторни експерименти е предложена методология за измерване времето за усвояване на поливната вода от оранжерийни домати растения. Използвани са RGB измервания с колориметър, за да се определи времето на поемане на вода до върха на растението чрез наблюдение на промяната в цвета на листата. Целта на това изследване е да провери дали промяната на цвета на листата след поливка не е късен индикатор на воден стрес, или промяната на цвета може да бъде отчетена в реално време – най-много до час след поливане.

Това проучване се основава на *метода на научното наблюдение*. Съгласно съществуващата практика, наблюдението включва научно-познавателна дейност, която се изпълнява както на практическо, така и на логическо ниво. При *непосредственото наблюдение* обектът се описва, а неговите свойства се усещат директно от сетивния орган. *Опосредстваното наблюдение*, от своя страна, се осъществява чрез употреба на инструменти, които усилват възприемането на

сетивния орган. Тези инструменти се поставят между наблюдавания обект и наблюдателя. В изследването, описано в тази глава, се използва комбинация от директно и индиректно наблюдение.

Сортът, обект на изследване, е друг луксозен индетерминантен (високорастящ) хибрид холандски домати наречен „Амати“ („Amati“). Семената на изследваните растения са засадени в края на юни, а разсадът – в края на юли. Опитите са проведени върху няколко от засадените растения в *лабораторни условия, микроклиматично* максимално близки до оранжерийните. Този сорт домати е подходящ за отглеждане, както в оранжерии, така и на открито. „Амати“ има отворен хабитус и поради това има възможност за дълъг период на плодоносене.

4.1. Първи ден от серията експерименти

Поливката при всички експерименти е еднократна и обилна, без да бъдат „удавени“ растенията. В това изследване не е взет под внимание конкретният тип почва като влияещ фактор, понеже това не е акцентът тук. Калибрирането на сензора за почвена влага, спрямо конкретния тип почва, е посочено в Глава II.

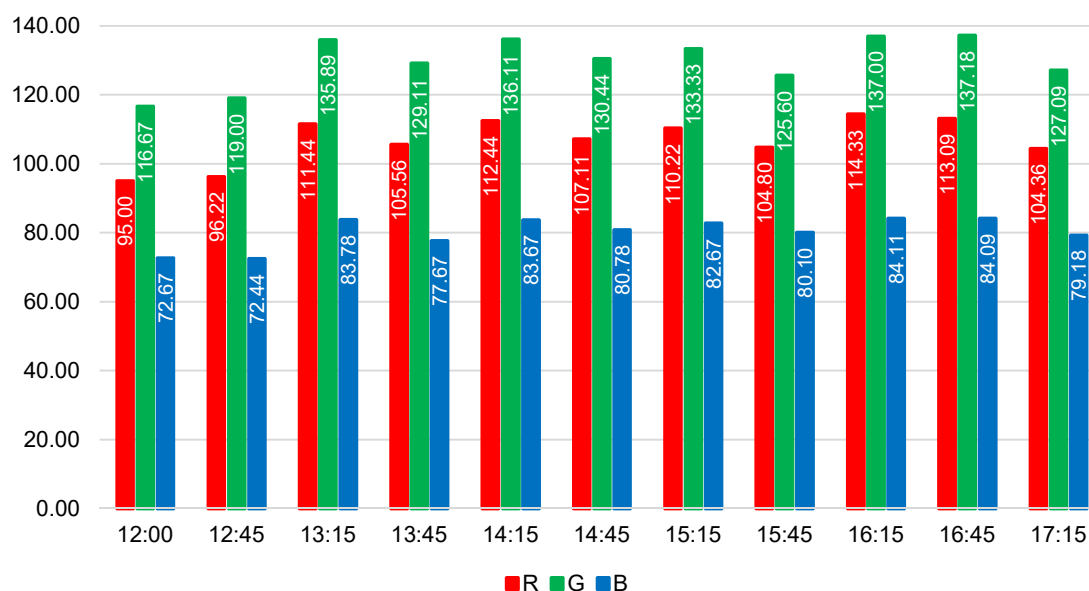
През първия ден от експериментите, преди поливка, липсва слънце, което да задейства силно фотосинтезата и растението да "засмуче" почвената влага с помощта също и на изпаряването. Преди да бъдат напоени растенията не са били поливани 3-4 дни. Климатичните условия през първия ден от поредицата от експерименти са описани в табл. 4.1:

Таблица 4.1 *Климатични и почвени условия при първия експеримент*

	Условия	Осветеност, kLx	Температура въздух, °C	Влажност въздух, %	Почвена влажност, m ³ /m ³
Преди поливка	Облачно	4,9	26,50	51,80	0,256
120 min след поливка	Слънчево и топло	40,3	33,00	40,70	0,295
300 min след поливка	-	-	-	-	0,293

През първия ден на изследването (42 дни след засаждане; 90 cm височина на растението) са взети RGB цветови проби веднъж непосредствено преди поливка (9 RGB стойности) и десет пъти след поливка (10 x 9 RGB стойности) през половин час. Усреднени са (фиг. 4.2). Пробите са взимани на случаен принцип от различни листа при отделните измервания. Един набор от измервания отнема от 5 до 8 min. Измерванията са в диапазона 70-90 cm височина на растението (от върха му).

Използвайки колориметъра и измерването на цвета, с което може да бъде отчетено достигането на усвоената влага до върха на растението, се получават следните средни стойности за RGB компонентите, представени във вид на диаграма (фиг. 4.1):



Фиг. 4.1. Изменение на средните RGB стойности във времето преди и след поливка, първи експеримент

Както е видно, между 30 min (12:45) и 60 min (13:15) след поливката (която е била в 12:15 h), цветът на листата в изследваната горна част на растението (около върха) се променя (увеличават се стойностите на цветовете компоненти, което означава, че те изсветляват).

Час и половина след поливка (в 13:45) се забелязва *изравняване* в показанията (*уравновесяване* на отчитаните RGB стойности), докато при другите измервания те варират от големи до малки (не е показано на фиг. 4.2, там е само усреднената стойност).

При този, както и последващите експерименти, няколко часа след поливка, жилките на листата избеляват, стават светли, изпъкват, уголемяват се (т.е. видимо е че проводящата тъкан се напълва с течност). Това се установява няколко часа след поливка, с невъоръжено око.

Освен чрез визуално наблюдение, промяната на цвета може да се докаже и чрез статистическа обработка (табл. 4.2) на двете проби RGB стойности непосредствено преди поливане и един час след поливането (времето на промяна на цвета). Използвани са Т-тестове на Стьудънт за проверка на статистически значимата разлика между отделните RGB измервания и по-специално прехода между поливането и един час след него - де факто времето, необходимо за промяна на цвета, следователно времето за достигане на влага до върха на растението.

Таблица 4.2 Т-test: Сдвоени две извадки за проверка на средните стойности и нормалното разпределение

	Преди поливка					Един час след поливка					t-тестове между измерванията	
Channel	Mean	SD	Median	Skew.	Kurt.	Mean	SD	Median	Skew.	Kurt.	t	p
R	95	9,58	96	0,28	-0,37	111,44	6,95	110	0,87	0,38	-3,67	0,003
G	116,67	11,06	117	0,63	0,47	135,89	8,52	133	1,04	0,69	-3,51	0,004
B	72,67	6,71	72	0,22	-0,58	83,78	6,53	84	-0,05	-0,91	-3,05	0,008

Разликата между двете групи се оценява като статистически значима, тъй като p е по-малко от 0,05. Освен това разликата между двете групи е статистически значима, ако не може да се обясни само със случайност.

Не на последно място, доказателство за нормалното Гаусово разпределение (при ниво на достоверност за средната стойност (mean) = 95%) на изследваните извадки са от една страна показателите асиметрия (skewness) и ексцес (kurtosis), които са близки до нулата, а от друга почти еднакви стойности на средните (mean) и медианните (median) показатели.

В обобщена таблица (табл. 4.13) е представено времето за усвояване на поливната вода от този сорт домати при тези специфични условия на микроклимата в тестовата лабораторна среда:

Таблица 4.13 *Обобщени данни и резултати от серия експерименти за времето на поглъщане на вода от изследваните растения, установено чрез RGB колориметрични измервания на цвета на листата им*

	Първи	Втори	Трети	Четвърти	Пети
Височини на измервания / Диапазон на изследване	70-90	100-120 cm	100 cm 120-135 cm	100-110 cm и 110-135 cm	100-110 cm, 110-120 cm, 130 cm и 150-160 cm
Растения височина	около 90 cm	≈ 120 cm	≈ 135 cm	≈ 140 cm	≈ 160 cm
Времеви интервал на измерване	преди поливка;	преди поливка;	преди поливка;	преди поливка;	преди поливка;
	след поливка: 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min, 240 min, 270 min, 300 min	след поливка: 30 min, 45 min, 60 min, 75 min, 120 min, 180 min, 240 min	след поливка при 100 cm: 45 min, 60 min, 75 min при 120-135 cm: 45 min, 60 min, 75 min, 105 min, 165 min, 225 min	след поливка при 100-110 и 110-135 cm: 30 min, 45 min, 65 min, 90 min, 105 min, 150 min, 205 min	след поливка при 100-110 cm, 110-120 cm, 130 cm и 150-160 cm: 45 min при 100-110 cm: 60 min при 110-120 cm: 65 min при 130 cm: 75 min при 150-160 cm: 80 min, 90 min
RGB промени в цвета (изсветляване), минути след поливка	между 30 и 60 min	между 60 и 75 min	на 100 cm: 60 min на 120-135 cm: 75 min	на 100-110 cm: 65 min на 110-135 cm: 90 min	на 100-110 cm: 60 min на 110-120 cm: 65 min на 130 cm: 75 min

4.6. Изводи

Изказаната хипотеза, че при този сорт домати и при тези климатични условия поливната вода се усвоява за 60 min ако растението е високо 100 cm е доказана и потвърдена в изследване и измервания на цвета на листата – процесът на поемане на вода отнема 60 min при 1 m и 80 min при 1,60 m високо растение.

При измерванията цветът се изследва на различни височини на растението, с цел по-точно да се определи времето на проникване на влагата по продължение на стъблото на растението.

Към различните височини възникна необходимост от увеличаване на честотата на измерванията - те се променяха на по-чест интервал през първите два-три часа от измерванията и по-рядко в следващите.

В първия ден от поредицата експерименти, 90 min след поливането се забелязва *изравняване* на показанията (*балансиране* на отчетените RGB стойности), докато при други измервания те варират. По време на втората серия от експерименти това явление се появи по време на измерванията на 120 min и 180 min след поливане.

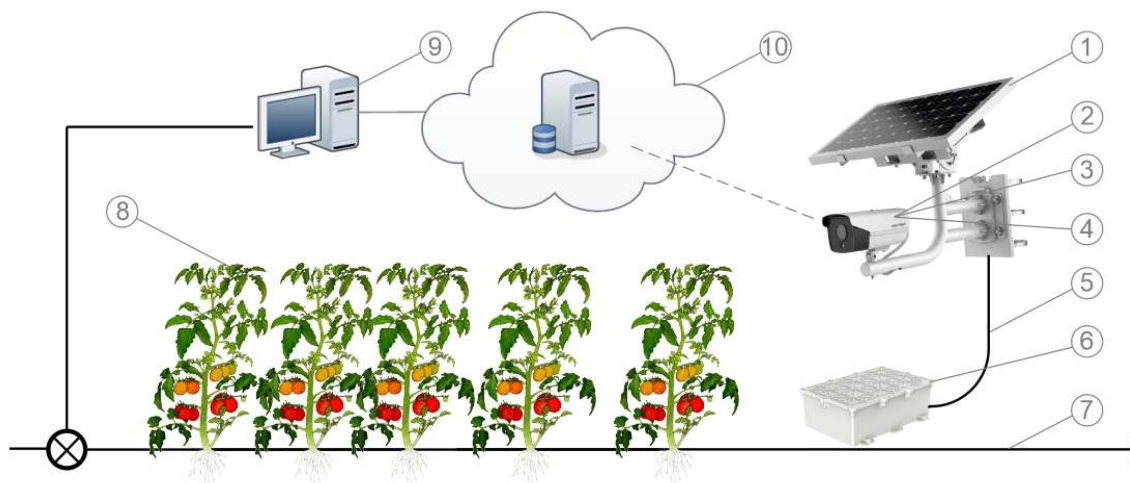
ГЛАВА V. МОДЕЛ НА СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОННО НАБЛЮДЕНИЕ НА ПОСЕВА И АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА НАПОИТЕЛНАТА СИСТЕМА

В тази глава са предложени програма, обработваща получено от камера изображение, по зададен алгоритъм за управление на напоителната система, базиран на получените математически модели и модел на автоматизирана система за управление на напояването включваща две части – подсистема за дистанционно наблюдение на посева и подсистема за управление на напояването.

5.1. Описание на елементите на системата

Моделът на RS системата за наблюдение на посева домати в оранжерия и автоматично управление на капковата напоителна система (стартиране на поливането и спиране) се състои от следните елементи (фиг. 5.1):

- 1) Соларен панел за автономно захранване на камерата (40 W);



Фиг. 5.1. Модел на система за RS наблюдение и автоматично напояване

- 2) Автономна 4G IP камера (прахо- и водоустойчива);
- 3) micro Sim и microSD карти;
- 4) Защита на обектива на камерата против изпотпяване (от високата влажност в оранжерията);
- 5) Кабели със защита от гризачи;
- 6) Акумулатор (20 Ah);
- 7) Поливна система с капково напояване;
- 8) Посев оранжерийно отглеждани индетерминантни домати насаждения;
- 9) Отдалечен компютър, изпълняващ закона за управление, заложен в програма, написана на Python;
- 10) Отдалечен сървър, на който се съхранява снимка (напр. на всеки половин час).

Камерата се настройва, през уеб интерфейса на нейния софтуер, автоматично да прави снимка на посева през определен времеви интервал (например половин час през светлата част на деня). Това означава, че с цел пестене на енергия не е нужно камерата да работи постоянно, а само през деня и то през половин час. Снимката на посева може да бъде съхранена по два начина. Първият е локално, на собствената microSD карта в камерата. Вторият: инсталирайки micro SIM карта в предвидения за това слот, камерата може да бъде свързана към GSM клетъчната мрежа и да изпраща записаните снимки през определен интервал към облачна услуга за съхранение или към отдалечен сървър. Свързването към GSM клетъчната мрежа става чрез конфигуриране на правилните мрежови настройки: напр. през уеб интерфейса на камерата трябва да бъде зададено името на точката за достъп - APN (Access point name) наред с другите подходящи мрежови настройки: потребителско име, парола, IP адрес, подмрежова маска, шлюз и DNS (ако клетъчната мрежа ги изисква). Настройването на камерата да изпраща снимките на облачна услуга или на отдалечен сървър също се извършва през уеб интерфейса на камерата. Настройват се IP адрес или име на домейн на сървъра, където се качват снимките, интервал на качване, файлов формат и резолюция на изображението. Накрая, в настройките се активира графика за качване на снимки.

Отдалеченият достъп до напоителната система в оранжерията и нейното стартиране и спиране може да се осъществи с помощта на GSM карта за изпращане на команди чрез SMS съобщения и устройство, което може да получава и изпълнява SMS команди (Arduino или други контролери с GSM shield). Arduino е популярна микроконтролерна платформа, която може да се използва за управление на различни устройства, включително напоителни системи. На пазара има различни други контролери, които могат да се използват за управление на напоителни системи в оранжерия, като Raspberry Pi, BeagleBone и други микроконтролерни платки.

Изпратеното на отдалечен сървър изображение се извлича автоматично по програмен път отдалечено на друг компютър, обработва се посредством програма написана на езика Python и ако изчислената посредством цвета на листата почвена влажност е под дадено прагово равнище също отдалечено се задейства изпълнителен механизъм в оранжерия за стартиране и впоследствие за спиране на напоителната система.

На следващата фиг. 5.2 е представена една примерна снимка на посева в оранжерията, заснета по време на провеждане на експериментите и получаване на опитните данни, описани в Глава II. Полевите експерименти са провеждани на ред 2 от изображението (десния). Ако камерата е по-широкоъгълна могат да бъдат обхванати и обработвани повече редове едновременно.



Фиг. 5.2. Снимка получена от камерата наблюдаваща посева в оранжерията

5.2. Описание на процедурата и програмата по извличане и обработка на изображението

Python е мощен и многофункционален език за програмиране, който става все по-популярен сред учени и изследователи през последните години. Това, което на други езици за програмиране отнема десетки и стотици редове програмен код в Python може да бъде осъществено с няколко реда записи. Независимо в коя научна област работи изследователят, Python може да му помогне да анализира и визуализира данните си и да изгради мощни модели, за да напредне в изследванията си.

Създадената програма извършва обработка на изображения (Image processing) и изчисляване на почвената влажност за два реда домати и след това контролира напояването в редовете въз основа на изчислената стойност. Програмата работи в следната последователност:

Първо, импортира необходимите модули (библиотеки): OpenCV (`cv2`) за обработка на изображения, `urllib.request` за извличане на изображение от URL адрес, `numpy` за работа с масиви и `serial` за серийна комуникация с Arduino.

След това извлича изображение от URL адрес и го съхранява като `numpy` масив. Използва се функцията `cv2.imdecode()` на OpenCV, за да декодира изображението във формат, който може да бъде обработен от OpenCV.

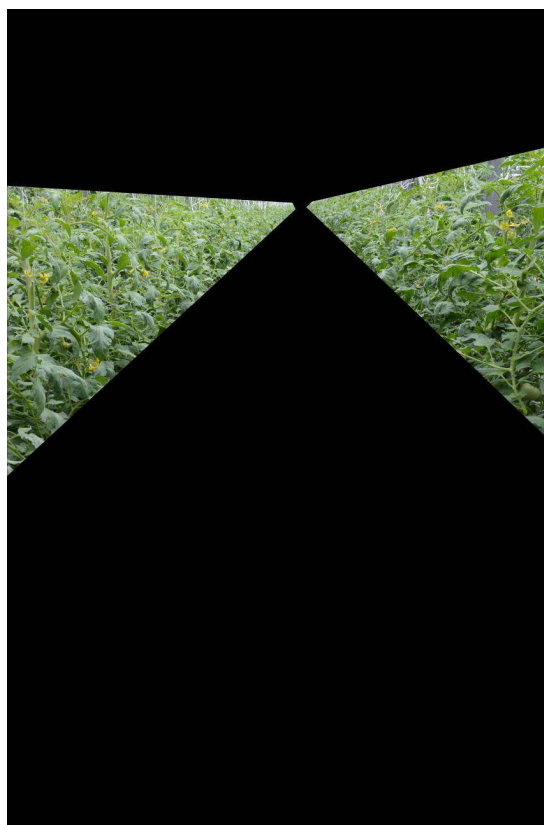
След това създава две бинарни маски за два региона в изображението, представляващи интерес (а именно само регионите с млади листа, точките на многоъгълниците са зададени ръчно в предварително калибриране), като използва `cv2.fillConvexPoly()` за изчертаване на многоъгълници (неправилни четириъгълници) около всеки регион (фиг. 5.3).

След това програмата използва `cv2.bitwise_and()`, за да приложи маските към изображението, което води до маскирано изображение, което показва само двата представляващи интерес региона (фиг. 5.3).

Следва изчисляване коефициент на мащабиране, за да преоразмери маскираното изображение, подготвяйки го за следващата стъпка - визуализиране на екрана, така че височината му да е 1080 пиксела, колкото е нормалната височина на резолюцията при съвременен монитор. Преоразмеряването на маскираното изображение става с помощта на функцията `cv2.resize()`.

Програмата показва преоразмереното маскирано изображение с помощта на `cv2.imshow()`, изчаква да бъде натиснат клавиш с помощта на `cv2.waitKey()` и записва маскираното изображение локално с помощта на функцията `cv2.imwrite()`.

След това изчислява броя на ненулевите пиксели във всяка маска, използвайки `cv2.countNonZero()` и на тяхна база - средните стойности на RGB цвета за всеки регион с помощта на `cv2.mean()`.



Фиг. 5.3. Маскирано изображение, показващо само двата региона с млади листа

Изчислява се стойността на почвената влага за двата реда въз основа на съответната тяхна средната стойност на зеления цвят, използвайки нелинейния модел (3.5) създаден в Глава III, изпълнявайки по този начин ролята на регулатор и управлявайки изпълнителния механизъм, стартиращ и спиращ напояването.

Избрана е G_{cp} цветова компонента за изчисляване на почвената влажност и управление на напояването, на база изчисленията в Глава III (Табл. 3.7). При тази цветова компонента се получават *най-малки грешки при прогнозиране* на почвената влажност (от – 6% до 6% в зависимост дали G_{cp} има стойност по-голяма или по-малка

от точката на пречупване). Грешките при прогнозирането са отчетени и коригирани при изчисляването на влажността на почвата.

Накрая се отпечатват резултатите от изчислението на влажността на почвата и решението за напояване, за да може потребителят да ги види. Извършва се и комуникация с Arduino платка, използвайки серийния модул, като се изпраща съобщение за стартиране или спиране на напояването във двата наблюдавани реда насаждения, в зависимост от изчислената стойност на почвената влажност.

Листингът на програмата е публикуван на <https://github.com/SSAtanasov/living-biosensors>.

Резултати от изпълнението на програмата:

Row 1:

```
Mean color values (RGB): [118.79, 142.88, 93.75]
Number of pixels: 2321756
Average Soil Moisture: 25.03
Soil moisture is sufficient in Row 1. Irrigation not started.
```

Row 2:

```
Mean color values (RGB): [109.1, 133.79, 83.38]
Number of pixels: 1926333
Average Soil Moisture: 23.45
Soil moisture is sufficient in Row 2. Irrigation not started.
```

Прецизността и точността на работа на описаните в Глава II и Глава III ръчни измервания с калибриран измервателен уред колориметър са потвърдени в тази глава от изчисленията на програмата за обработка на изображения, което потвърждава и правилността на използваните методи на изчисления и методики на работа, както показват и следващата табл. 5.1:

Таблица 5.1 Прецизност на измерванията в Глава II и на изчисленията в Глава III (Сравнение на получените средни RGB стойности и почвена влажност при ръчни измервания и с помощта на програма)

Метод на измерване	Брой измервания	RGB средни стойности	Средна почвена влажност
С колориметър	54 ръчни	[109, 133, 77]	23,85
Снимка от камера и програма	1 926 333 пиксела	[109, 134, 83]	23,45

В Python е възможно да се създаде изпълним файл, който да се стартира автоматично напр. на всеки половин час, като се използват инструменти за планиране на задачи като cron (при Unix-базирани системи) или Task Scheduler (при Windows), за да се планира скрипта да се изпълнява автоматично на зададени интервали.

5.3. Резултати и изводи

Средната стойност на цветовете компоненти при млади листа преди поливка от няколко десетки ръчни измервания с калибриран колориметър *в ред 2, в който са провеждани и полевите експерименти* и тази изчислена с програмата е еднаква. Прецизността единствено при В компонентата се разминава, но все пак точността е над 92%, докато при R и G тя е над 99% (табл. 5.1).

Сравнено с ръчните измервания, програмата прогнозира с 98% точност влажността на почвата и активира изпълнителните механизми, ако има нужда от поливане (табл. 5.1).

Общи изводи

1. Темата е и интердисциплинарна – обхваща няколко разнопосочни научни направления - автоматика, информационни технологии, агрономство.
2. Анализът на състоянието показва, че съществуват различни дистанционни способности за оценка на водния статус на растенията и почвената влажност, но липсва информация цветът на здрави листа да се използва като индикатор за необходимостта от поливане и да е свързан с директна оценка на стойността на почвената влажност.
3. Експериментално е потвърдена пределната полска влагоемност на използвания тип почва и е калибриран сензорът за почвената влажност спрямо този тип почва. Въпреки зададените три поливни норми, по експериментален път се установи, че напояването не е еднакво дори и във всеки от трите изследвани участъци от реда.
4. При сравнителното изследване за оценка на моделите са изпробвани няколко статистически метода в търсене на най-адекватния. При моделирането с множествена линейна регресия и полиномна регресия от втора степен се стигна до извода че получените модели са незначими (незадоводителен коефициент на детерминация) и че е налице строго нелинейна зависимост между изследваните параметри на микроклимата и цветовете компоненти.
5. Доказано е наличието на нелинейна връзка между изследваните една зависима (цветови компонент) и две независими променливи (θ и T), посредством модели (3.4) и (3.5) показващи висок коефициент на детерминация R^2 между цветовете компоненти и влажността и температурата на почвата.
6. Изследвани са за информативност количествените (цветови – RGB и HSL) и качествени (млади-стари листа, преди-след поливка) признаци. Установи се че най-информативни за нуждата от поливка са младите листа преди поливка
7. Моделите (3.4) и (3.5) могат да послужат като база за създаване на автоматизирана система за мониторинг на посева, служеща за определяне нуждата от поливка и автоматично включване и изключване на напоятелната система.
8. Моделът (3.5) и методът частично-линейна регресия с точка на пречупване могат да бъдат използвани за предсказване с голяма точност стойностите на влажността на почвата на база на цвета на листата и температурата на почвата, при младите листа, поради получените ниска нива на грешката при прогнозиране. На тази база се реализират предсказващи почвената влажност модели. С тяхна помощ да се реализират икономии (по отношение закупуване на скъпи технически средства (множество сензори) за измерване на почвената влажност) и избягване на ръчен непосилен труд за измерване на влажността (особено в големите полета).
9. Моделът (3.5) е апробиран за работоспособност.
10. При апробирането на модела най-малка грешка за прогнозиране на почвената влажност се получава при G компонентата преди поливка и в двата случая, когато нейната стойност е по-малка или по-голяма от точката на пречупване – от -6% до 6%.
11. Промяната на цвета не е късен индикатор за воден стрес – от напояването до промяната на цвета на върха на растението отнема не повече от час и половина, при индетерминантни растения

ПРИНОСИ

1. Разработена и обоснована е методика за събиране на данни (научно-приложен принос).
2. Предложен е индиректен метод за установяване влажност почва (научно-приложен принос). Изведен модел (3.5), който прогнозира с грешка от -6% до +6% влажността на почвата на база на цвета на листата и температурата на почвата, при младите листа на индетерминатни домати насаждения.
3. Установен е физичният смисъл на точката на пречупване при частично-линейната регресия – тя съвпада със средно-аритметичната стойност на всеки изследван цветови компонент (научен принос). Точката на пречупване се отнася до конкретна точка или праг в набора от данни, при който връзката между независимите променливи (влажност и температура на почвата) и зависимата променлива (цветови компонент) променя посоката си и нелинейният модел се разделя на две линейни части.
4. Експериментално е установено времето за усвояване на вода (60 min ако растението е високо 100 cm и 80 min при 160 cm високо растение), което доказва че промяната на цвета не е късен индикатор за установяване на воден стрес (научно-приложен принос).
5. Предложен е модел на система за отдалечено автономно наблюдение на посева и автоматично управление процеса на поливане (приложен принос).
6. На базата на разработения модел (3.5) е разработен програмен инструмент за автоматична обработка на изображение и автоматично управление на напоителна система, позволяващ с точност 98% прогнозирането на почвената влажност и способстващ автоматизирането на обработката на изображението и процеса на напояване (приложен принос).

Списък на научните публикации по дисертационния труд

№	Публикация
1.	Atanasov, S., Daskalov, P., & Pechlivanova-Gotcheva, P. (2023). Soil moisture remote sensing in agriculture: A review. <i>Proceedings of University of Ruse</i> . ISSN 1311-3321 (print), ISSN 2603-4123 (on-line), vol. 62, серия 3.1, стр. 11-22 (ROAD)
2.	Атанасов, С. (2015). Обзор на терминологията при измерването на почвената влажност. <i>Сборник научни трудове от XXIV Международна научна конференция "Мениджмънт и качество" за млади учени</i> , ISSN 1314-4669, стр. 5-12, doi: 10.13140/rg.2.1.1431.7209
3.	Атанасов, С. (2015). Калибриране на FDR сензор за специфична почва при измерване на почвена влажност. <i>Научни трудове на Русенски университет</i> , том 54, серия 3.1, стр. 217-221, ISSN 1311-3321
4.	Atanasov, S. S., Daskalov, P. I., & Nedeva, V. I. (2016). An Intelligent Approach of Determining Relationship between Tomato Leaves Color and Soil Moisture and Temperature. <i>Bulgarian Journal of Agricultural Science</i> , 22(6), pp. 1027-1035, ISSN 1310-0351 (Scopus Q3, SJR 0.262, SNIP 0.44)
5.	Atanasov, S. (2021). Methodology for irrigation water uptake time estimation based on RGB colorimetric measurements of leaves (A visual-graphical observation). <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , volume 1031, 012016, doi:10.1088/issn.1757-899X, Online ISSN: 1757-899X, Scopus Q3 (SJR 0.198, SNIP 0.54) and Web of Science (Conference Proceedings Citation Index)

Представените публикации имат 3 цитирания в Scopus и 4 в други бази с научна информация.

Study of the influence of soil microclimatic parameters on color characteristics of greenhouse tomatoes with a view to irrigation automation

Abstract: The reserves of fresh water for irrigation must be used judiciously and wisely, as water is a priceless natural resource that is in short supply in a large part of the Earth. Irrigation is of crucial importance for the productivity of agriculture on a global scale. However, the efficiency of water use for irrigation and the conservation of water resources are often lower than expected. It is estimated that agriculture uses over 70% of the world's reserves of fresh water, with about half of it being lost and wasted.

Average of 300-400 liters of water is used for the production of 1 kg of fresh tomatoes. Tomatoes lose more than 90% of the water they absorb through transpiration from their leaves, making the leaves more susceptible to water stress than other organs such as the fruits. During the irrigation process, the majority of water drains into the soil, and only a small portion of it is absorbed by the plant.

The subject of research in this PhD thesis is the color of the leaf of healthy tomato plants (*Solanum lycopersicum*) and the influence of microclimate parameters in the greenhouse (soil moisture and temperature) on it. The leaf canopy is studied using quantitative (color-related - RGB and HSL) and qualitative (young leaves before / after watering and old leaves before / after watering) factors. It was found that the most informative indicators for the need for watering are the young leaves before watering.

There are numerous different methods and sensors for measuring and studying the parameters of agricultural crops and soil moisture. The process of measuring is labor-intensive for large-scale agricultural fields spanning several thousand hectares, and deploying thousands of sensors is unnecessarily costly.

This work proposes a slightly different approach based on the physical observation of plants. The task is to offer an indirect intelligent, rapid method confirming the long-term observations of farmers.

Scientific breakthrough of the research - The color of healthy tomato leaves is used as an indicator of the need for irrigation and is associated with a direct assessment of the plant's water status and soil moisture value.

Present study predict soil moisture and consequently the need for irrigation, based on created nonlinear mathematical models, demonstrating a high coefficient of determination R^2 (over 95% in young leaves before watering) between the color components (R_{avg} , G_{avg} , B_{avg} , H_{avg} , S_{avg} , L_{avg}) and the soil moisture (θ) and soil temperature (T).

This nonlinear mathematical models are based on piecewise linear regression with breakpoint and predict soil moisture with the help of the color components and soil temperature with an error of -4.85% to +14.98%.

A model of automated irrigation system is created and its control program is written where the basic control law are the created non-linear piecewise linear models.

The program written in Python processes the photo received from the camera and activates the actuators if there is a need for watering.

Compared to manual data collection in the first part of the study, the program calculates from image the average values of the RGB model in the studied row of tomato plantations with an accuracy of over 99% for the R and G components and over 92% for the B component.

The program also predicts soil moisture with 98% accuracy.

Plants can serve as biological sensors as long as we can correctly interpret the feedback they provide us through changes in the color of their leaves.

Keywords: soil moisture, leaves color, nonlinear estimation, plant water uptake, biosensors, precision irrigation, RGB colorimetry, image processing, digitalization, bioinformatics