

Десислава Ганчева Ганева-Кирякова

**ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА
РАПИЦА В СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ ЧРЕЗ
СПЪТНИКОВИ И НАЗЕМНИ ДАННИ**

АВТОРЕФЕРАТ

За получаване на образователна и научна степен

„Доктор“

Област на висше образование: 4. „Природни науки,
математика и информатика“

Професионално направление: 4.4. „Науки за Земята“

Научна специалност: „Дистанционни изследвания на
Земята и планетите“



Научен ръководител:
Проф. д-р Георги Желев

София
2020г.



Настоящото изследване е извършено в рамките на редовна докторантура в секция „Дистанционни изследвания и ГИС“ към Института за космически изследвания и технологии при Българската академия на науките (ИКИТ-БАН). Дисертационният труд е обсъден на заседание на еднократно разширен Научен семинар на секция „Дистанционни изследвания и ГИС“ при ИКИТ-БАН, проведено на 27.10.2020г., и е разкрита процедура за публична защита с решение на Научния съвет на ИКИТ-БАН пред Научно жури в състав:

Вътрешни членове:

1. Проф. д-р Евгения Руменина – ИКИТ-БАН
2. Проф. д-р Георги Желев – ИКИТ-БАН
3. Доц. д-р Петър Димитров – ИКИТ-БАН (резервен)

Външни членове:

1. Проф. д-р Мартин Банов – Селскостопанска академия
2. Доц. д-р Милена Керчева – ИПАЗР „Н. Пушкиров“, ССА
3. Доц. д-р Стоян Недков – НИГГГ-БАН
4. Доц. д-р Ралица Берберова – НБУ (резервен)

Дисертационният труд включва 150 страници, 37 таблици, 46 фигури и карти и 150 литературни източника (15-на кирилица и 135-на латиница).

Номерацията на фигурите, таблиците, приложенията и цитираната литература в рамките на автореферата отговаря на тази в пълния дисертационен труд.

Дисертационният труд има следната структура:

Списък на съкращенията

Списък на фигурите

Списък на таблиците

Въведение

Глава 1. Теоретични анализи на съществуващите методи за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица

Глава 2. Методология на изследването

Глава 3. Определянето на начало и край на цъфтеж

Глава 4. Извеждане и валидиране на регресионните модели

Глава 5. Оценка на състоянието на посеви от зимна рапица в Североизточна България

Заклучение

Приноси

Научни публикации по темата на дисертацията

Списък на използваната литература

Приложения

Абстракт на английски език

Защита дисертационния труд ще се проведе на 27.01.2021г. в зала 309 на блок 1.

СЪДЪРЖАНИЕ

СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА.....	4
ВЪВЕДЕНИЕ	5
1. АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА	5
2. ЦЕЛ, ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ, ХИПОТЕЗА И ЗАДАЧИ	6
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧНИ АНАЛИЗИ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА.....	7
1. КОНВЕНЦИОНАЛНИ МЕТОДИ ПРИ ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА.....	7
2. ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ПРИ ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА	8
3. ИЗВОДИ	10
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.....	11
1. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ.....	12
1.1. <i>Методи използвани при полевите изследвания</i>	14
1.2. <i>Методи използвани при обработката на дистанционните данни</i>	15
1.2. <i>Методи за оценка на състояние на посеви</i>	21
2. ГЕО-БАЗА ДАННИ.....	24
2.1. <i>Наземни данни</i>	24
2.2. <i>Дистанционни данни</i>	26
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЯНЕТО НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ.....	27
1. НАЗЕМНО ВАЛИДИРАНЕ НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ.....	27
2. РЕЗУЛТАТИ ОТ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ НА ЗИМНА РАПИЦА	28
3. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ.....	29
ГЛАВА 4. ИЗВЕЖДАНЕ И ВАЛИДИРАНЕ НА РЕГРЕСИОННИТЕ МОДЕЛИ	30
1. ПРЕДВАРИТЕЛНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ И ТЕСТВАНЕ НА АЛТЕРНАТИВНИ СЦЕНАРИИ	30
2. РЕЗУЛТАТИ ОТ РЕГРЕСИОННИТЕ ПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ	32
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ РЕГРЕСИОННИТЕ НЕПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ.....	33
4. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ.....	35
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА В СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ.....	36
1. ОЦЕНЪЧНИ КАРТИ ЗА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА.....	36
2. СЪЗДАВАНЕ НА СКРИПТОВЕ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДОЛОГИЯТА	37
3. СЪСТОЯНИЕ НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА ПРЕДИ И СЛЕД ПРЕЗИМУВАНЕ	37
4. ПРОДЪЛЖИТЕЛНОСТ НА ЦЪФТЕЖ НА ЗИМНА РАПИЦА	42
5. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
ПРИНОСИ	46
ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	47
БЛАГОДАРНОСТИ	48
СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНАТА ЛИТЕРАТУРА.....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОПРЕДЕЛЕНИ ПАРАМЕТРИ НА ЗИМНА РАПИЦА НА ТЕСТОВИТЕ ПОЛЕТА С ПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ОПРЕДЕЛЕНИ ПАРАМЕТРИ НА ЗИМНА РАПИЦА НА ТЕСТОВИТЕ ПОЛЕТА С НЕПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ.....	55
АВСТРАКТ	63

Списък на съкращенията

- AGBd** - Above Ground Biomass dry (Количество Суха Надземна фитомаса: стъбла, листа)
- AGBf** - fresh Above Ground Biomass (Количество Свежа Надземна фитомаса: стъбла, листа)
- CV** - Coefficient of Variation (Коефициент на вариация)
- DSM** - Digital Surface Model (Цифров модел на повърхността)
- GPR** - Gaussian Processes Regression (Гаусови процеси)
- HSV** - Hue, Saturation, Value color model, известен също като HSB (Hue, Saturation, Brightness)
- ISODATA** - Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
- KRR** - Kernel Ridge Regression
- LAI** - Leaf Area Index (Индекс на листна повърхност)
- LS-SVR** - Least Square Support Vector Regression (Опорни вектори с най-малък квадрат)
- LIDAR** - Laser Imaging, Detection, And Ranging (3D лазерно сканиране)
- NRMSE** - Normalized Root Mean Square Error (Нормализирана средна квадратична грешка)
- PLSR** - Partial Least Squares Regression
- RGB** - Red, Green, Blue color model
- RFR** - Random Forest Regression (Случайна гора)
- RMSE** - Root Mean Square Error (Средна квадратична грешка)
- S-2** - Изображения от Sentinel-2
- SAFY** - Simple Algorithm for Yield Estimate model
- STICS** - Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard model
- SVR** - Support Vector Regression (Опорни вектори)
- VI** - Vegetation Index (Вегетационен индекс)
- VF** - Vegetation Fraction (Общо площно покритие)
- БЛА** - Безпилотен Летателен Апарат
- ВИ** - Вегетационен Индекс
- СИ** - Спътникови Изображения

ВЪВЕДЕНИЕ

1. АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА

Дистанционният мониторинг на земеделските култури се практикува от 60те години на миналия век. Присъщите характеристики на селското стопанство го правят идеален обект за наблюдение и управление чрез дистанционни методи [1]. Част от тези характеристики са:

- земеделските стопанства се простират на големи площи, което прави конвенционалното изследване на полетата и определяне на тяхното състояние трудоемко и скъпо;
- голяма част от културите са годишни с различни етапи на растеж и развитие в различните сезони, което означава, че в селското стопанство дейностите имат очевидни фенологични ритми с много бърза вътрешно-годишна промяна;
- селското стопанство е силно зависимо от човешки дейности и управление, и поради това е необходима своевременна и точна информация.

Тези характеристики на селското стопанство изискват нови методи при мониторинга на растежа на селскостопанските култури.

Рапицата (*Brassica napus*) започва да се отглежда в България в края на XIX век, но до скоро не е имало голям интерес към нея. През 2001г, по данни от Министерството на земеделието и храните, реколтираните площи от рапица в България са едва 6901ha [2], а през 2018 те достигат 182619ha [3]. В България, и по света, се отглежда почти изцяло хибриди от рапица. Съществуват две форми рапица: зимна (*B.napus oleifera biennis*) и пролетна (*B.napus oleifera annua*). С по-голямо стопанско значение за нашата страна са зимните форми. Североизточна България е район, в който се засяват големи площи със зимна рапица [2]-[4].

Растенията развиващи се в естествена среда обикновено са възпрепятствани да изразят своя пълен генетичен потенциал за размножаване и се считат за "стресирани". Констатирано е [5], че растенията имат генетичния потенциал за много високи добиви, но продуктивността им обикновено е много по-слаба от потенциала. Добивите зависят почти наполовина от генетиката а другата половина - от торене, борба с вредители и други земеделски практики. Това твърдение е базирано на факта, че има много голяма разлика между рекордните добивите от една култура за определена година или район и средния добив. По данни от Министерството на земеделието и храните, за 2016г. средните добивите на зимна рапица в България варират от 2247kg/ha до 3333kg/ha [2].

Едни от най-добрите климатични условия за отглеждане на зимна рапица у нас са в Североизточна България [4]. Това предполага, че в този район, зимната рапица би могла да се доближи до своя пълен генетичен потенциал и да даде високи добиви. Въпреки това, има многобройни засети площи, които не са реколтирани поради непоникване или лошо презимуване. За 2016/2017г., Министерството на земеделието и храните публикува данни [15], [16] за засети над 183 хил. ha зимна рапица, от които се предвижда да бъдат реколтирани само около 168 хил. ha.

Европейският съюз е в процес на обсъждане на земеделската си политика след 2020, която предвижда по-малко субсидии за земеделието. Този факт, както и повишаване на екологичното съзнание на световните и българските фермери свързано с прецизното торене, най-вероятно ще доведат до необходимостта от по-прецизно следене на земеделието. В този контекст дистанционните изследвания на Земята ще могат да дадат част от необходимите инструменти за постигането на по-екологично земеделие и по-високи добиви.

Системата разработена по проект Sen4Cap (esa-sen4cap.org) позволява на разплащателните агенции (РА) в страните членки на Европейския съюз да осъществяват спътников контрол на Общата селскостопанска политика (ОСП). Sen4Cap използва данни от спътниците Sentinel на Европейската космическа агенция разработена за програмата „Коперник“ на Европейския съюз.

Една от насоките за развитие на програмата „Коперник“ (www.copernicus.eu/en/services) е предлагане на услуги за мониторинг на земната повърхност и в частност на земеделските култури.

2. ЦЕЛ, ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ, ХИПОТЕЗА И ЗАДАЧИ

Точното и навременно получаване на информация за състоянието на посевите от зимна рапица чрез дистанционни изследвания на Земята ще подобри земеделските практики и ще помогне за по-точно определяне на мерките, които да намалят негативните влияния от външни фактори върху посевите.

Цел на изследване е разработване на методология за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица на базата на спътникови данни в оптичния диапазон.

Обект на изследване са посеви от зимна рапица в Североизточна България.

Работна хипотеза на изследването е, че съществува корелационна зависимост между спектралните данни от спътникови изображения и фенологични, биометрични и физиологични показатели.

Наличието на такава зависимост позволява да се предложи методология за оценка на състоянието на зимна рапица само чрез дистанционни изследвания на Земята.

За постигане на поставената цел на изследването са определени следните **основни задачи**:

1. Теоретични анализи на съществуващите методи за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица
 - избор на оценяваните основни етапи и параметри от фенологичното развитие на посеви от зимна рапица;
 - подбор на регресионни модели за определяне на параметрите по спътникови данни;
 - селекция на методи за определяне на цъфтеж;
 - избор на методи за изготвяне на оценъчни карти.
2. Разработване на методология на изследването
 - планиране и провеждане на полеви кампании;
 - изграждане на гео-база данни;

- извеждане и валидиране на регресионните модели;
 - класификация за определяне на продължителност на цъфтеж;
 - съставяне на оценъчни карти на тестовите полета.
3. Прилагане на методология за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица в тестови участък „Североизточна България“
- създаване на методология на базата на резултатите от изследването;
 - създаване на скриптове на програмен език python за приложение на методология;
 - приложение на скриптовите за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица в Североизточна България за три вегетационни сезона.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧНИ АНАЛИЗИ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА

Навременната информация за състоянието на културата допринася за взимане на точни решения при управлението на земеделските площи [17]. Затова настоящето изследване се базира на конвенционалните методи за оценка на състоянието на посеви от рапица, за да определи как дистанционните методи могат да подобрят земеделските практики в Р. България.

1. КОНВЕНЦИОНАЛНИ МЕТОДИ ПРИ ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА

Един от основните етапи в развитието на зимната рапица е нейното презимуване [4], [20]. Тя трябва да бъде достатъчно развита, за да може да издържи на зимните условия. От друга страна прерасналите растения измръзват по-лесно. Рапицата е силно светлолюбива култура, като при заплевеляване или гъста сеитбена норма растенията растат устремно нагоре, за да си осигурят повече светлина. В същото време върхът на нарастване отива много над повърхността, кореновата шийка се оголва и растенията стават силно чувствителни към ниски температури.

При конвенционалния метод на оценка състоянието на посеви преди презимуване се следи достигне на най-малко четирилистния стадий, а още по-добре да е във вид на розетка, състояща се от 6-8 листа. Преди прекратяване на вегетацията растенията трябва да са развили от 6-8 до 10 лист. Това е залог за 70% от добива на културата и за неговата стабилност [11].

След възстановяване на пролетната вегетация се определя състоянието на посева след презимуване. Състоянието се определя спрямо гъстотата на оцелелите растения. След презимуването се взема решение за запазване на посева или неговото унищожение и презасяване с пролетна култура.

Равномерно поникнал и равномерно развит посев през есента и пролетта са едни от основните параметри, които се следят.

Рапицата е изключително взискателна към азотната обезпеченост на почвата. Редица параметри определят оптималната азотна норма на торене. Прилагането на метода на листната диагностика и определяне на процентно съдържание на азот в листата, позволява да се определи азотното внасяне за максимален добив [4].

Друг важен параметър за определяне състоянието на посев от рапица е продължителността на цъфтежа [4], [20]. Краткият период на цъфтежа дава силна индикация за слаб добив. За определяне на начало и край на цъфтеж, агрономите в Североизточна България използват тяхната експертна оценка и характерния за цъфтежа на рапицата жълт цвят. Смятат за начало на цъфтеж, когато 10% от посева е пожълтял, т.е. е в цъфтеж. И за край на цъфтежа, когато 90% от посева е прецъфтял.

Определените основни етапи от фенологичното развитие на зимна рапица за изследването са:

- преди и след презимуване
- фенофаза цъфтеж.

Определените параметри за следене в изследването са:

- количество свежа и суха надземна фитомаса,
- гъстота, височина и общо площно покритие на посева,
- общ азот в листни проби и
- продължителност на фенофаза цъфтеж.

2. ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ПРИ ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА

За мониторинг на земеделието, важно значение има навременната и специализирана информация за състоянието на културите, която може да се добие посредством дистанционните изследвания на Земята [36]. За целта са необходими относително чести дистанционни наблюдения, със сравнително висока пространствена, времева и спектрална разделителна способност. Досегашните недостатъците на дистанционните изследвания на Земята са ниска времева, спектрална и пространствена разделителна способност, в голяма степен са преодолени с мисията Sentinel-2 на Европейската космическа агенция разработена за програмата „Коперник“ на Европейския съюз. Благодарение на сателитите Sentinel-2A и Sentinel-2B изображенията са с времева разделителна способност от няколко дена, пространствена разделителна способност от 10m и 20m и висока спектрална разделителна способност. Поради този факт настоящото проучване използва изображения от Sentinel-2.

Определяне на параметри на посеви от зимна рапица преди и след презимуване

В настоящият раздел са разгледани и предложени методи за дистанционно определяне на параметрите за следене, при оценката на състоянието на зимна рапица, набелязани след анализа на конвенционалните методи за наблюдение на зимна рапица. Настоящият обзор разглежда само дистанционни методи в оптичния спектрален диапазон и на нивото на короната на зимната рапицата.

Зимата рапица преминава през три основни етапа на морфология на короната си по време на своето развитие. Първият етап се характеризира с развитието на зелени листа и биомаса, вторият с жълт цъфтеж и третият с образуване на шушулки и семена.

Мониторингът на селскостопанските култури чрез оптични дистанционните изследвания на Земята е сложен процес. Параметрите необходими на селските стопани се определят чрез моделиране на информация от дистанционните изследвания [41], [42]. Схематично, оптичните дистанционни методи предлагат информация за отразената от обекта на изследване слънчева радиация в пространството и времето. За да се определят параметрите на посева се използват качествени и количествени методи [43]. Качествените използват класификация с правила за определяне на всеки пиксел в съответен клас. Количествените се разделят на три големи групи: емпирични [43], физични [44], [45] или хибридни [46]. Емпиричните, от своя страна, се разделят на две подгрупи: тези, които използват параметрични функции с една променлива, която е обикновено вегетационен индекс (ВИ), и непараметрични алгоритми, които използват цялата налична спектрална информация. Настоящото изследване съсредоточава усилията си върху емпиричните методи за определяне на параметрите на посев от зимна рапица.

Определяне на продължителността на цъфтеж на посеви от зимна рапица

За определяне на продължителност на цъфтеж предлагаме да определим дата на начало и дата на край на цъфтеж. За дата на начало на цъфтеж смятаме, когато 10% от посева е пожълтял, т.е. е в цъфтеж. И за дата на край на цъфтежа, когато 90% от посева е прецъфтял.

Има направени проучвания, които определят броя на цветчетата при култури също цъфтящи с жълт цвят [77], в които са използвани данни от полеви спекторрадиометър с диапазон 268-1095nm и непараметрични алгоритми, като (PLSR). За определяне на начало и край на цъфтеж на посеви могат да се използват ВИ [49], [96]-[98], а също така и времеви серии [99]. Интересен метод за определяне на цвят е ортогоналната трансформация [100].

За да може да се оцени даден метод, който използва дистанционни данни трябва да се съпостави спрямо наземни измервания и наблюдения. Тези измервания, като например преброяване на цветчета, са много трудоемки и отнемат много време. Друга възможност е да се използват RGB изображения от БЛА [101], [102].

Агрономите използват жълтия цвят при цъфтежа на рапицата за определяне на началото и края на цъфтежа. Но различните хора възприемат цвета много субективно [107]-[109]. Също така светлинните условия и настройките на използваната камера играят роля в заснемането на цветовете в изображенията. Преобразуването на цветовия модел RGB в друг цветови модел, който отделя информацията за интензитета (или яркостта) от информацията за цвета в RGB изображенията е полезно за цвотова сегментация на изображението в променливи условия на осветление [110]-[112]. Това е характерно за селскостопанските изследвания на открито.

Трансформирането на RGB в HSV (Hue-Saturation-Value) цветови модел дава добри резултати като предварителна стъпка преди класификацията в селскостопански изследвания, [98], [113], [115] и мониторинг на растителност [116] в променящите се условия на осветеност.

Оценъчни карти за състоянието на посеви

Интегрирана система за дистанционно определяне на състоянието на посеви на земеделски култури приложима на локално ниво - най-значимото научно-приложно постижение на ИКИТ-БАН за 2019г. - бе създадена, експериментално тествана и патентно защитена. Интегрираната система е създадена от екип от секция „Дистанционни изследвания и ГИС“ към ИКИТ-БАН – проф. Е. Руменина, проф. Г. Желев, доц. П. Димитров, доц. Л. Филчев, ас. И. Каменова, доц. А. Гиков и учени от ИПАЗР „Н. Пушкиров“ – проф. М. Банов, проф. В. Кръстева, доц. М. Керчева и доц. В. Колчаков. Тя е патентно защитена (Патент № 3283 U1/27.09.2019) [121]. Патентоприитежател е ИКИТ-БАН. Патентът е тестван с посеви от зимна пшеница и използва ВИ и регресионни параметрични алгоритми.

Не са намерени проучвания за определяне състоянието на посеви от зимна рапица преди и след презимуване, нито такива за определяне на продължителност на цъфтеж.

3. ИЗВОДИ

Направеният теоретичен анализ за настоящето изследване показва, че няма разработена методология за оценка на състоянието на зимна рапица на базата на дистанционни изследвания на Земята, а има нужда от такава за дистанционно следене на състоянието на зимна рапица преди и след презимуване в България и за определяне на продължителност на цъфтеж.

Благодарение на сателитите Sentinel-2A и Sentinel-2B получаваме изображения с висока времева, пространствена и спектрална разделителна способност, поради което настоящото проучване използва изображения от Sentinel-2.

От проведенният критичен анализ на литературата за **определяне на параметри на зимна рапица** чрез регресионни модели може да се направят следните конкретни изводи:

1. За първи път в настоящето проучване са реализирани изследвания, които определят надземна свежа фитомаса (AGBf) на зимна рапица с параметрични и непараметрични модели [81].
2. За определянето на количество надземна суха фитомаса (AGBd) на зимна рапица са използвани ВИ с параметрични [47], [80] и за първи път, за настоящето изследване, са използвани непараметрични модели [81].
3. За определяне на височина на посева (PlantH) на зимна рапица има много малко изследванията. Те използват ВИ с параметрични модели [52]. За първи път, за настоящето изследване, са използвани непараметрични модели за определяне на височината на посев от рапица [86].
4. Подобно на определяне на височина на посева, изследванията за определяне на гъстота на посева (NbPlant) са сравнително оскъдни и използват ВИ с параметрични модели [51], [87]. За първи път, за настоящето изследване, са използвани непараметрични модели за определяне на гъстота на посев от рапица [86].
5. Общото площно покритие е параметър, който е изучаван отдавна. За определянето му на посев от рапица са използвани ВИ с параметрични

модели [37]. За първи път, за настоящето изследване, са използвани непараметрични модели за определяне на общо площно покритие на посев от рапица [86].

- б. За определяне на съдържание на азот се използват непараметрични модели с наземни данни на ниво лист [60], [62], [63] или на ниво посев [61], [64] от зимна рапица. Но всички тези изследвания използват лабораторен или полеви спектрометър. За първи път, за настоящето изследване, са използвани параметрични и непараметрични модели за определяне на общ азот в листни проби за посеви от зимна рапица [86].

В тази връзка, настоящето изследване съсредоточава усилията си две посоки, които имат нужда от по-задълбочен анализ:

- параметрични модели, които биха позволили намирането на нов ВИ или валидирането на вече съществуващ ВИ и приложението му за Sentinel-2 и зимна рапица в България;
- непараметрични модели, които биха позволили определянето на избраните параметри на зимна рапица в България на база данни от Sentinel-2.

От проведеният критичен анализ на литературата за **определяне на продължителност на цъфтеж на зимна рапица** може да се направят следните конкретни изводи:

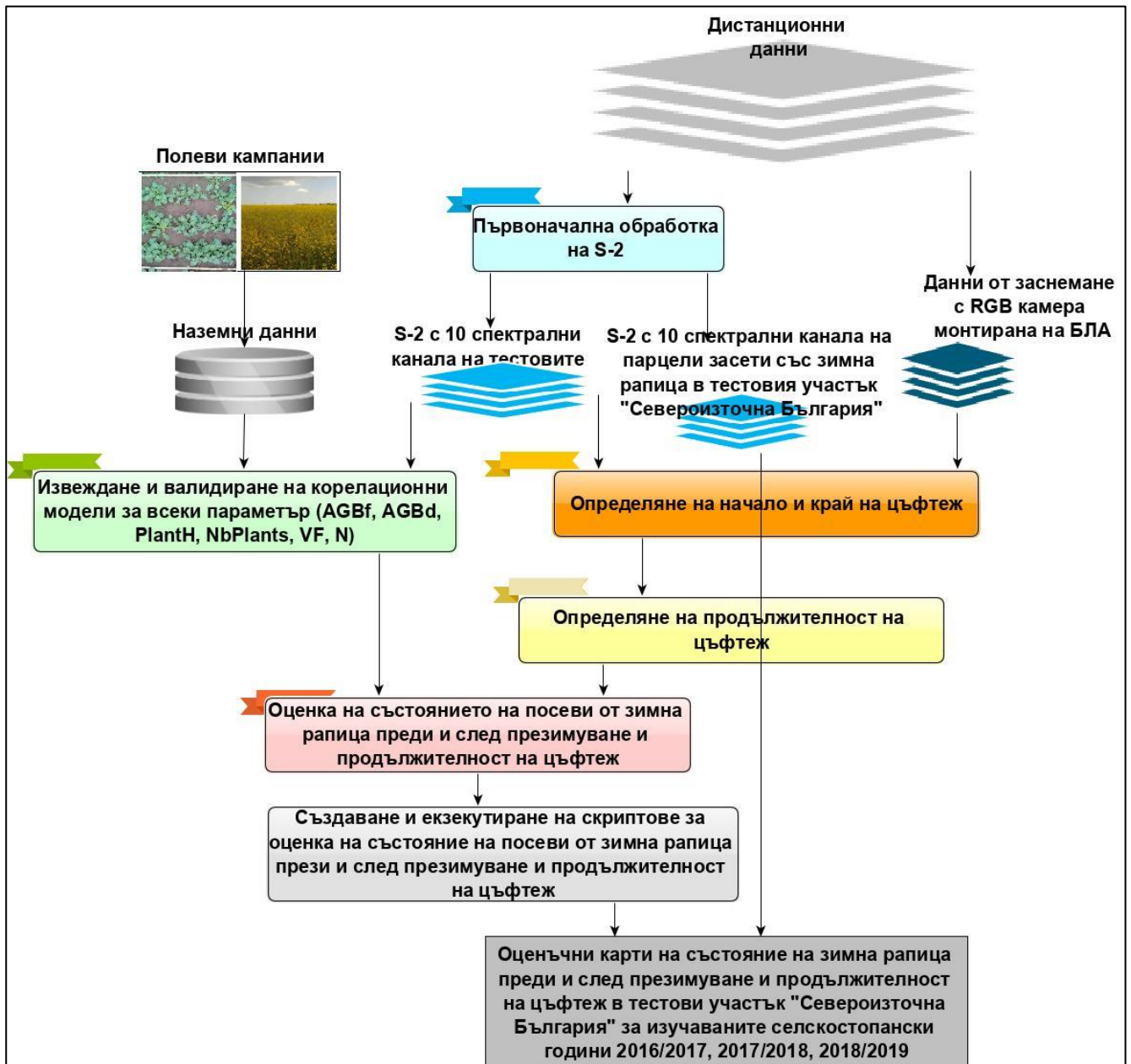
1. Има направени проучвания, които използват ВИ за дистанционно определяне на броя на цветчетата при култури цъфтящи с жълт цвят [77] и зимна рапица [49], [96]-[98].
2. За да се избегне трудоемкото и скъпо наземно валидиране може да се използват RGB изображения от БЛА. За по-точна цвetoва сегментация на изображенията в променливи условия на осветление предлагаме да се преобразуват RGB в HSV цвetoви модел, който отделя информацията за интензитета (или яркостта) от информацията за цвeto в RGB изображенията.

От проведеният критичен анализ на литературата за **оценка на състоянието на зимна рапица** може да се направят следните конкретни изводи:

1. Няма намерени проучвания за определяне състоянието на посеви от зимна рапица. „Интегрирана система за дистанционно определяне на състоянието на посеви на земеделски култури“ [121] е интересна платформа за тестване ѝ за посеви от зимна рапица.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Разработената методология на изследването е представена на Фиг. 3. За тази цел е избран тестови участък, „Североизточна България“, и седем тестови полета, Фиг. 4. Изследването покрива три вегетационни периода, 2016/2017, 2017/2018 и 2018/2019.

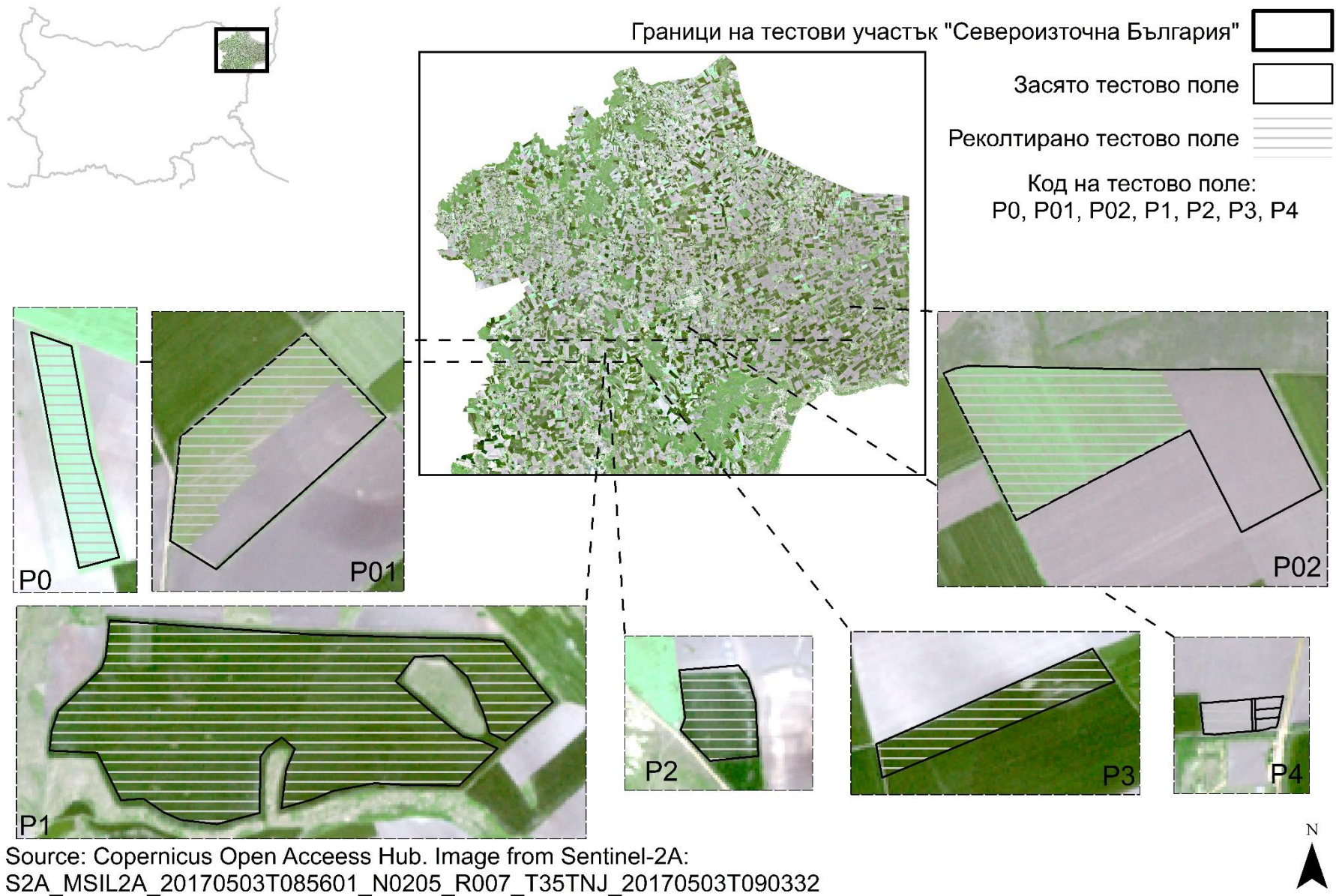


Фиг. 3. Обобщена функционална схема на методологията на изследването

1. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Използваните методи в настоящето изследване могат да се разделят на няколко групи:

- Методи използвани при полевите изследвания: за събиране на наземни наблюдения и биометрични измервания синхронизирани с датите на преминаване на Sentinel-2;
- Методи използвани при обработка на дистанционни данни;
- Методи за оценка на състоянието на посеви от зимна рапица, които използват резултатите от първите два метода и ги прилагат автоматично, чрез скриптове на Python [122].



Фиг. 4. Тестови участък и тестови полета, на които са проведени полевите кампании

1.1. Методи използвани при полевите изследвания

Наземните данни са от масови полета или тестови полета на фирма Пионер/Кортева. Основните характеристики на всеки тестови полета са описани в Таблица 7.

Таблица 7. Основни характеристики на тестовите полета 2017-2018-2019

Код на тестово поле	Площ (ha)	Хибрид (Фирма)	Дата на сеитба	Сеитбена норма растения/м ²	Добив kg/ha
P0	24	PX113, PR44D06, PR44W29, PT234, PT225, PR46W21, PT022, PT023, PT200CL, PT228CL, PT225 Lumiposa (Пионер)	2.09.2016	57	4280
P01	46/26*	MH10N6	21.9.2016	40-45	2800
P02	69.5/42.5*	DKC excelium (Декалб)	17.9.2016	40-45	2800
P1	137	PR44D06, PT225, PT264 (Пионер)	3.09.2017, 4.09.3017, 5.09.2017	80	2960
P2	10	Ексторм (Декалб)	20.08.2017	56	3300
P3	30	Ексторм, Експаур (Декалб)	4.09.2017	76	3670
P4	3.8	PR44D06, PT225, PT264 (Пионер)	10.09.2018	120	400

*: засята площ/реколтирана площ

За събиране на наземни наблюдения и измервания са планирани и проведени 36 полеви кампании синхронизирани с датите на преминаване на Sentinel-2. Измерванията и наблюденията са направени през три вегетационни периода, 2016/2017, 2017/2018 и 2018/2019. Наземните измерванията са направени на предварително определен GPS пункт на пробонабиране и са описани в Таблица 9. Фенофазата е определена експертно от агронома отговорен за тестовите полета.

Таблица 9. Описание на използваните методи за теренни и лабораторни измервания

Измерване	Код на измерването	Методика на провеждане на измерването
Свежа надземна фитомаса (g/m ²)	AGBf	Растенията които попадат в метровката (1 m ²) са изрязани до земята, сложени са в маркиран хартиен плик. Всички хартиени пликкове от различните проби са поставени в найлонови пликкове за пренасяне до лабораторията. В лабораторията са занесени на същия ден, където всеки плик е измерен за определяне на свежата фитомаса. В следствие тежестта на всеки плик е изваден от общата стойност за получаване на тегло на свежа фитомаса на m ²
Суха надземна фитомаса (g/m ²)	AGBd	В лабораторни условия от извадка от свежата фитомаса, в рамките на 24 часа след получаването ѝ, по тегловен метод в термостат (изсушаване на свежата фитомаса при температура 105°C до получаване на абсолютно сухо вещество) се определя сухата фитомаса. Пропорционално се определя теглото на сухата фитомаса на m ²
Височина на растенията (cm)	PlantH	От 3 измервания в метровката (1 m ²), с линия поставена на земята до растението до най-високата точка на растението, е изчислена средна стойност. Измерването се извършва на полето.

Гъстота на посева (брой растения/m ²)	NbPlant	Растенията в метровката (1 m ²) са броени и записани. Измерването се извършва на полето
Общо площно покритие на рапица и плевели (%)	VF	От метровка (1 m ²) поставена в посева, чрез експертна оценка се определя общото площно покритие на растителността, което включва растителната покривка от рапица и плевели. Измерването се извършва на полето.
Общ азот в листни проби (g/kg от свежа фитомаса)	N	В лабораторни условия от извадка от свежата биомаса, в рамките на 24 часа след получаването ѝ, по метода на Келдал (Kjeldahl method) се определя общия азот в листни проби като % в свежа надземна фитомаса

За наземните измервания са определени пунктове за пробонабиране, а наземните наблюдения са правени от края на тестовите полета, който е най-лесно достъпен. Пунктовете на пробонабиране са определени така, че да обхванат максимално разнородността в развитието на посева на зимната рапица в тестовите полета по следната методика: 1) изчисляване на ВИ [Таблица 10] на тестовите полета на СИ преди полевата кампания; 2) по експертна оценка са избрани пунктовете на пробонабиране.

Таблица 10. Списък на вегетационни индекси на базата, на които са избрани пунктовете на пробонабиране

Моделиран параметър	Наименование на ВИ	Формула на ВИ	Литература
Надземна биомаса, гъстота на посева след поникване	RVI (Ratio Vegetation Index)	NIR/Red	[39]
Надземна биомаса	OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$(1+L)(NIR-Red)/(NIR+Red+L)$ (L = 0.16)	[35]
Индекс на листна повърхност	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$(1+L)(NIR-Red)/(NIR+Red+L)$ (L = 0.5)	[123]
Съдържание на хлорофил и азот в посева	ClredEdge	R783/R705-1	[124]
Височина на посева	EVI (Enhanced Vegetation Index)	$G \times ((RNIR-Rred)/(RNIR+C1 \times Rred-C2 \times Rbleu +L))$; G=2.5; C1=6; C2=7,5; L=1	[40]
Общо площно покритие	VARIGreen (Visible Atmospherically Resistant Index)	$(R550 - R670)/(R550 + R670)$	[37]
Гъстота на посева след поникване	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR-Red)/(NIR+Red)$	[39]

1.2. Методи използвани при обработката на дистанционните данни

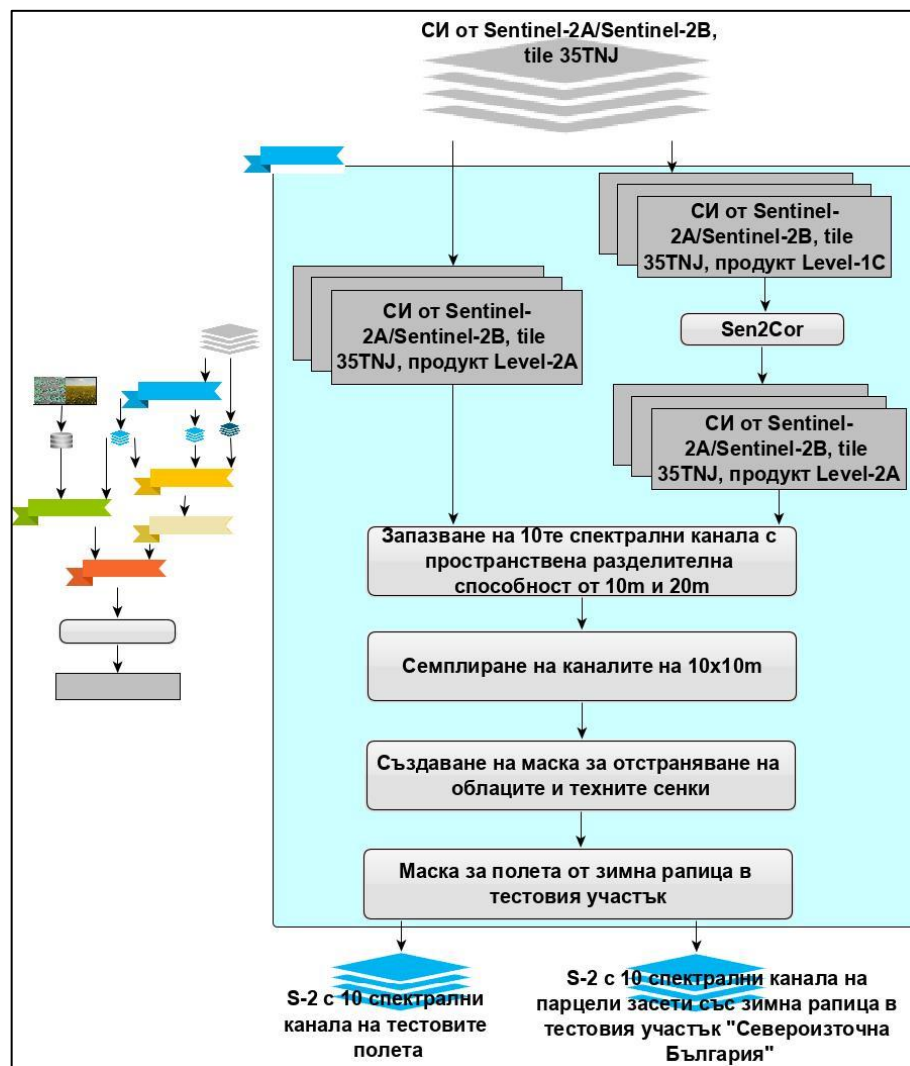
Това са комплекс от методи, които се прилагат върху дистанционни многоканални данни в оптичния диапазон, СИ от Sentinel-2 и данни от заснемане от БЛА.

Първоначална обработка на СИ

Първоначалната обработка на СИ от Sentinel-2 е представена на Фиг. 5. Продуктите от тип Level-1C са преизчислени в Level-2A с Sen2Cor v2.8.

Отстраняването на облаците и техните сенки са направени на базата на информацията от класификацията на СИ следствие на преобразуването им от продукти от тип 1C в 2A [125]. Използваната маска включва следните кодове: 0:Nodata; 1: Saturated or Defective; 2: Dark Area Pixels; 3: Cloud Shadows; 6: Water; 8: Clouds medium probability; 9: Clouds high probability; 10:Thin Cirrus; 11: Snow

Софтуерният код на Python, написан за настоящето изследване, който обработва автоматично СИ е предоставен под формата на отворен код в <https://github.com/dganeva/RapeseedCropsAssessment>.

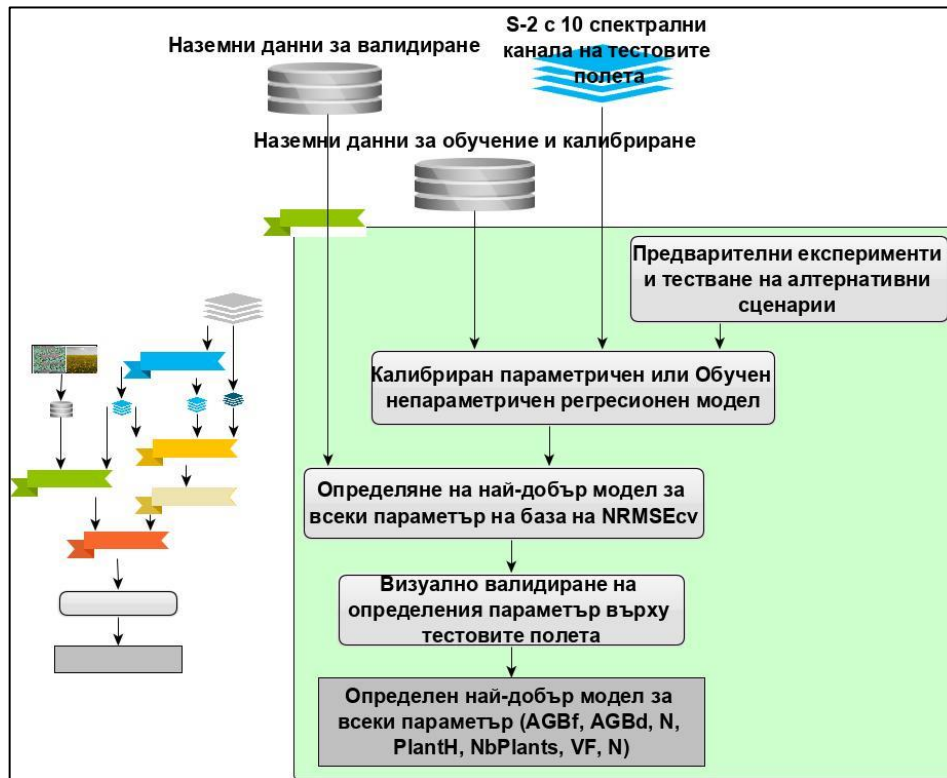


Фиг. 5. Структурна схема за първоначална обработка на спътникови изображения от Sentinel-2

Извеждане и валидиране на регресионни модели за определяне на параметри от посеви от зимна рапица

Извеждането и валидирането на регресионните модели използвани при определяне на параметрите на посеви от зимна рапица е представено на Фиг. 6.

Първата стъпка при моделирането се състои в концептуализация и избор на обучаващите регресионни параметрични с една променлива и непараметрични с много променливи алгоритми [46]. За приложението на тези алгоритми е използван софтуерния продукт Automated Radiative Transfer Models Operator (ARTMO), разработен в Image Processing Laboratory на Университета във Валенсия (<https://artmotoolbox.com>).



Фиг. 6. Структурна схема за извеждане на най-добрите параметрични и непараметрични регресионни модели за определяне на параметри на посеви от зимна рапица

По време на етапа на обучение, параметрите на всеки модел са оптимизирани така, че моделът да бъде толкова добър колкото наличните данни позволяват [126]. Част от обучението на модел се състои в предварителни експерименти и тестване на алтернативни сценарии [127]. Тестваните алтернативни сценарии [81] са:

1. Включване на гола почва във входните данни.
2. Осредняване на стойностите от 9 пиксела около този, в който попада пункта на пробонабиране.
3. Изследвано е отношението между отклонението (bias) и дисперсията (variance) на параметрични и непараметрични алгоритми.
4. Изследвана е необходимостта от намаляване на размерността (dimensionality reduction).
5. Наземните данни са тестване за аномални стойности с тест на Grubbs [131].

За калибриране на параметричните и обучение на непараметрични модели се използват спектрални и наземни данни. За оптимизиране на моделите се използва кръстосано валидиране (cross-validation), което избягва плътното прилягане на модела към данните за калибрация/обучение (overfitting) и дава индикация за това колко добре моделът предвижда нови данни.

Наличните данни са разделени на три части: за обучение/калибриране, за кръстосано валидиране и за външно валидиране в пропорция 60/20/20.

В настоящето изследване статистическата оценка на точността на моделите се основава на нормализирана средната квадратична грешка ($NRMSE = RMSE/Range(Obs)$) и на коефициента на детерминация (R^2). Като $NRMSE$ дава, от една страна, информация за величината на грешката, а от друга, позволява сравнение на различните модели, защото няма измерение. R^2 показва силата на зависимост между входните данни и симулираните параметри.

Трябва да се подчертае важното място, което заема визуалното валидиране на определените параметри върху тестовите полета.

При параметричните модели се използват формули с две, три или четири променливи и определена параметрична функция. ARTMO тества всички данни от спектралните налични канали с всяка от избраните функции и определя има ли емпирична зависимост между спектралните данни под формата на една величина, стойността от формулата, и наземните данни. Тестваните формули и функции са дадени в Таблица 11 и Таблица 12.

Таблица 11. Списък на тестваните формули с данни от спектрални канали за определяне на параметри на посеви от зимна рапица

Наименование	Формула*	Литература
R	Ra	[133]
SR	Ra/Rb	[133]
DVI	Ra-Rb	[133]
ND	$(Ra-Rb)/(Ra+Rb)$	[133]
mSR	$(Ra-Rc)/(Rb-Rc)$	[133]
mSR2	$(Ra/Rb)-1$	[124]
mND	$(Ra-Rb)/(Ra+Rb-2Rc)$	[133]
3SBI-Verrelst	$(Ra-Rc)/(Rb+Rc)$	[134]
3SBI-Tian	$(Ra-Rb-Rc)/(Ra+Rb+Rc)$	[135]
3SBI-Wang	$(Ra-Rb+2Rc)/(Ra+Rb-2Rc)$	[136]
3BSI-Dash	$(Ra-Rb)/(Rb-Rc)$	Базиран на MTCI [137]
4BSI	$((Ra-Rb)/(Ra+Rb))/((Rc-Rd)/(Rc+Rd))$	Базиран на CCCI [138]

*: Ra, Rb, Rc и Rd представляват спектралното отражение на канали с различна дължината на вълната

Таблица 12. Списък на тестваните параметрични функции за определяне на параметри на посеви от зимна рапица

Наименование	Функция
Линейна	$F(x) = a*x+b$
Експоненциална	$F(x) = a*\exp(b*x)$
Логаритмична	$F(x) = a+b*\log(x)$
Показателна	$F(x) = a*x^b$
Полиномиална	$F(x)=a_2*x^2+a_1*x+a_0$

От многобройните непараметрични регресионни алгоритми, които са прилагани [139] за определяне на параметри на посеви, в настоящето проучване са тествани няколко линейни и нелинейни алгоритми [Таблица 13].

Таблица 13. Списък на тестваните непараметрични алгоритми за определяне на параметри от посеви от зимна рапица

Пълно наименование на регресионния анализ	Съкратено наименование	Вид регресионен анализ	Литература
PLSR (Partial Least Squares Regression)	PLSR	Линеен (Linear)	[140]
Случайна гора (Random Forest Regression)	RFR	Дърво на решения (Decision Tree)	[141]
Метод на опорни вектори (Support Vector Regression)	SVR	Базиран на функционални ядра (Kernel based)	[142]
Метод на опорни вектори с най-малък квадрат (Kernel Ridge Regression or Least Square Support Vector Regression)	KRR LS-SVM	Базиран на функционални ядра (Kernel based)	[143]
Гаусови процеси (Gaussian Processes Regression)	GPR	Базиран на функционални ядра (Kernel based)	[144]

Определяне на дата на начало и край на цъфтеж

Продължителността на цъфтежа се изчислява след определяне на дата на начало и край на цъфтеж [Фиг. 8].

От различните методи за определяне на начало и край на цъфтеж в настоящето проучване са използвани ВИ. От направена литературна справка са избрани ВИ описани в Таблица 14.

Таблица 14. Списък на тестваните вегетационни индекси за определяне на начало и край на цъфтеж на зимна рапица

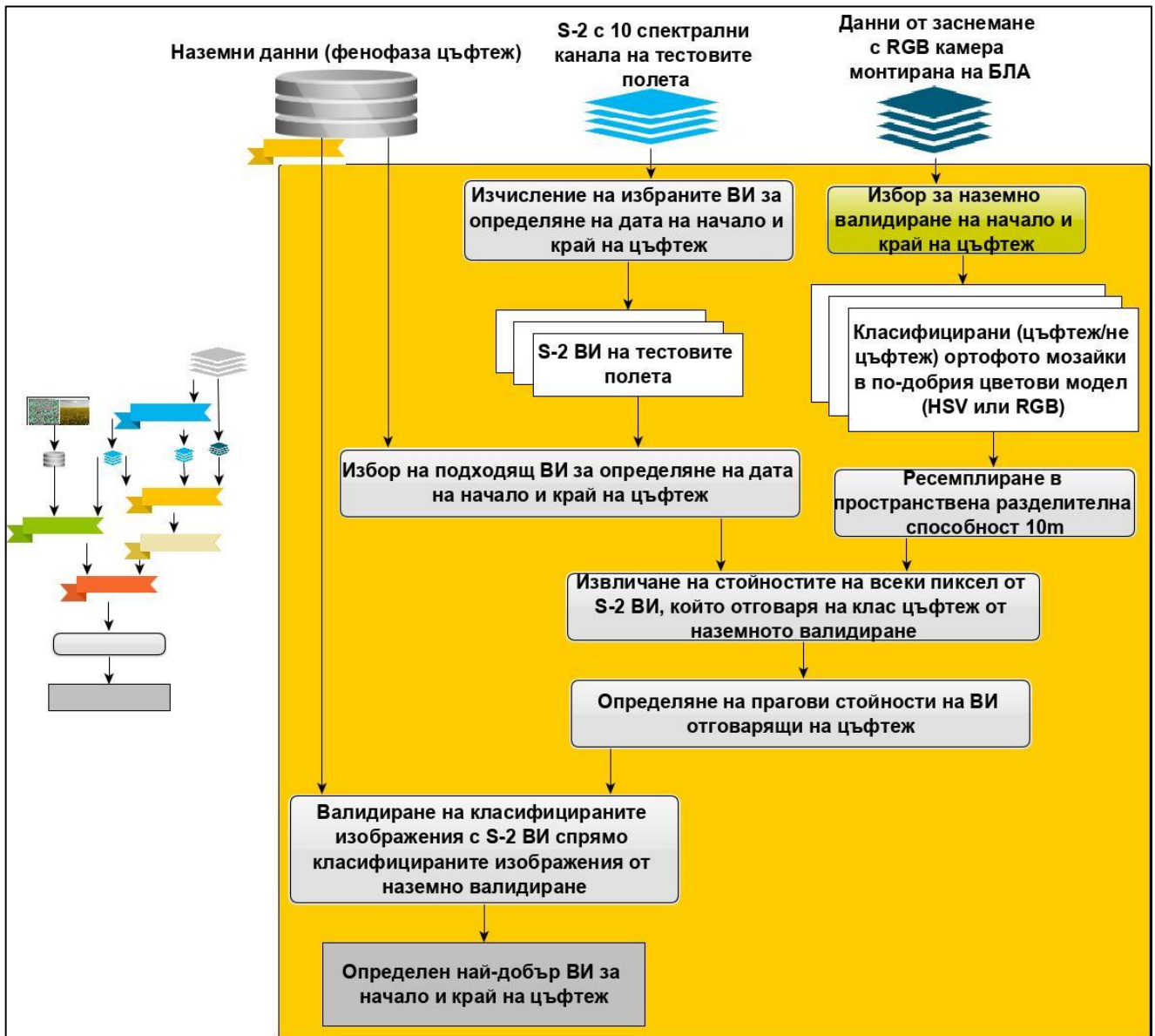
Име на ВИ	Формула на ВИ	Литература
GtoB	$GtoB = Green/Blue$	[96]
NDVIblue	$NDVIblue = \frac{RNIR - Rblue}{RNIR + Rblue}$	[97]
NDYI	$NDYI = \frac{Rgreen - Rblue}{Rgreen + Rblue}$	[97]
NDVI	$NDVI = \frac{RNIR - Rred}{RNIR + Rred}$	[37]
VARIGreen	$VARIGreen = \frac{Rgreen - Rred}{Rgreen + Rred}$	[37][98]

Наземно валидиране за начало и край на цъфтеж

В настоящето проучване, са използвани RGB изображения от БЛА за наземно валидиране на начало и край на цъфтеж [Фиг. 9].

Софтуерният продукт Pix4DCapture е използван за план на полета, а Pix4Dag v4.1.25 за създаване на RGB ортофото мозайка.

Ортофото мозайката е трансформирана (Excelis ENVI v5.0) от RGB в HSV (Hue, Saturation, Value) цветови модел. В цветовия модел HSV (Hue, Saturation, Value), H определя цвета, S чистотата му, а V цветната яркост. По този начин компонентът (V), който се променя с променящите се условия на осветеност, се отделя от информацията за цвят (H и S).



Фиг. 8. Структурна схема на разработената методика за определяне на дата на начало и край на цъфтеж на зимна рапица

Класификацията без обучение (Excelis ENVI v5.0) е на база на ISO клъстерни алгоритми (ISODATA unsupervised classification).

Цветовият модел, който дава по-добри резултати при оценка на точността е избран за наземно валидиране за начало и край на цъфтеж.

Класификацията на RGB и HSV изображенията са оценени с капа стойност (\hat{K}), формула 1, с пунктове с референтни данни, които са независими едни от други. Те са оценени също така с McNemar тест [145] с пунктове с едни и същи референтни данни, за сравнение на двете класификации.

$$\hat{K} = \frac{\text{Observed Accuracy}}{1 - \text{Expected Accuracy}} \quad (1)$$

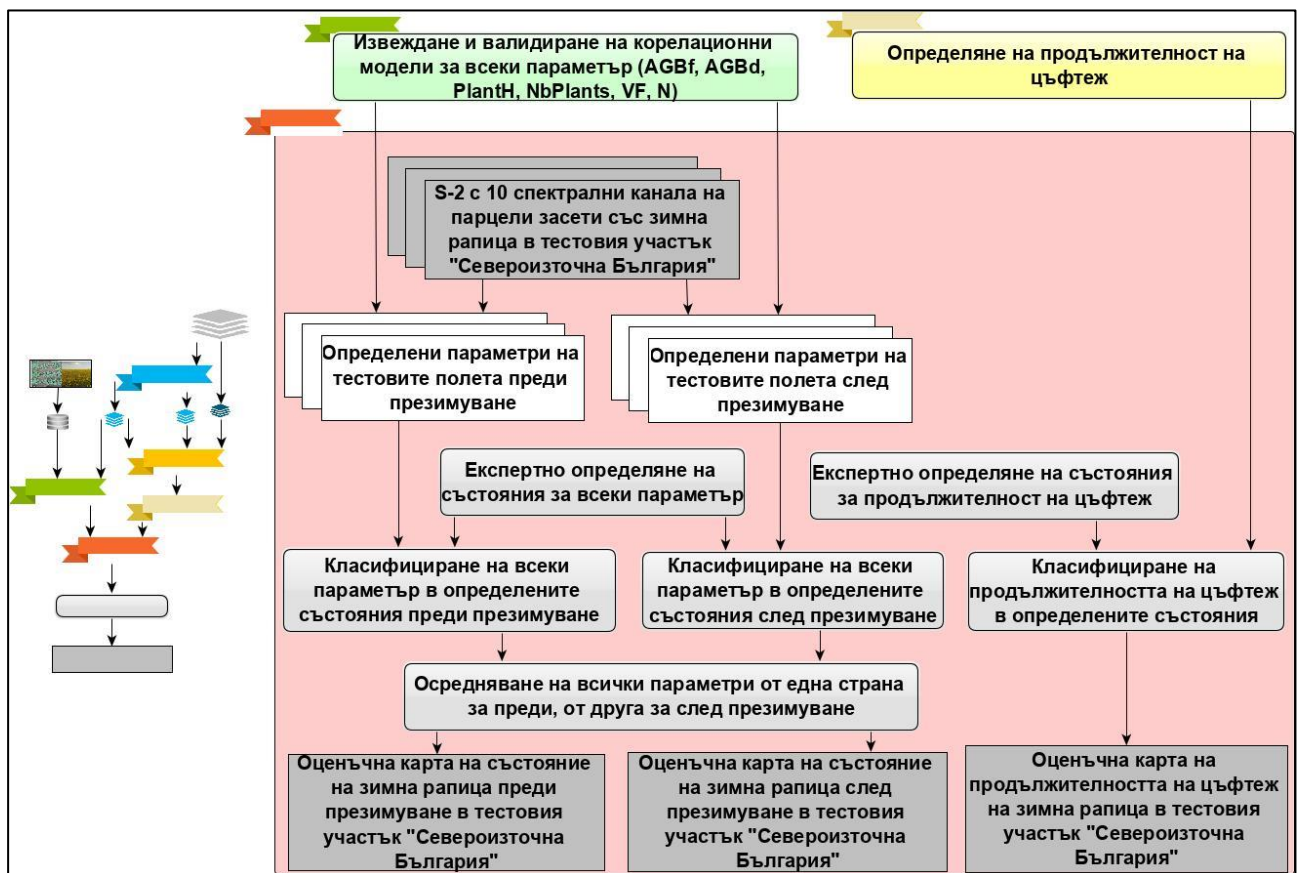


Фиг. 9. Структурна схема на разработената методика за избор на наземно валидиране за начало и край на цъфтеж на зимна рапица

Броят пунктове за оценка на точността е 50 пъти по-голям от броя на класовете [146] и се разпределя на случаен принцип във всеки клас. Всеки клас има брой пунктове, пропорционални на относителната му площ. Референтните данни са оценени ръчно от оператор спрямо RGB ортофото мозайката.

1.3. Методи за оценка на състояние на посеви

Настоящото изследване използва методика [Фиг. 10] за определяне на състоянието на зимна рапица преди и след презимуване и оценка на продължителност на цъфтеж, която се основава на патента за „Интегрирана система за дистанционно определяне на състоянието на посеви на земеделски култури“ [121]. В настоящето изследване тази система е успешно тествана за определяне на състояние на зимна рапица и е кодирана от автора на Python.

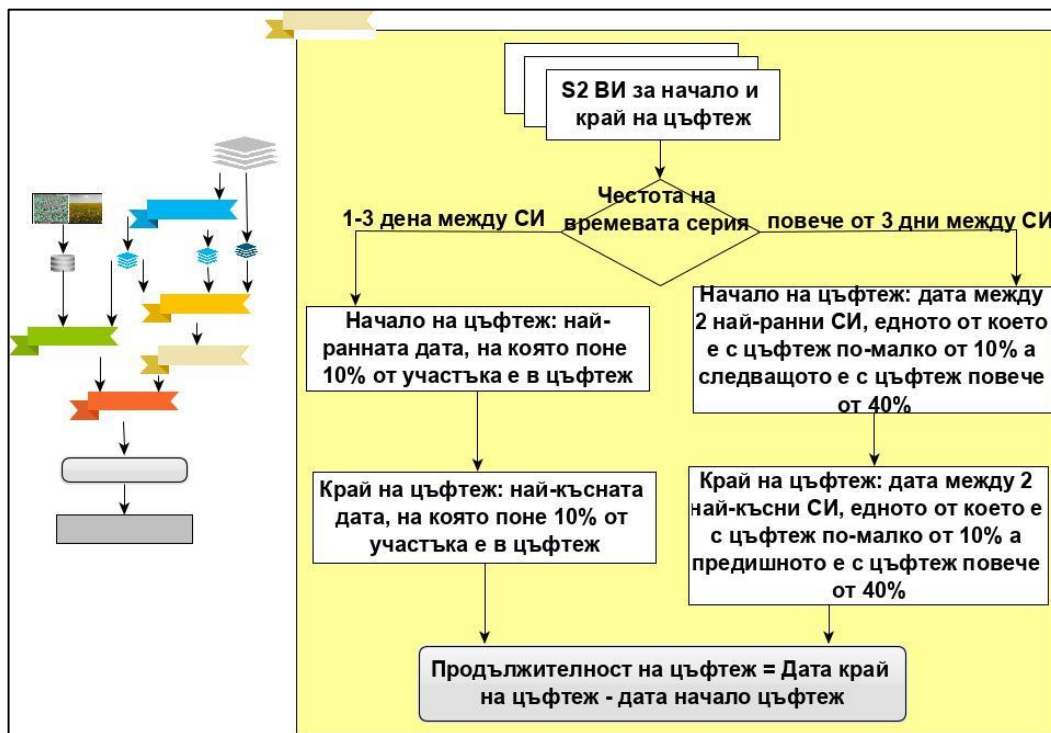


Фиг. 10. Структурна схема на разработената методика за оценка на състоянието на зимна рапица преди и след презимуване и продължителност на цъфтеж

Състоянието на зимната рапица преди и след презимуване се изчислява на СИ с дата определена от наземните данни, като дата за прекратена есенна и възстановена пролетна вегетация или най-близката възможна.

Оценката на продължителността на цъфтеж се изчислява на времева серия от СИ. Времевата серия за определяне на начало и край на цъфтеж и е избрана така, че първото и последно СИ да е извън периода на цъфтежа. За начало и край на цъфтеж е приета дата, на която посева е с 10% цъфтеж. Периодът на началото и край на цъфтеж обикновено е в рамките на един до няколко дни, и има голяма вероятност да попадне извън наличните във времевата серия СИ. Методиката за определяне на продължителността на цъфтеж е представена на Фиг. 11.

Трите състояния (добро, средно, лошо) за всеки параметър/продължителност на цъфтеж са определени експертно от автора Десислава Ганева и са коригирани и валидирани от Георги Герджиков, агроном [Таблица 8]. Надземната фитомаса е измерена под формата на свежа (AGBf) и суха (AGBd). Един от тези два измерени параметри ще бъде избран при изготвяне на оценъчните карти, защото те отразяват сходен физиологичен компонент. Така определеното състояние може да претърпи промени в зависимост от грешката, която е изчислена при определяне на всеки параметър.



Фиг. 11. Структурна схема на разработената методика за определяне на продължителност на цъфтеж

Таблица 8. Експертно избрани стойности на различните параметри, които имат роля за определяне на състоянието (добро, средно, лошо) на посевите от зимна рапица

Параметър	Добро	Средно	Лошо
Преди презимуване			
AGBf (g/m ²)	250 < AGBf < 400	250 < AGBf < 200	AGBf < 200 400 < AGBf
AGBd (g/m ²)	30 < AGBd < 50	50 < AGBd < 100	AGBd < 30 100 < AGBd
PlantH (cm)	10 < PlantH < 15	5 < PlantH < 10; 15 < PlantH < 20	PlantH < 5 20 < PlantH
NbPlant (растения/m ²)	30 < NbPlant < 50	10 < NbPlant < 30; 50 < NbPlant < 60	NbPlant < 10 60 < NbPlant
VF (%)	40 < VF	25 < VF < 40	VF < 25
N (g/kg)	10 < N < 12	12 < N	N < 10
След презимуване			
AGBf (g/m ²)	1800 < AGBf	1000 < AGBf < 1800	AGBf < 1000
AGBd (g/m ²)	200 < AGBd	100 < AGBd < 200	AGBd < 100
PlantH (cm)	30 < PlantH	30 < PlantH < 15	PlantH < 15
NbPlant (растения/m ²)	30 < NbPlant < 50	10 < NbPlant < 30 50 < NbPlant < 60	NbPlant < 10 60 < NbPlant
VF (%)	50 < VF	40 < VF < 50	VF < 40
N (g/kg)	9 < N < 11	11 < N	N < 9
Продължителност на цъфтеж			
Продължителност на цъфтеж (дни)	23 <	23 < < 15	< 15

2. ГЕО-БАЗА ДАННИ

2.1. Наземни данни

- Данни от наземни измервания на тестовите полета
- Данни от наземни наблюдения и заснемане с фотокамера на тестовите полета
- Данни от метеостанции
- Административни данни

Данни от наземни измервания на тестовите полета

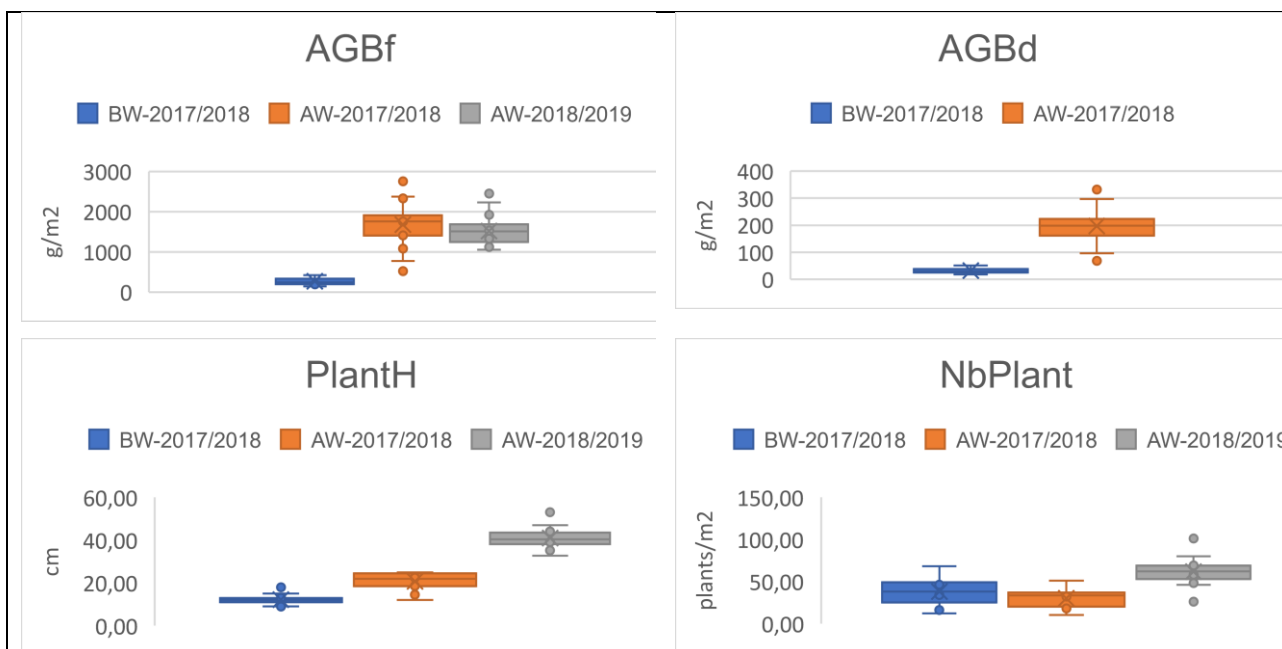
Основните характеристики на измерванията са дадени в Таблица 16 и Фиг. 12.

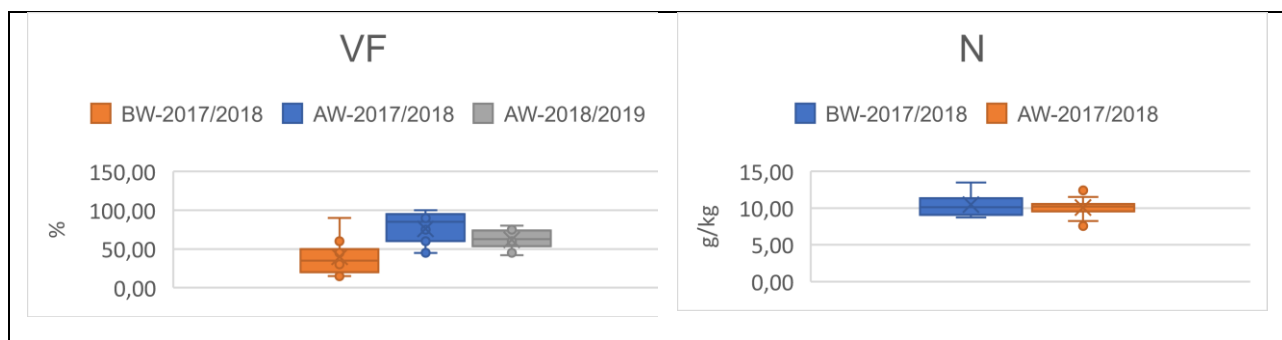
Таблица 16: Основните характеристики на измерванията. Анормалните стойности не са взети при изчисленията

Параметър	Брой наземни измервания	Средна стойност	Минимална стойност	Максимална стойност
AGBf (g/m ²)	50	1210	146	2761
AGBd (g/m ²)	28	121	18	332
PlantH (cm)	67	24	9	54
NbPlant*(растения/m ²)	53	47	10	101
NbPlant**(растения/m ²)	29	34	10	68
VF (%)	54	60	15	100
N (g/kg)	30	10	8	13

*: за наземните измервания от селскостопанска година 2017/2018 и 2018/2019 (BW-2017/2018, AW-2017/2018, AW-2018/2019)

** : за наземните измервания от селскостопанска година 2017/2018 (BW-2017/2018, AW-2017/2018)





Фиг. 12. Разпределение на стойностите на наземните измервания на посев от зимна рапица по периоди BW/AW. BW: преди презимуване, AW: след презимуване. Анормалните стойности не са взети при изчисленията.

Наблюдения преди и след презимуване и заснемане с фотокамера

По време на всички теренни наблюдения и измервания са правени снимки с фотокамера. Тестово поле P0 се развива добре през трите изследвани периода и дава най-висок добив от изследваните тестови полета. Тестови полета P01 и P02 не са поникнали достатъчно и са били набелязани за наблюдение след презимуване и евентуално унищожаване на посева и засяването му с пролетна култура. След презимуване е решено само част от посевите на P01 и P02 да бъдат унищожени. Оставената част от полетата е с неравномерна гъстота на посева, но в периода след презимуване до жътва са със сравнително добро развитие, специално P01. P1, P2 и P3 поникват сравнително късно и има опасения да бъдат също унищожени. Въпреки това, преди прекратяване на есенната вегетация P1 е сравнително добре развито, въпреки каналите, които са издълбани от вода. P3 е определено в най-добро състояние от трите полета преди презимуване, а за P2 се очаква да се определи състоянието след презимуване за взимане на решение дали да бъде унищожено. След презимуване, въпреки че P2 е с най-неравномерно развитие от трите наблюдавани полета за селскостопанската година, се възстановява достатъчно, за да бъде оставен за деколтиране. P4 не пониква добре, има много голи петна. Посева не се подобрява след презимуване, но въпреки това не е унищожен и добивът му е най-ниският от изследваните тестови полета.

Направени са периодични наблюдения по време на фенофаза цъфтеж. Но поради отдалечеността на тестовите полета не е възможно да се правят достатъчно често, каквито са необходими за определяне на точната дата на начало и край на цъфтеж. Преминаването от бутонизация до начало на цъфтеж може да стане в рамките на няколко дена, както и от фаза цъфтеж в край на цъфтежа. Затова практически началото и края на цъфтежа е определен с наземни наблюдения и експертна оценка [Таблица 17].

Таблица 17. Дати на начало и край на цъфтеж на посеви от зимна рапица на тестовите полета по данни от полети наблюдения. Н: наблюдения, ЕО: експертна оценка

Код на тестови участък	Дата на начало на цъфтеж	Начин на определяне на начало на цъфтеж	Дата на край на цъфтеж	Начин на определяне на край на цъфтеж	Продължителност на цъфтеж (дни)
P0	25.04.2017*	Н от 22.04.2017 и ЕО	26.05.2017	Н от 26.05.2017 и ЕО	31
P01	03.05.2017*	Н от 09.04.2017 и 06.05.2017 и ЕО	24.05.2017*	Н от 16.05.2017 и 27.05.2017 и ЕО	21
P02	03.05.2017*	Н от 09.04.2017 и 06.05.2017 и ЕО	24.05.2017*	Н от 16.05.2017 и 27.05.2017 и ЕО	21
P1	20.04.2018*	Н от 03.04.2018 и 26.04.2018 и ЕО	11.05.2018*	Н от 13.05.2018 и ЕО	21
P2	20.04.2018*	Н от 03.04.2018 и 25.04.2018 и ЕО	15.05.2018*	Н от 12.05.2018 и ЕО	25
P3	20.04.2018*	Н от 03.04.2018 и 25.04.2018 и ЕО	12.05.2018	Н от 12.05.2018 и ЕО	22
P4	26.04.2019	Н от 26.04.2019 и ЕО	19.05.2019*	Н от 21.05.2019 и ЕО	23

*: експертно определена, но не е наблюдавана на посочената дата

Данни от метеостанции в тестови участък „Североизточна България“

Данните от метеостанциите имат за цел определяне на:

- Дата на прекратяване на есенната вегетация и възстановяване на пролетната вегетация. Тази информация е използвана за определяне на правилното СИ, на което са приложени моделите за определяне на параметрите преди и след презимуване.
- Период, през който определяните параметри не се променят значително. Тази информация е използвана за определяне на СИ използвани в регресионните модели

Данните са от седем метеостанции собственост на Пионер Семена България. Те са предоставени от агроном Георги Герджиков. Данните са за валежи (mm), температура на въздуха (°C), влажност на почвата (%) и температура на почвата (°C).

Административни данни

За селскостопанските години 2016/2017, 2017/2018 и 2018/2019 ДФ „Земеделие“ предостави данни за земеделските парцели и отглежданата в тях култура за тестови участък. От тях са използвани данните за парцели засети със зимна рапица.

2.2. Дистанционни данни

Дистанционните данни са спътникови изображения от сателитите Sentinel-2A и Sentinel-2B и изображения от заснемане с RGB камера монтирана на БЛА.

Спътникови изображения (СИ)

Използваните спътникови изображения (СИ) в настоящото проучване са от сателитите Sentinel-2A и Sentinel-2B от участък 35TNJ, относителна орбита R007 и R050 (tile 35TNJ, Relative Orbit R007 & R050). Използваните СИ са изтеглени от уеб сайта на програмата Коперник (<https://scihub.copernicus.eu/>) и са записани в

локална база. Всички СИ са продукти от тип Level-2A или Level-1C. Продуктите от тип Level-1C са преизчислени в Level-2A с Sen2Cor v2.8. Само данни от каналите с пространствена разделителна способност от 10m и 20m са използвани в настоящето изследване.

Поради високата времева разделителна способност на Sentinel-2 и препокриването на съседни полоси на заснемане над тестовите полета, могат да бъдат използвани няколко СИ за дадена дата на полеви измервания. Това дава възможност да се използват повече данни за обучение.

За определяне на състоянието преди и след презимуване, СИ са избрани да са с минимална облачна покривка и най-близо след датата на прекратяване на есенната и възстановяване на пролетната вегетация. Тези дати са определени базирайки се на данните за температура на въздуха от метеостанциите в тестовия участък. За определяне на начало и край на цъфтеж, СИ са избрани така, че да покриват периода на цъфтеж, базирайки се на фенологични наблюдения на тестовите полета.

Заснемане с RGB камера монтирана на безпилотен летателен апарат (БЛА)

Използваният, в настоящето проучване, БЛА DJI Phantom 3 Advanced с RGB камера е предоставен за изследването от агроном Георги Герджиков и е собственост на Пионер Семена България.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЯНЕТО НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ

1. НАЗЕМНО ВАЛИДИРАНЕ НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ

Резултатите от приложената методика [Фиг. 9] са оценени с капа стойност (κ), формула 1, с пунктове с референтни данни, които са независими едни от други [Таблица 24].

Таблица 24. Резултати от оценката на точността на класификация на RGB и HSV изображения за наземно определяне на цъфтежа на зимна рапица

Дата	3004 2017	3004 2017	1905 2017	1905 2017	2605 2017	2605 2017
Тип изображение	RGB	HSV	RGB	HSV	RGB	HSV
Брой класове (класификация без обучение)	4	5	4	4	3	5
Брой класове (прекласификация)	3*	3*	3*	3*	2	2
Брой пунктове за оценка на точността	200	250	200	200	150	50
Площ от полета в цъфтеж (%)	33.32	45.36	29.91	25.56	27.96	9.38
Observed Accuracy (%)	77.34	86.90	79.50	92.50	80.00	96.54
Expected Accuracy (%)	43.62	46.48	52.10	56.39	67.31	84.82
Обща точност (%)	77.34	86.90	79.50	92.50	67.31	96.54
κ (%)	59.81	75.53	57.20	82.80	38.83	77.19
User's Accuracy (клас F) (%)	98.44	87.27	58.93	74.47	33.33	73.91
User's Accuracy (клас NoF) (%)	65.12	85.61	86.26	97.84	98.15	98.73
Producer's Accuracy (клас F) (%)	58.33	83.48	64.71	92.11	87.50	85.00
Producer's Accuracy (клас NoF) (%)	98.82	88.98	83.09	91.89	79.10	97.50

* Ортофото мозайката на тези дати е по-малък от тестовия полеви участък, поради премахнатите оригинални изображения с различен баланс на белия цвят или с облаци, с трети клас са пикселите NoData. Клас F е цъфтящ, а клас NoF са всички класове, различни от цъфтящ.

Класификацията е оценена и с McNemar тест [145] с пунктове с едни и същи референтни данни [Таблица 25]. За всички дати, $|z| > 2.58$ (two-tailed test), което показва, че класификациите са статистически различни с равнище на значимост $\alpha = 0.01$.

Таблица 25. Резултати от McNemar тест за класификация без обучение на HSV и RGB изображения за определяне на цъфтежа на зимна рапица

Дата на ортофото мозайката	HSV/ RGB		
	30042017	19052017	26052017
Incorrect/Correct	68	38	56
Correct/Incorrect	32	11	7
$ z $	3.6	3.9	6.2

Тези резултати показват, че методът на база на HSV класификация дава добри резултати и би могъл да се използва за наземно валидиране на начало и край на цъфтеж на зимна рапица.

2. РЕЗУЛТАТИ ОТ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НАЧАЛО И КРАЙ НА ЦЪФТЕЖ НА ЗИМНА РАПИЦА

Резултатите от представената във Фиг. 8 методология са описани по-долу, като първата стъпка е избор на най-подходящ ВИ за определяне на дата на начало и край на цъфтеж. Подходящ ВИ е този, които ясно разграничава настъпването и край на цъфтеж. Заключение на направен анализ на хистограмите на избраните ВИ изчислени на тестовите полета е, че има два ВИ, които са подходящи за определяне на дата за начало на цъфтеж, GtoB и NDYI, и два за определяне на дата за край на цъфтеж, NDVI и VARIGreen.

Данните от наземно валидиране отговарящи на клас цъфтеж са използвани за извличане на стойностите на ВИ подходящи за определяне на начало и край на цъфтеж. Хистограмата от така получените стойности за всеки ВИ са анализирани. Резултатът от този анализ са прагови стойности за всеки ВИ отговарящ на клас цъфтеж, а именно за GtoB избраните стойности са 1.95 – 3.18, за NDVI са 0.55 – 0.695, за NDYI са 0.345 – 0.59, а за VARIGreen са 0-0.2. С определените прагови стойности от предходния етап са класифицирани ВИ на СИ в два класа цъфтеж/не цъфтеж. На този етап не е изготвена матрица на грешките, защото на точните дати на начало и край на цъфтеж няма изображения от наземно валидиране. Главната цел на валидирането е намиране на най-добрия ВИ за определянето на начало и край на цъфтеж на зимна рапица. Затова са съпоставени времеви серии от избраните ВИ с наземното валидиране за всяко тестово поле. Резултатите, от които показват, че:

- Началото на цъфтеж определено с ВИ NDYI се доближава повече до това определено от наземното валидиране и наблюдения, сравнение с ВИ GtoB.
- За тестово поле P4 нито един от ВИ не определя правилно начало на цъфтеж. Това се дължи най-вероятно на много малката гъстота на посева и ВИ не могат да извлекът жълтия цвят от пиксел 10x10m при наличието на много видима гола почва.
- Краят на цъфтеж определен с ВИ VARIGreen се доближава повече до това определено от наземното валидиране и наблюдения, сравнение с ВИ NDVI.

3. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ

Придобиването на референтни данни за наземно валидиране е много времеемка и скъпа задача, но е задължителна при интерпретиране на данни от дистанционните наблюдения.

За определяне на начало и край на цъфтеж на зимна рапица, агрономите използват своята визуална оценка, която е направена от краищата на полето. Височината и гъстотата на рапицата са такива, че през периода на цъфтеж често е невъзможно да се влезе в навътре в полето. Базирайки се на този опит, настоящето проучване предлага да се използват данни от RGB камера, монтирана на БЛА с полет на 120m от земята, за данни за наземно валидиране. Предложеното събиране на данни за наземно валидиране е широко достъпно и сравнително евтино, а предлаганата обработка на изображения (RGB ортофото мозайка - HSV трансформация – класификация без обучение) дава задоволителни резултати за наземна оценка на цъфтежа на зимна рапица.

За по-голяма точност на метода, ортофото мозайката трябва да бъде гео-реферирана с точност до сантиметри, каквато е пространствената разделителна способност на оригиналната RGB ортофото мозайката. В настоящето проучване оригиналната RGB ортофото мозайката е гео-реферирана с точност до няколко метра, каквато е точността на БЛА.

За дистанционно определяне на начало и край на цъфтеж на зимна рапица са използвани ВИ, от които е избран NDYI за определяне на начало и VARIGreen за определяне на край на цъфтеж. Факта, че трябва два индекса, едни за определяне на начало и друг за край на цъфтежа може да се обясни с това, че:

- В началото на цъфтеж, рапицата е със свежи ярко зелени листа, сред които започват да цъфтят жълти цветчета. Жълтите цветчета на рапицата съдържат каротеноиди, които поглъщат сините електромагнитни вълни и отразяват зелените и червените.
- В края на цъфтеж, рапицата е с листа и шушулки, които започват да пожълтяват вследствие на намаляване на хлорофила и поглъщат червения спектър.

Трябва да се подчертае, че избраните ВИ определят начало и край на цъфтеж, когато посева е с определена гъстота. Избраните ВИ не могат да определят началото и края на цъфтежа в тестови участък P4, който е с много малка гъстота и

много видима гола почва. За всички други тестови участъци цъфтежа определен от ВИ е в синхрон с този определен от наземното валидиране.

Обект на бъдещо изследване е каква е минималната гъстота на посев от зимна рапица, за която ВИ NDYI може да определи начало на цъфтеж, а ВИ VARIGreen край на цъфтеж.

ГЛАВА 4. ИЗВЕЖДАНЕ И ВАЛИДИРАНЕ НА РЕГРЕСИОННИТЕ МОДЕЛИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ И ТЕСТВАНЕ НА АЛТЕРНАТИВНИ СЦЕНАРИИ

Резултатите от предварителни експерименти и тестване на алтернативни сценарии [Фиг. 6] са следните:

1. Моделите с включване на гола почва във входните данни показват по-добри резултати. Затова в обучаващите данни са включени изкуствено създадени данни отговарящи на гола почва;
2. Моделите с данни от 1 пиксел (10x10m) показват по-добри резултати. Затова използваните данни от спътникови изображения са с размер на пиксела 10x10m;
3. Моделите с включване на дистанционни данни от повече от едно изображение за едни наземни измервания дават по-добри резултатите. Дистанционните данни трябва да се от период, в който наземните данни не се променят съществено. Затова обучаващите данни са избрани така, че на една дата за наземни данни отговарят няколко дати от дистанционни данни;
4. Всички променливи (features) допринасят информация за определяне на изучаваните параметри и не се налага намаляване на размерността на обучаващите данни. Използвани са 10 променливи, отговарящи на използваните канали на Sentinel-2 с пространствено разделителна способност 10m и 20m;
5. Всички входни данни, които са определени като аномални с тест на Grubbs [131] с 5% ниво на значимост са изключени в последващите обработки.

Най-добрият регресионен модел, както параметричен така и непараметричен, е определен на базата на NRMSEcv и потвърден с NRMSEtest и R^2 test. Последен и много важен етап в процеса на валидиране на модела е визуално валидиране на определяните стойности върху тестовите полета.

Резултатите от регресионните параметрични модели са представени в Таблица 30, а непараметричните в Таблица 32.

Таблица 30. Резултати от най-добри регресионни параметрични алгоритми при определянето на параметри на посеви от зимна рапица

Параметър / Модел	Обучение		Кръстосано валидиране		Тест	
	NRMSEtraining	R ² training	NRMSEcv	R ² cv	NRMSEtest	R ² test
AGBf/4BSI+ polynomial	98 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 16.86	0.77	17.14	Kfold5 0.58	19 пункта растителност 21.89	0.70
AGBd/mSR+ polynomial	82 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 8.23	0.94	8.52	Kfold5 0.87	13 пункта растителност 18.31	0.92
PlantH/R+ polynomial	132 пункта, от които 28 гола почва и останалите растителност 12.06	0.86	12.31	Kfold5 0.73	25 пункта растителност 16.99	0.88
NbPlant/4BSI + polynomial	86 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 15.12	0.84	15.48	Kfold5 0.72	16 пункта растителност 22.66	0.46
VF/3BSI-Wang + polynomial	106 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 16.87	0.83	17.30	Kfold5 0.67	21 пункта растителност 22.16	0.60
N/4BSI + polynomial	72 пункта, от които 19 гола почва и останалите растителност 11.81	0.94	12.24	Kfold5 0.88	13 пункта растителност 139.90	0.17

Таблица 32. Резултати от най-добри регресионни непараметрични алгоритми при определянето на параметри на посеви от зимна рапица

Параметър / Модел	Обучение		Кръстосано валидиране		Тест	
	NRMSEtraining	R ² training	NRMSEcv	R ² cv	NRMSEtest	R ² test
AGBf / SVR	98 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 8.09	0.95	9.31	Kfold5 0.88	19 пункта растителност 11.88	0.92
AGBd/ KRR	82 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 6.53	0.96	8.34	Kfold5 0.88	13 пункта растителност 15.94	0.94
PlantH / GPR	132 пункта, от които 28 гола почва и останалите растителност 5.35	0.97	7.54	Kfold5 0.90	25 пункта растителност 9.56	0.96
NbPlant / GPR	86 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 11.53	0.92	15.88	Kfold5 0.71	16 пункта растителност 21.94	0.59
VF / PLSR	106 пункта, от които 22 гола почва и останалите растителност 15.62	0.86	16.86	Kfold5 0.69	21 пункта растителност 19.06	0.72
N / GPR	72 пункта, от които 19 гола почва и останалите растителност 8.38	0.97	11.80	Kfold5 0.89	13 пункта растителност 41.88	-0.24

2. РЕЗУЛТАТИ ОТ РЕГРЕСИОННИТЕ ПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ

Всички резултатите за определяне на гъстота на посева (NbPlant) представени в настоящата глава са изчислени с данни само от селскостопанската 2017/2018 година [Таблица 16]¹.

Резултатите показват, че само за AGBd и PlantH е намерен стабилен регресионен параметричен модел, със средни квадратични грешки дадени в Таблица 29.

Таблица 29. Средна квадратична грешка на параметри на зимна рапица определени със стабилен регресионен параметричен модел

Параметър	RMSEtraining	RMSEcv	RMSEtest
AGBd (g/m ²)	27.31	28.30	34.24
PlantH (cm)	6.51	6.65	5.95

Резултатите от подобни проучвания за определяне на количество суха надземна фитомаса са несъпоставими с тези от настоящето проучване, поради това, че тук се изследва само периода преди и веднага след презимуване, когато AGBd е сравнително малко. Докато сходни проучвания за рапица, [47], [80], разглеждат целия вегетационен цикъл, което в пъти увеличава количеството на надземна фитомаса. А колкото по-висока е стойността на количеството надземната фитомаса, толкова по-малка е относителната грешка [86].

Резултатите за определяне на височината на посева са по-добри от сходни проучвания. Това се дължи от части, поради използването в настоящето проучване на СИ с много по-голяма разделителна способност, 10m и 20m.

На тестовите полета са отчетени няколко аномалии при визуалният анализ на по-ниските и по-високи стойности на определената на AGBd [Приложение 2]

1. Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определено количество надземна фитомаса;
2. Голата почва в унищожения посев на P01 и P02, след презимуване, е определена като посев с определено количество надземна фитомаса.

На тестовите полета са отчетени няколко аномалии при визуалният анализ на по-ниските и по-високи стойности на определената на PlantH [Приложение 2]:

1. Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определена височина;
2. Високи стойности в част до P3, преди и след презимуване, които не отговарят на наземните наблюдения;
3. Високи стойности в местата с нанесени поражения от проливни дъждове (издълбаните от вода коловози), на P1 след презимуване, които не отговарят на наземните наблюдения.

¹ За повече информация вижте интерпретацията на резултатите за определяне на гъстота на посев (NbPlant) от непараметричните модели

Тези аномалии се дължат на два факта: входните данни за калибриране са сравнително малкото и са противоречиви [Фиг. 12]. Под противоречиви входни данни имаме предвид данните от тестово поле P4. Измерена е много висока височина на посев, сравнение другите тестови полета. От друга страна тестово поле P4 е с нехарактерна малка гъстота на посева и много видима голя почва. Затова моделът за определяне на PlantH е стигнал до заключението, че при малка гъстота и видима голя почва има по-високи растения, което е видимо от картата на полета P1 и P3 [Приложение 2].

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ РЕГРЕСИОННИТЕ НЕПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ

Резултатите показват, че за количеството на свежа и суха надземна фитомаса (AGBf, AGBd) и височина на посева (PlantH) е намерен стабилен регресионни непараметричен модел. За гъстота на посев (NbPlant) и общо площно покритие (VF) моделът е задоволителен, а за общ азот в листни проби (N) не е намерен добър модел. Средните квадратични грешки на стабилните и задоволителните модели са дадени в Таблица 31.

Таблица 31. Средна квадратична грешка на параметри на зимна рапица определени със стабилен и задоволителен регресионен непараметричен модел

Параметър	RMSEtraining	RMSEcv	RMSEtest
AGBf (g/m ²)	223.25	256.97	254.52
AGBd (g/m ²)	21.68	27.67	29.81
PlantH (cm)	2.89	4.07	3.34
NbPlant (растения/m ²)	8	11	11
VF (%)	16	17	16

Изследваните параметри са изчислени за всяко тестово поле и за всеки период и са представени в Приложение 4. Праговите стойности при визуализацията се базират на входните измерени данни. За параметрите, които са определени с GPR модел, са представени доверителните интервали на прогнозираните стойности, тъй като GPR моделът е базиран на вероятности.

Не са намерени други проучвания, които използват регресионни непараметрични алгоритми за определяне на количеството надземна фитомаса (AGBf, AGBd) на зимна рапица, а резултати от подобни проучвания за определяне на количеството суха надземна фитомаса на други култури не са съпоставими с тези от настоящето проучване².

На тестовите полета, при визуален анализ, са отчетени няколко аномалии при ниските и високите стойности на определеното количество надземна фитомаса (AGBf, AGBd) [Приложение 4] :

1. На тестово поле P4 количеството надземната фитомаса след презимуване е определена с по-ниски стойности отколкото са измерените [Фиг. 12].

Проучвания показват, че използвайки невронни мрежи при посеви от мултикултури [95] или при използване на мултиспектрална камера монтирана на БЛА

² За повече информация вижте интерпретацията на резултатите от параметричните модели описани в „2. Резултати от регресионните параметрични модели“

[49], грешката при определяне на общо площно покритие (VF) може да се намали на половина от тази получена в настоящето проучване.

Визуалният анализ на общо площно покритие (VF) определено на тестовите полета [Приложение 4] отговаря на наземните наблюдения, както за преди така и за след презимуване.

Не са намерени други проучвания, които използват регресионни непараметрични алгоритми за определяне на височина на посев (PlantH) от зимна рапица. Според [43], относителна грешка при определянето на височината на посев използвайки дистанционни методи за изследване на Земята е 20% от височината. Представените тук резултати потвърждават това твърдение.

От визуалният анализ на резултатите на височината на посев (PlantH) [Приложение 4] на тестовите полета можем да направим следните забележки:

1. Равномерно определената височина преди презимуване на посева на P1, P2, P3 има сравнително висока относителна несигурност, въпреки, че отговаря на измерените стойности, , относителна несигурност >20%;
2. Моделът след презимуване е много по-сигурен, относителна несигурност <10%.
3. Тук трябва да се отбележи, че моделът с непараметричен алгоритъм за определяне на височина на посев (PlantH) от зимна рапица не възпроизвежда същите аномалии, като този определен с параметричен алгоритъм. Въпреки, че двата модела са изготвени с едни и същи входни данни. Този факт показва по-голямата гъвкавост на непараметричните модели. Настоящите резултати потвърждават и факта, описан и в други проучвания [74], че по-високите стойности са определени с по-голяма точност.
4. Определянето на гъстотата на посеви (NbPlant) показва интересни резултати, защото първоначално е изведен модел с входни данни от селскостопански години 2017/2018 и 2018/2019 [Таблица 16]. Резултатите от този модел възпроизвеждат същите аномалии, като тези от параметричния модел определящ височина на посев (PlantH). Както се вижда от Фиг. 12, измерената гъстота на посева на P4 е по-голяма от тази на другите измерени полета, а в същото време P4 е определен като рядък с много видима гола почва. Това идва от факта, че растенията са с малко разклонения, което е атипично за зимната рапица. Затова бе изведен втори модел с входни данни само от селскостопански години 2017/2018 [Таблица 32].

Визуалният анализ на по-ниските и по-високи стойности на гъстотата на посев (NbPlant), [Приложение 4] отговарят на наземните наблюдения, с изключение на P4.

Тук трябва да отбележим, че гъстотата на посеви (NbPlant) преди и след презимуване би трябвало да е една и съща. Освен на места където има измръзвания през зимния период и в този случай тя може да намалее. Интересно е също, че относителната несигурност [Приложение 4] при определяне гъстотата на посевите след презимуване е по-голяма отколкото преди презимуване. В тази връзка е

направен допълнителен анализ, който дава повод да смятаме, че резултати преди презимуване са по-коректни от тези след презимуване.

4. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ

Настоящото проучване показва, че непараметричните модели дават като цяло много по-добри резултати от параметричните, което е отбелязано и в други проучвания, [65], [148].

Използването на данни от няколко СИ за едно наземно измерване подобрява резултатите почти два пъти при определянето на AGBd с параметрични и непараметрични модели сравнение с използването на едно СИ за едно наземно измерване [86].

Въпреки добрите резултати, NRMSE и R^2 на параметричния модел за определяне на PlantH, резултатите в Приложение 2 показват, че моделът има огромен проблем. На много места той определя високи стойности за височина на посева, където по наземни наблюдения те са ниски и обратно. Този феномен произтича, от една страна, от това че във входните данни за калибриране са използвани наземни данни от P4, което е много атипично поле с изключително рядък посев и много видима гола почва, дори след презимуване. И от друга недостатъчно на брой данни за калибриране, имайки предвид екстремното разнообразие на изучаваните посеви от рапица.

Интересно е да се отбележи, че непараметричния модел за определяне на PlantH са с много добри резултати, NRMSE, R^2 . А визуалният анализ от Приложение 4 показва много добро съответствие между по-ниските и по-високите стойности определени от модела и тези от наземните наблюдения.

Тази разлика в резултатите за определяне на PlantH използвайки параметрични и непараметрични алгоритми, като данните за калибриране/обучение са идентични, показва по-голямата гъвкавост и мощност на непараметричните алгоритми. Въпреки сравнително малкото данни за обучение и огромното разнообразие на изучаваните посеви от рапица, непараметричния модел съумява да даде много добри качествени резултати. За количествените резултати, самият модел не е много сигурен, това се вижда от изчислените доверителни интервали на прогнозираните стойности (PlantH CV) в Приложение 4. Преди презимуване с най-малка относителна несигурност, или най-сигурни, са частите с гола почва, а след презимуване тези с по-високи посеви.

Непараметричните алгоритми, въпреки добрите резултати дадени от NRMSE и R^2 за определяне на гъстота на посев (NbPlant) с данни включващи тези от поле P4, не определят добре високите и ниски стойности на резултатите в Приложение 4. От друга страна гъстота на посев (NbPlant) е добре определен с непараметричен модел изключващ входни данни от P4. Гъстотата на посева е единствения параметър, от изучаваните, които не променя съществено стойностите си преди и след презимуване, освен ако няма измръзване. Анализът на гъстотата преди и след презимуване дава повод да смятаме, че данните преди презимуване дават по-добри резултати от тези след презимуване.

Единственият параметър, от изучаваните, за който не е намерен добър модел за неговото определяне е на общ азот в листни проби (N). Както параметричните така и

непараметричните модели показват добри показатели за обучението и кръстосаното валидиране, но не и при тестовите данни. Параметърът общ азот в листни проби (N) е единственият от изучаваните параметри, който е измерен на ниво лист. Той бе включен в изучаваните параметри на ниво посев, защото съществуват доказателства, че параметри, които могат да бъдат определени на ниво лист, могат да бъдат определени на ниво посев [149]. Най-нови проучвания [150] за следене на азот в растенията за селското стопанство докладват, че използването на данни от широко-канални сензори няма да могат да го определят достатъчно добре и за предпочитане са използването на тясно-каналните данни.

Базирайки се на анализа на резултатите, от определените параметри за оценка на състоянието на посеви от рапица преди и след презимуване, можем да изберем следните параметри за тази оценка:

- Количество надземна фитомаса: за определяне на AGBd са намерени по-добри модели сравнение с тези за определяне на AGBf. Затова AGBd е предпочетен като критерий за определяне на състоянието на зимна рапица. AGBd е определен със стабилни модели както параметрични, така и непараметрични. Непараметричният модел дава по-добри резултати от параметричния, затова в следващите етапи ще бъде използван определянето на AGBd чрез непараметричен модел, който е с $RMSE_{test}=29.81g/m^2$;
- Височина на посева и общо площно покритие: за определяне на PlantH и VF са избрани непараметричните модели, които са с $RMSE_{test}=3.34cm$ и $RMSE_{test}=16\%$;
- Гъстота на посев: за определяне на NbPlant е избран непараметричния модел, който е с $RMSE_{test}=11$ растения/ m^2 , и се използват стойностите определени преди презимуване за двата етапа на презимуване.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА В СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ

Състоянието на посевите е определено на полета засети със зимна рапица в тестови участък "Североизточна България". Според данни от ДФ „Земеделие“ полетата засети със зимна рапица в тестови участък "Североизточна България" за 2016/2017 са 970, за 2017/2018 са 1036, а за 2018/2019 са 513.

1. ОЦЕНЪЧНИ КАРТИ ЗА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА

В настоящето проучване е предложен метод за оценяване на състоянието на посеви от зимна рапица и прагови стойности за всеки параметър [Таблица 15].

Поради големината на грешката, с която са определени различните параметри не може да се използва първоначално определените прагови стойности за състояние (добро, средно, лошо). Също така не е използван параметърът общ азот в листни проби (N), поради невъзможност да се изведе стабилен модел за неговото определяне. От двата параметъра суха и свежа надземна фитомаса (AGBd и AGBf), които отразяват сходен физиологичен компонент е избран суха надземна фитомаса за оценка на състоянието. Затова са предложени нови прагови стойности и три състояния (добро,

лошо и риск от замръзване) преди презимуване и само две (добро, лошо) след презимуване [Таблица 33].

Таблица 33. Експертно избрани стойности на параметрите, съобразени с грешката при тяхното определяне, които имат роля за съставяне на оценъчни карти

Параметър	Добро	Лошо	Риск от измръзване
Преди презимуване			
AGBd (g/ m ²)	30<AGBd<60	AGBd<30;	AGBd>60
PlantH (cm)	10<PlantH<20	PlantH<10	PlantH>20
NbPlants (растения/ m ²)	30<NbPlants<60	NbPlants<30;NbPlants>60	
VF (%)	40<VF	VF<40	
След презимуване			
AGBd (g/ m ²)	200<AGBd	AGBd<200	
PlantH (cm)	20<PlantH	PlantH<20	
NbPlants (растения/ m ²)	30<NbPlants<60	NbPlants<30;NbPlants>60	
VF (%)	50<VF	VF<50	

Предложените прагови стойности за определяне на продължителност на цъфтеж остават непроменени и са тези от Таблица 15.

2. СЪЗДАВАНЕ НА СКРИПТОВЕ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДОЛОГИЯТА

За изчисление на оценъчните карти са използвани скриптове в .bat файлове и на Python. Скриптовете са разработени от автора и са предоставени във формата на отворен код в github.com/dganeva/RapeseedCropsAssessment. Разработени са 11 .bat скриптове и 19 Python файла.

3. СЪСТОЯНИЕ НА ПОСЕВИ ОТ ЗИМНА РАПИЦА ПРЕДИ И СЛЕД ПРЕЗИМУВАНЕ

Състоянието на зимна рапица преди и след презимуване се базират на следните параметри:

- суха надземна фитомаса (AGBd),
- височината на посев (PlantH),
- гъстотата на посева (NbPlant) и
- общо площно покритие (VF).

Параметърът общ азот в листни проби (N) е изучаван в настоящето проучване, но тъй като не е намерен задоволителен модел за неговото определяне не е включен като критерий за определяне на състоянието на зимна рапица.

Голяма част от засетите площи със зимна рапица, 61%, в тестовия участък за 2016/2017 за периода преди презимуване са в добро състояние [Таблица 34]. От тях половината са определени с риск от измръзване. След презимуване тази тенденция се запазва.

От Фиг. 38 и Фиг. 39 се вижда, че тестово поле P0 е в добро състояние преди презимуване, но част от него е с риск от измръзване, а P01 и P02 са в лошо състояние. След презимуване P0 е в общо много добро състояние, докато P01 и P02 остават в лошо. Определената оценка на тестовите полета отговаря на наблюдаваното състояние.

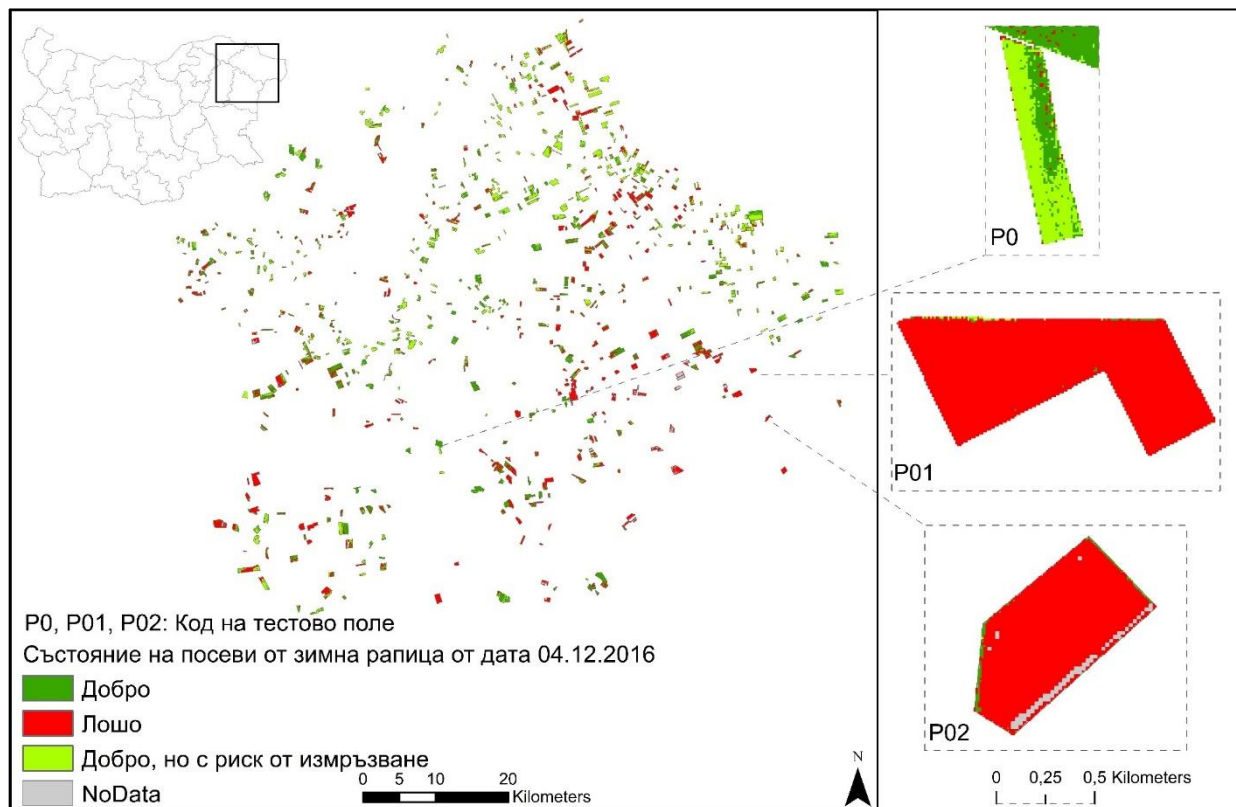
Таблица 34. Обобщени резултати за всяка селскостопанска година от оценката на състоянието на посеви от зимна рапица в тестови участък „Североизточна България“

	2016/2017	2017/2018	2018/2019
Преди презимуване	Фиг. 38 61%* от засетите площи са в добро състояние, от които половината са с риск от измръзване	Фиг. 40 60%** от засетите площи са в добро състояние, от които половината са с риск от измръзване	Фиг. 42 52%*** от засетите площи са в добро състояние, от които почти всички са с риск от измръзване
След презимуване	Фиг. 39 61% от засетите площи са в добро състояние	Фиг. 41 59% от засетите площи са в добро състояние	Фиг. 43 41%**** от засетите площи са в добро състояние

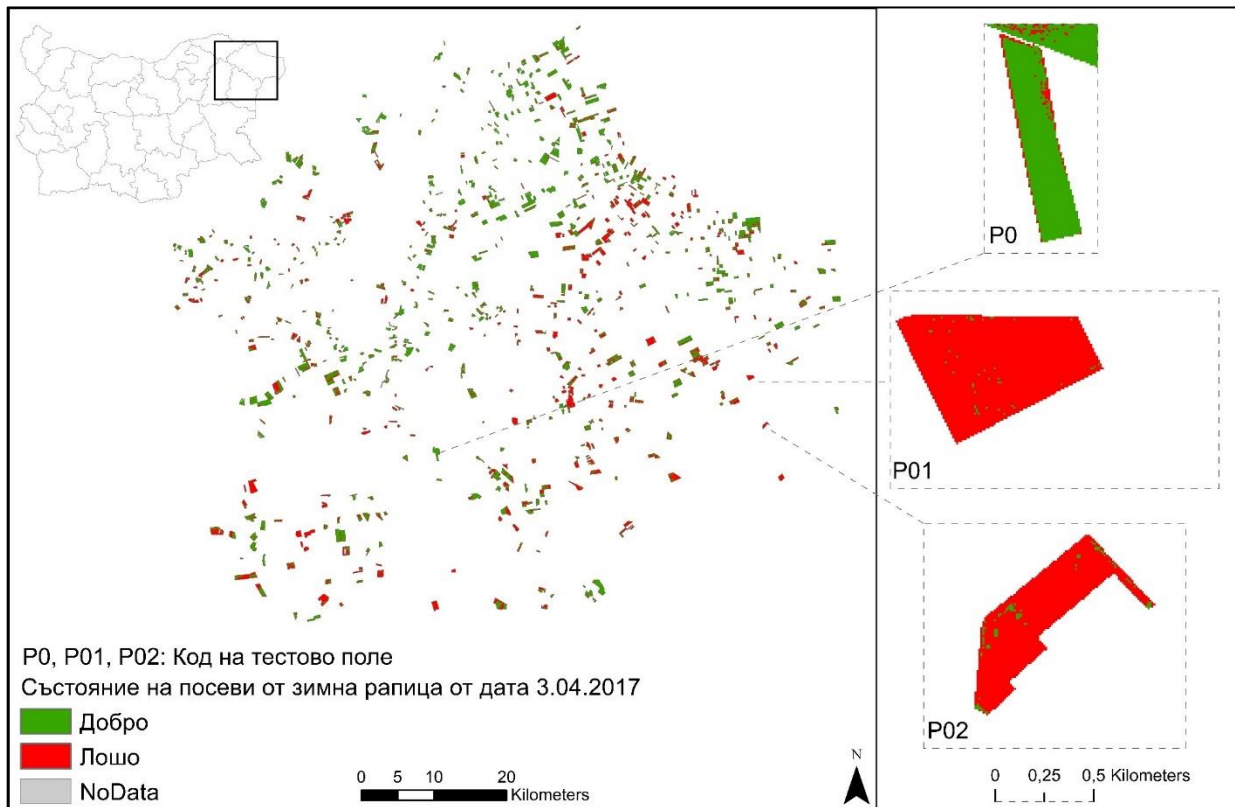
*2%, **7%, ***16%, ****29% от засетите площи са в неопределено състояние поради липса на данни (области под облаци или снежна покривка).

Голяма част от засетите площи със зимна рапица, 60%, в тестовия участък за 2017/2018 за периода преди презимуване са в добро състояние [Таблица 34]. От тях половината са определени с риск от измръзване. Тази тенденция се запазва и след презимуване.

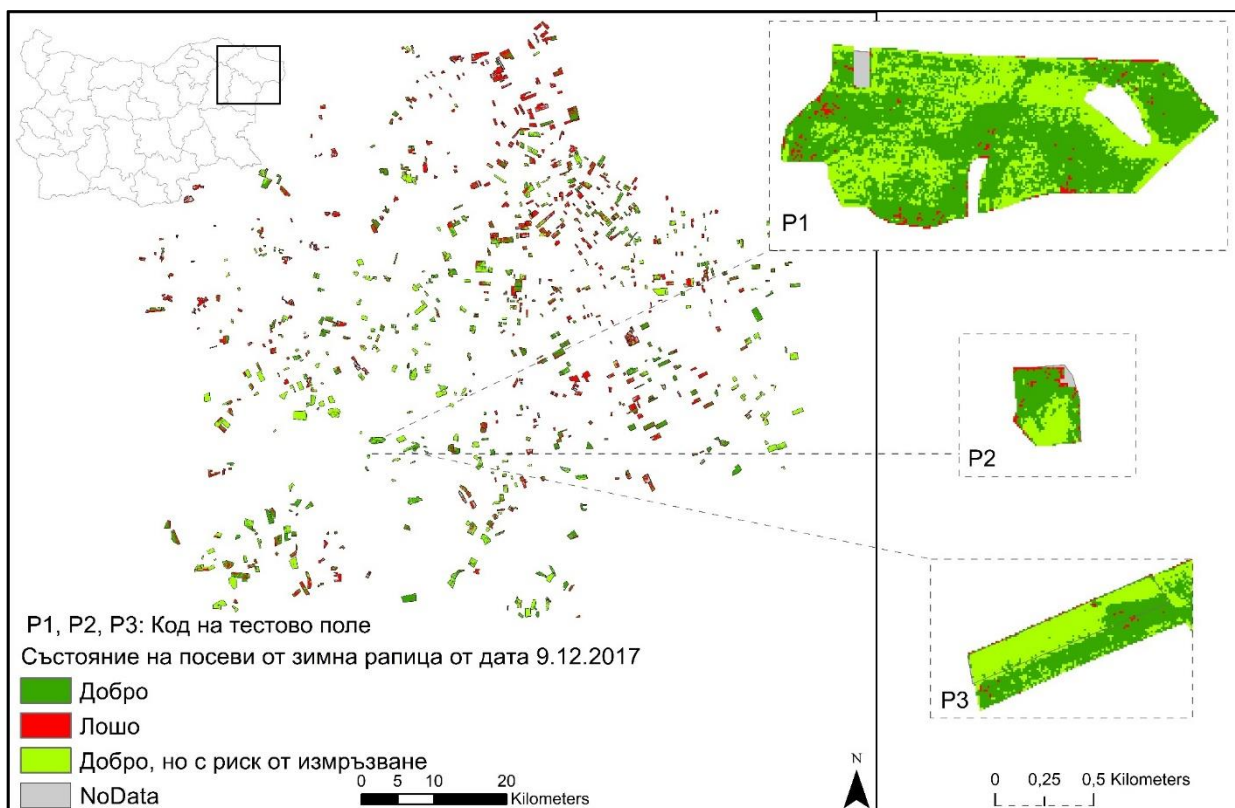
От Фиг. 40 и Фиг. 41 се вижда, че тестовите полета са в добро състояние преди презимуване, като част от тях са с риск от измръзване. След презимуване P1 и P3 остават в общо много добро състояние, докато на P2 презимуването оставя следи. Определената оценката на тестовите полета отговаря на наблюдаваното състояние.



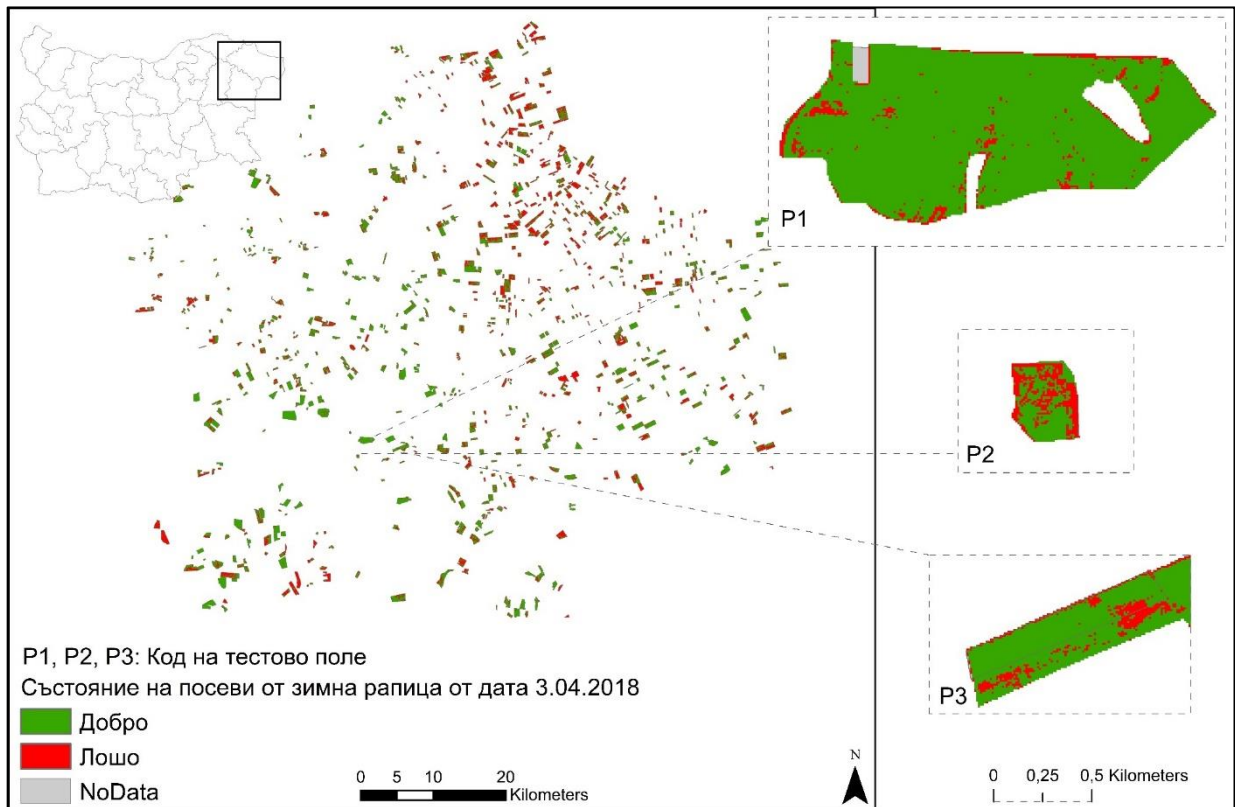
Фиг. 38. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица преди презимуване 2016/2017 за тестови участък "Североизточна България"



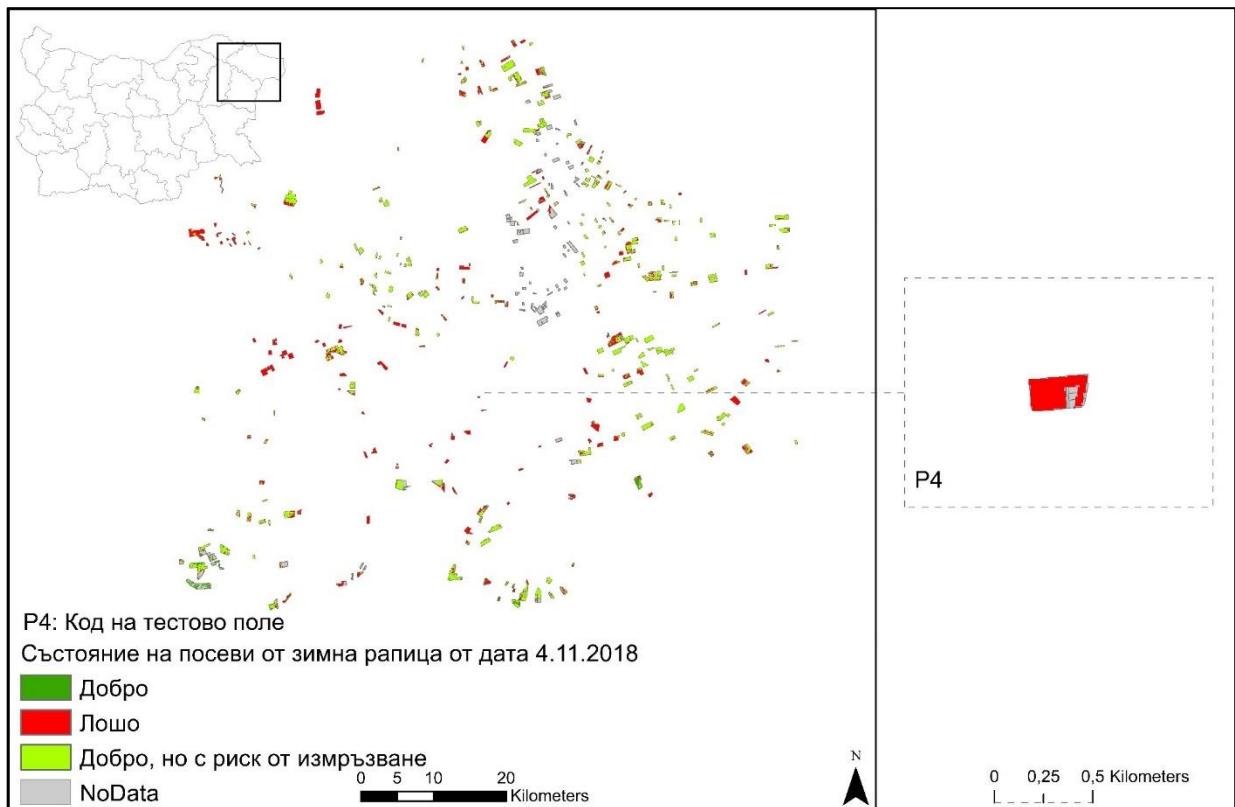
Фиг. 39. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица след презимуване 2016/2017 за тестови участък "Североизточна България"



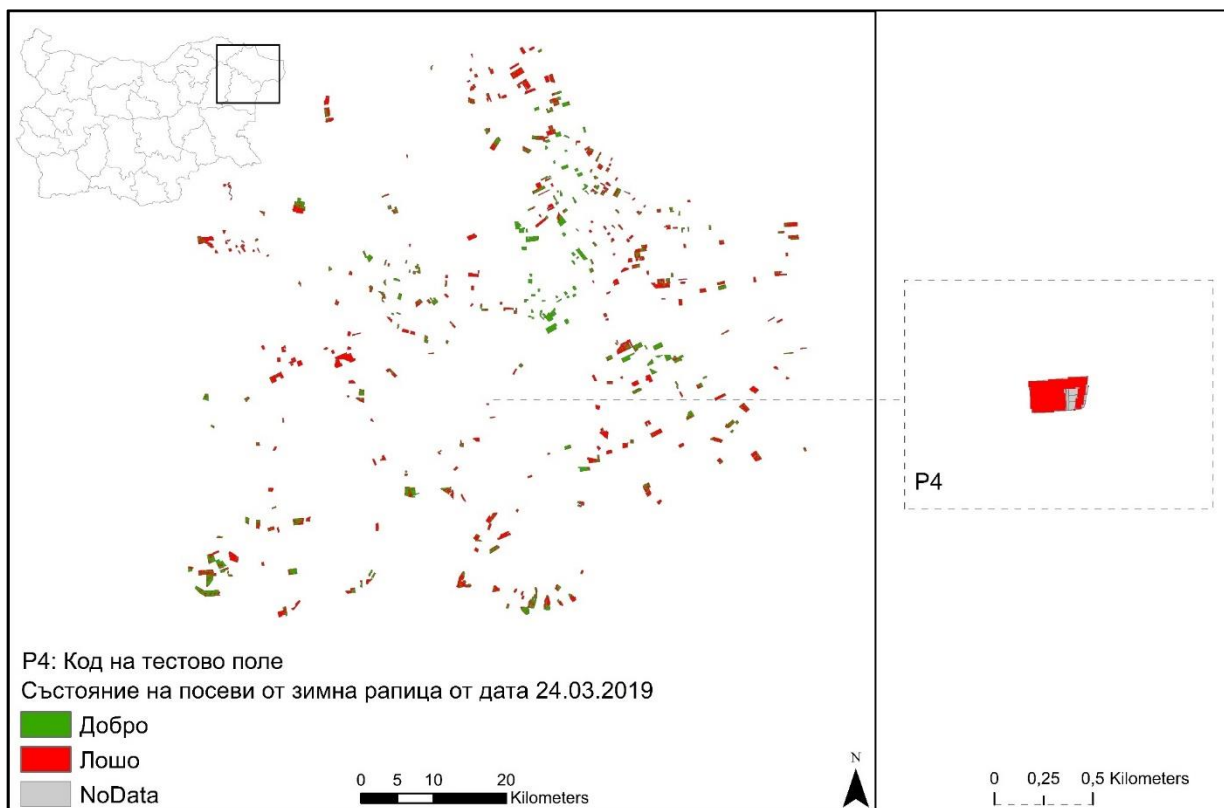
Фиг. 40. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица преди презимуване 2017/2018 за тестови участък "Североизточна България"



Фиг. 41. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица след презимуване 2017/2018 за тестови участък "Североизточна България"



Фиг. 42. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица преди презимуване 2018/2019 за тестови участък "Североизточна България"



Фиг. 43. Оценъчна карта на състоянието на зимна рапица след презимуване 2018/2019 за тестови участък "Североизточна България"

Само половината от засетите площи със зимна рапица, 52%, в тестовия участък за 2018/2019 са в добро състояние [Таблица 34]. От тях почти всички са определени с риск от измръзване. След презимуване засетите площи със зимна рапица в добро състояние намалява. Това може да се дължи на факта, че за голяма част от полетата не е определено състояние, поради облачна покривка.

От Фиг. 42 и Фиг. 43 се вижда, че тестовото поле P4 е в лошо състояние като преди, така и след презимуване, което отговаря на наблюдаваното състояние.

Интересен факт се забелязва от резултатите от изследването [Таблица 35] за 2016/2017 и 2017/2018. За тези два вегетационни периода състоянието на около 55% от засетите площи, със зимна рапица в тестовия участък, остава непроменено преди и след презимуване. За същите два периода, около 30% от площите са с подобро състояние и около 15% е с влошено. Селскостопанската година 2018/2019 се различава от другите две с това, че за 35% от посевите състоянието се е влошило след презимуване.

Таблица 35. Сравнение на промяната в състоянието преди (ПП) и след презимуване (СП) в проценти от всички засети полета със зимна рапица в тестовия участък „Североизточна България“

	2016/2017	2017/2018	2018/2019
Състоянието СП се е влошило сравнение с това ПП	7%	10%	5%
Състоянието СП и ПП остава непроменено	57%	54%	38%
Състоянието СП се е подобрило сравнение с това ПП	8%	7%	2%

Състоянието СП се е влошило сравнение с това ПП при посеви с риск от измръзване	4%	6%	30%
Състоянието СП се е подобрило сравнение с това ПП въпреки посеви с риск от измръзване	24%	23%	25%

Метео данните от зимата на 2018/2019 в сравнение с 2017/2018 показват посилен вятър и повече негативни температури, което би могло да обясни влошаването на състоянието на посевите след презимуване за 2018/2019.

4. ПРОДЪЛЖИТЕЛНОСТ НА ЦЪФТЕЖ НА ЗИМНА РАПИЦА

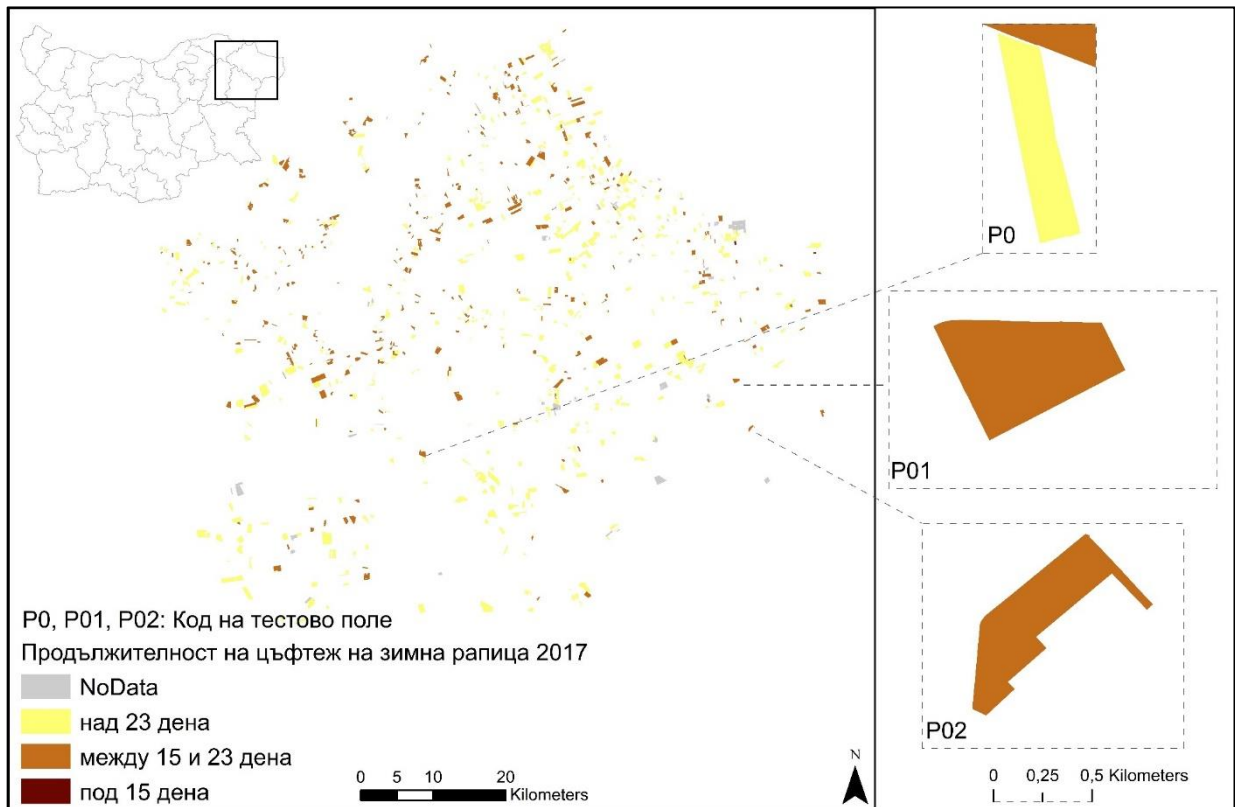
За изчисляване на продължителността на цъфтежа на посеви от зимна рапица е необходимо да се определи начало и край на фенофаза цъфтеж. За начало на цъфтеж е използван ВИ NDYI, а за край ВИ VARIGreen. Сравнявайки резултатите за продължителност на цъфтеж от наземните наблюдения и дистанционно определените [Таблица 36] можем да заключим следното:

- Дистанционно определената продължителност на цъфтеж за тестовите полета, които са с добра гъстота на посева, като P0, P01, P1 и P3, е с до 3 дена по-кратка от наблюдаваната.
- Дистанционно определената продължителност на цъфтеж за тестово поле P02, което са с малка гъстота на посева и видима гола почва, е с 6 дена по-кратка от наблюдаваната.
- Дистанционно определената продължителност на цъфтеж за тестово поле P2, което е с малка гъстота на посева и видима гола почва (около 15%), е с до 8 дена по-продължителна от наблюдаваната. Това се дължи на факта, че ВИ VARIGreen е отчет голата почва, 15% от полето, като цъфтеж, което не е позволило определяне на точна дата за край на цъфтеж.
- Не е намерена дистанционно определената продължителност на цъфтеж за тестово поле P4, което е с особено малка гъстота и видима гола почва. Това се дължи на факта, че ВИ NDYI не е определил достатъчно наситен жълт цвят, за начало на цъфтеж, а ВИ VARIGreen, подобно на P2 е определил голата почва за цъфтеж.

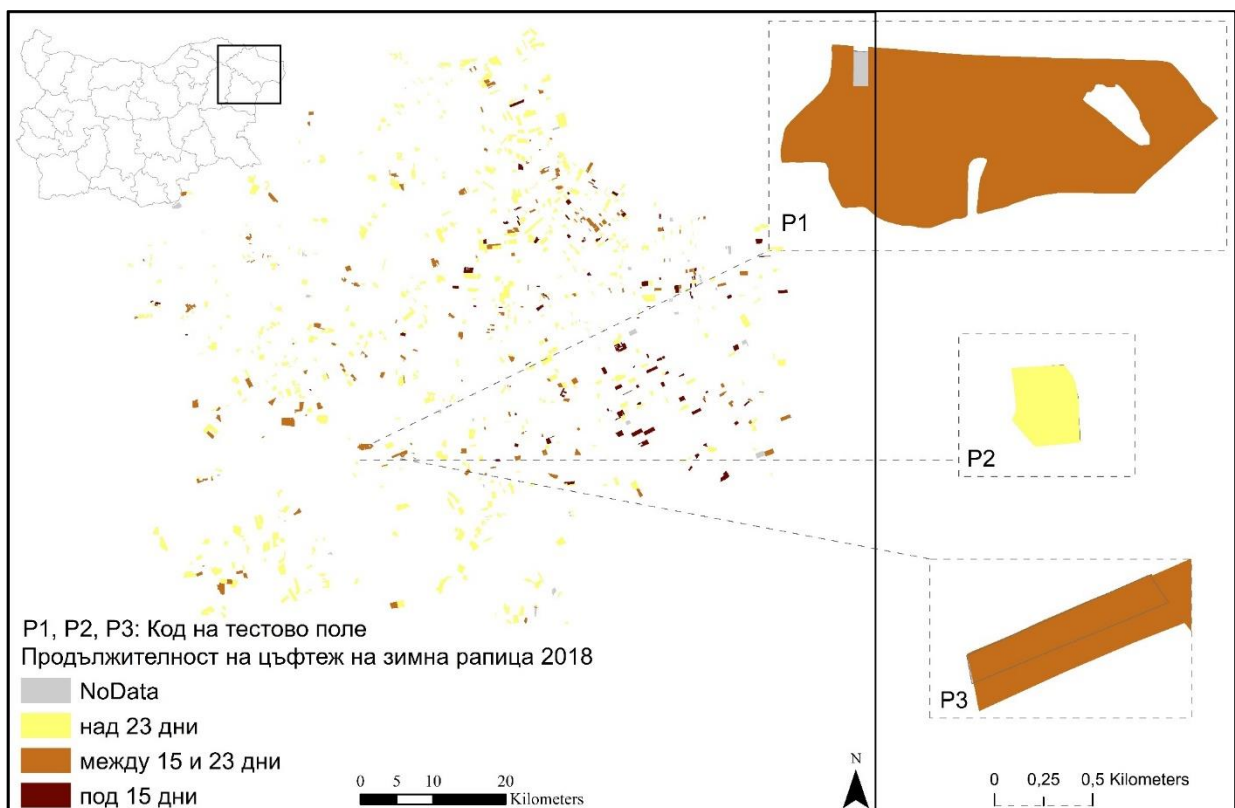
Таблица 36. Резултати от дистанционно определената продължителност на цъфтеж

Тестово поле	Начало цъфтеж	Край цъфтеж	Дистанционно определена продължителност цъфтеж (дни)	Разлика с наземно наблюдаваната продължителност на цъфтеж (дни)
P0	24.04.2017	23.05.2017	29	-3
P01	03.05.2017	23.05.2017	20	-1
P02	08.05.2017	23.05.2017	15	-6
P1	23.04.2018	13.05.2018	20	-1
P2	28.04.2018	31.05.2018	33	+8
P3	21.04.2018	13.05.2018	22	0
P4	-	-	-	-

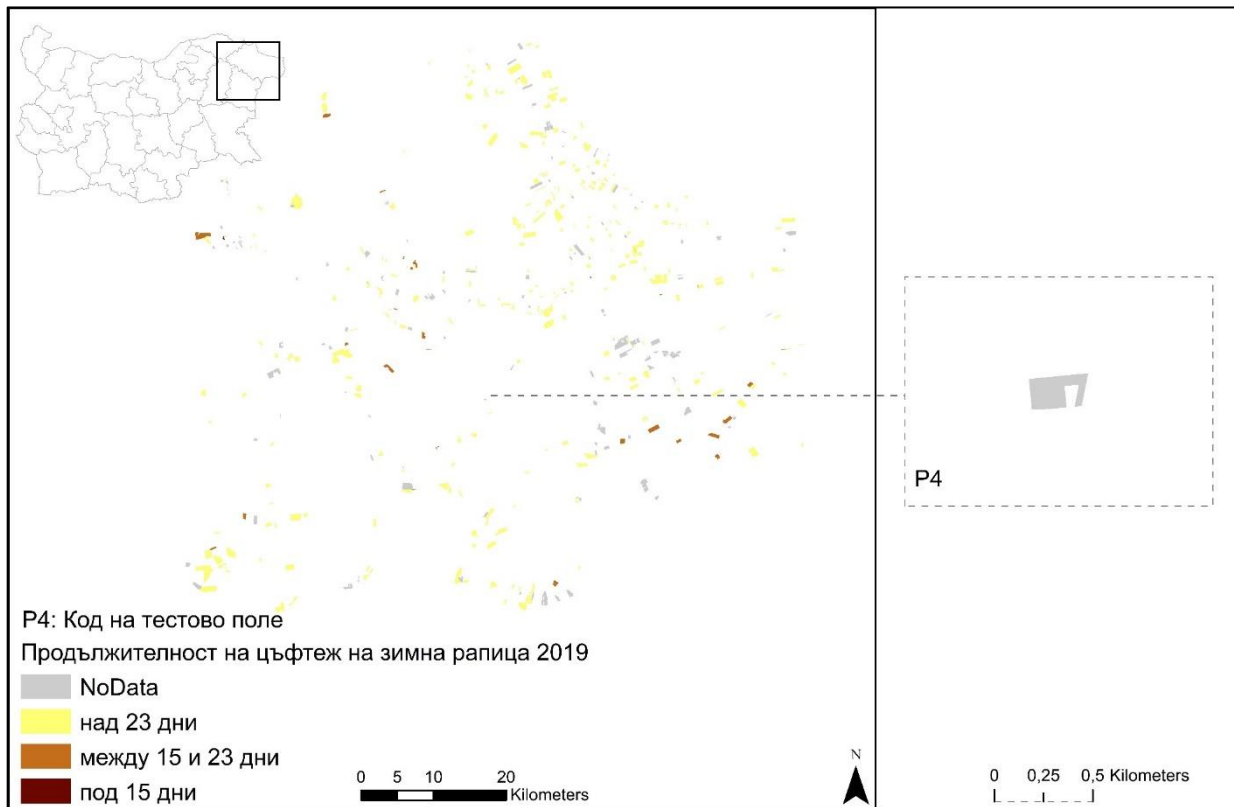
Оценъчните карти за продължителност на цъфтеж за трите селскостопански години за тестовия участък за представени във Фиг. 44, Фиг. 45 и Фиг. 46.



Фиг. 44. Оценъчна карта на продължителност на цъфтеж на зимна рапица за 2016/2017 в тестови участък "Североизточна България"



Фиг. 45. Оценъчна карта на продължителност на цъфтеж на зимна рапица за 2017/2018 в тестови участък "Североизточна България"



Фиг. 46. Оценъчна карта на продължителност на цъфтеж на зимна рапица за 2018/2019 в тестови участък "Североизточна България"

5. ДИСКУСИЯ И ИЗВОДИ

Точността на оценъчните карта са изцяло зависими от точността на определените параметри за състояние преди и след презимуване, както и на определянето на начало и край на цъфтеж. Негативна роля за точността, оказват: облачната и снежната покривка, както и посеви с малка гъстота и видима гола почва.

Оценъчните карти представени в настоящето проучване дават едни пръв поглед на това какво можем да очакваме в бъдеще като краен продукт за фермерите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото проучване представя методология за оценка на посеви от зимна рапица. Оценката е направена през три важни етапа от развитието на зимната рапица:

- преди презимуване,
- след презимуване и
- фенофаза цъфтеж.

За оценката преди и след презимуване са определени следните параметри на посев от рапица, показателни за земеделците:

- количество надземна фитомаса (AGBf, AGBd),
- гъстота (NbPlant) и височина (PlantH) на посева,
- общо площно покритие (VF) и
- съдържание на азот в листни проби (N).

Най-добрите модели за определяне на изучаваните параметри са постигнати с обучаващи регресионни непараметрични алгоритми. Параметрите са определени със средната квадратична грешка:

- за AGBf: RMSEtest=254.52g/m²,
- за AGBd: RMSEtest=29.81g/m²,
- за PlantH: RMSEtest=3.34cm,
- за NbPlant: RMSEtest=11растения/m² и
- за VF: RMSEtest=16%.

За определяне на общ азот в листни проби (N) не е намерен стабилен модел, който да има задоволително свойство за генерализация (generalization).

Разликата между средната квадратична грешка, с която са определени параметрите, и измерените стойности е такава, че резултатите преди презимуване могат да са само индикативни. Докато резултатите след презимуване са много по-достоверни. На практика това, което най-вече интересува земеделците е развитието на посевите след презимуване. На базата на тази оценка те могат да вземат правилното решение за запазване или унищожаване на съответния посев от зимна рапица и засяването на негово място на пролетна култура.

Фенофаза цъфтеж е изучавана с цел да се определи продължителността ѝ. Използвани са RGB изображения заснети с дрон и превърнати в ортофото мозайка. Така получените RGB ортофото мозайки са преобразувани в HSV цветови модел. HSV ортофото мозайки са класифицирани без обучение и са използвани като наземна информация за определение на пиксели цъфтеж/не цъфтеж. Така класифицираната наземна информация служи за определяне на прагови стойности за два ВИ:

1. NDYI за определяне на начало и
2. VARIGreen за определяне на край на цъфтеж.

Оценъчните карти за състояние на посеви от зимна рапица преди и след презимуване използват определените параметри и ги представят в три състояния (добро, добро с риск от измръзване и лошо) преди презимуване и две състояния след презимуване (добро и лошо). Първоначално желанието беше да има три състояния (добро, средно и лошо) за двата периода. Използването на две вместо три състояния се дължи на големината на средната квадратична грешка на определените параметри и на праговете стойности разделящи трите състояние.

Оценъчните карти за продължителност на цъфтеж се базират на определената дата за начало (с ВИ NDYI) и край (с ВИ VARIGreen) на цъфтеж. Наличието на облачна покривка в периода на начало и край на цъфтеж прави определянето на продължителността трудна или невъзможна. Редки посеви с много видима гола почва също така затруднява определяне на цъфтежа.

На базата на горе изложеното смятам, че хипотеза може да се приеме със следните условия:

- Спектралните данни от спътникови изображения определят изучаваните параметри преди презимуване със средната квадратична грешка много близка до измерените стойности.
- Посеви с много малка гъстота или с големи участъци от гола почва трябва да бъдат изключени от изучаваните посеви.

За подобряване на настоящите резултати виждаме следните насоки за бъдещи изследвания:

- да се изследва спектрална отражателната характеристика на различните типове почви в тестовия участък. Получената по-точна информация от гола почва да се използва за входни данни на регресионните модели.
- набиране на повече данни за обучение. В настоящето проучване голяма част от информацията за обучение идва от тестови участък P4, който е много атипичен (много на брой растения, но много редки).
- допълнителни проучвания за по-коректно отделяне на облачната и снежната покривка от СИ, преди прилагане на описаната методология.
- допълнителни проучвания за използването на радарни изображения, които не се влияят от облаците.

ПРИНОСИ

1. Разработена е методология за определяне на състояние на зимна рапица преди и след презимуване и продължителност на цъфтеж с данни от Sentinel-2. Тя е кодирана, чрез скриптове в програмен език Python, от автора и е предоставена под формата на отворен код за научната общност.
2. За първи път е определен като най-подходящ за начало на цъфтеж вегетационен индекс NDYI, а за край на цъфтеж VARIGreen. Предложена е оригинална методика за наземното валидиране на цъфтежа на база на RGB ортофото мозайки получени от безпилотен летателен апарат.
3. За първи път са приложени регресионни параметрични и непараметрични модели за определяне на количество надземна свежа и суха фитомаса, гъстота, височина и общо площно покритие на посеви от зимна рапица. За обучение на регресионните модели е предложено използването на няколко спътникови изображения спрямо едно наземно измерване.
4. Съставени са 14 карти, в ГИС среда, на всеки определен параметър на зимна рапица преди и след презимуване на тестовите полета и 9 оценъчни карти на състоянието на посеви от зимна рапица на тестовия участък „Североизточна България“ за 3 селскостопански години.

Публикации свързани с дисертационния труд

1. **Ganeva, D., Roumenina, E., Jeleu, G., Banov, M., Krasteva, V., Kolchakov, V.** Applicability of parametric and nonparametric regression models for retrieval of crop canopy parameters for winter rapeseed and wheat crops using Sentinel-2 multispectral data. in Proc. SPIE 11174, Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019), 111740J (27 June 2019). doi:10.1117/12.2533651
2. **Ganeva, D.** Semiautomatic retrieval of biomass based on Vegetation Index optimization and learning machine methods for winter rapeseed crops. in SES 2018 - Fourteenth International Scientific Conference - SPACE, ECOLOGY, SAFETY, 299–305 (2018).
3. **Ganeva, D. & Roumenina, E.** Remote estimation of crop canopy parameters by statistical regression algorithms for winter rapeseed using Sentinel-2 multispectral images. *Aerosp. Res. Bulg.* 30, 75–95 (2018).
4. **Ganeva, D.** Rapeseed crops flowering duration estimation by RGB images acquired by consumer drone: a tool for ground-truthing", Proc. SPIE 10773, Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018), 107730C (6 August 2018). doi: 10.1117/12.2326149

Постери

1. **Ганева, Д. & Руменина, Е. К.** Оценка на състоянието на посеви от зимна рапица в Североизточна България чрез спътникови и наземни данни. in *Космос, Екология, Сигурност (Space, Ecology, Safety) – SES 2019* (2019). doi:10.13140/RG.2.2.24999.29606
2. **Ganeva, D.** Remote Estimation of the Flowering Stage Duration for Winter Rapeseed crops in *Космос, Екология, Сигурност (Space, Ecology, Safety) – SES 2017* (2017).
3. **Ganeva D.** 2017. Monitoring of winter rapeseed crops in Northeast Bulgaria through satellite and terrestrial data. Poster at the 7th Advanced Training Course On Land Remote Sensing, 4–9 September 2017, Szent István University, Gödöllő, Hungary

Изнесени доклади

1. **Ganeva, D., Roumenina, E., Jeleu, G., Banov, M., Krasteva, V., Kolchakov, V.** Applicability of parametric and nonparametric regression models for retrieval of crop canopy parameters for winter rapeseed and wheat crops using Sentinel-2 multispectral data. in Proc. SPIE 11174, Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019), 111740J (27 June 2019). doi:10.1117/12.2533651
2. **Ganeva, D.** Semiautomatic retrieval of biomass based on Vegetation Index optimization and learning machine methods for winter rapeseed crops. in SES 2018 - Fourteenth International Scientific Conference - SPACE, ECOLOGY, SAFETY, 299–305 (2018).
3. **Ganeva, D.** Rapeseed crops flowering duration estimation by RGB images acquired by consumer drone: a tool for ground-truthing", Proc. SPIE 10773, Sixth

International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018), 107730C (6 August 2018). doi: 10.1117/12.2326149

Цитати

1. **Ganeva, D.** et al. Applicability of parametric and nonparametric regression models for retrieval of crop canopy parameters for winter rapeseed and wheat crops using Sentinel-2 multispectral data. in Proc. SPIE 11174, Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019), 111740J (27 June 2019). doi:10.1117/12.2533651

цитирано в:

1. Mercier, A. *et al.* Evaluation of Sentinel-1 and -2 time series for estimating LAI and biomass of wheat and rapeseed crop types. *J. Appl. Remote Sens.* 14(2), (2020). Doi: 10.1117/1.JRS.14.024512

Научни проекти

1. Приложение на дистанционни методи и географски информационни системи в областта на прецизното земеделие (ДиАгро)". Договор №7/01.03.2019г. сключен между ИКИТ-БАН и Протос Агро ЕООД. Ръководител: проф. д-р Георги Желев
2. Оценка на състоянието на посеви от зимна рапица в Североизточна България чрез спътникови и наземни данни. Договор № ДФНП-17-43/26.07.2017 сключен между ИКИТ-БАН и БАН по Програма за подпомагане на млади учени и докторанти – 2017. Ръководител: маг. Десислава Ганева

Награди и медийни изяви

1. 2019: Награда на ръководител на най-успешен проект по „Програма за подпомагане на млади учени и докторанти в БАН – 2017 г.“ с научен консултант проф. Евгения Руменина.
2. 2019: Награда на конкурс "Моята теза в 360 минути" организирана от "Agence universitaire de la Francophonie".
3. 2019: "41 млади български учени получиха награди за своите постижения", интервю по БТВ в предаването „Тази събота и неделя“ на 5.10.2019.

Благодарности

Изявявам огромната си благодарност към моя научен ръководител проф. Георги Желев, който ме въведе в изследователската дейност. Дълбока благодарност към моя научен консултант, проф. Евгения Руменина, към проект по „Програма за подпомагане на млади учени и докторанти в БАН – 2017 г.“ Тази програма на БАН ми позволи да осъществя полевата кампания необходима за изследването, както и да представя резултатите от изследването на международни конференции и обучения към Европейската Космическа Агенция.

Специална благодарност искам да изкажа на д-р Jochem Verrelst, от университета във Валенсия, който ми помогна да навляза в необятната сфера на регресионните непараметрични алгоритмите, и ме приобщи към европейската научна общност.

Изказвам благодарност към колегите от Института по космически изследвания и технологии към БАН и секцията „Дистанционни изследвания и ГИС“, които ме приеха сърдечно и ми помагаха със стимулиращите дискусии.

Искрени благодарности към агроном Георги Герджиков от Пионер Семена България, за топлото отношение и съдействие в сферата на земеделието.

Благодаря на съпруга ми и тримата ми сина за тяхното търпение и подкрепа през годините на докторантурата ми.

Списък с използваната литература

- [1] S. Liang, *Advances in Land Remote Sensing. System, Modeling, Inversion and Application*. Springer, 2008.
- [2] 'Агροстатистически справочник 2000-2015. Система на земеделската счетоводна информация 2005-2012. Министерство на земеделието и храните. 2016.' [Online]. Available: http://www.mzh.government.bg/media/filer_public/2018/02/16/agrostatisticalreferencebookmaf-2000-2015.pdf. [Accessed: 30-Jul-2018].
- [3] 'Добиви от полски култури – реколта`2018 № 361 – юни 2019', МЗХГ, отдел "Агροстатистика", 2019. [Online]. Available: https://www.mzh.government.bg/media/filer_public/2019/06/27/ra361-publicationcrops2018_new.pdf. [Accessed: 30-Jul-2020].
- [4] Р. Иванова, *Рапицата - култура на настоящето и бъдещето. Второ допълнително и преработено издание.*, Издателств. София: Издателство «Виденев и син», 2012.
- [5] J. S. Boyer, 'Plant Productivity and Environment', *Science (80-.)*, vol. 218, no. 4571, pp. 443–448, 1982.
- [11] П. Димитров *et al.*, 'Технологични изисквания за отглеждане на зимна маслодайна рапица. Международна конференция на тема „ Биогорива - източник на съвместно устойчиво развитие в областта на трансграничното сътрудничество", проект МИС-ЕТС код: 146. 16 и 17.10.2012.', 2012.
- [15] 'Дирекция „Анализ и стратегическо планиране“ към Министерство на земеделието и храните. Република България , декември 2016. Ситуационно-перспективен анализ на пшеница, ечемик и рапица.'
- [16] 'Оперативен анализ за основни земеделски култури (Бюлетин № 48/2016). Министерство на земеделието и храните. София, 7 декември 2016'.
- [17] M. D. Steven and J. . Clark, *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, no. 1955. Cambridge: Butterworths, 1990.
- [20] 'Лична комуникация с агроном Георги Герджиков, Промотър Големи Клиенти Пионер за Североизточна България. Юли 2018.'
- [36] C. Atzberger, 'Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs', *Remote Sens.*, vol. 5, no. 2, pp. 949–981, 2013.
- [37] M. Wojtowicz, A. Wojtowics, and J. Piekarczyk, 'Application of remote sensing methods in Agriculture', *Commun. Biometry Crop Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–50, 2015.
- [41] M. M. Verstraete and B. Pinty, 'Designing Optimal Spectral Indexes for Remote Sensing Applications', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 5, pp. 1254–1265, 1996.
- [42] J. Hill and J. Megie, *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1994.
- [43] L. Homolová, Z. Malenovský, J. G. P. W. Clevers, G. García-Santos, and M. E. Schaepman, 'Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping', *Ecol. Complex.*, vol. 15, pp. 1–16, 2013.
- [44] J. L. Hatfield, A. A. Gitelson, J. S. Schepers, and C. L. Walthall, 'Application of spectral

remote sensing for agronomic decisions', *Agron. J.*, vol. 100, no. 3 SUPPL., 2008.

[45] F. Baret and S. Buis, 'Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems', in *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*, 2008, pp. 173–201.

[46] J. Verrelst *et al.*, 'Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties - A review', *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 108, pp. 273–290, 2015.

[47] J. Han *et al.*, 'Mapping Above-Ground Biomass of Winter Oilseed Rape Using High Spatial Resolution Satellite Data at Parcel Scale under Waterlogging Conditions', *Remote Sens.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–21, 2017.

[49] S. Fang *et al.*, 'Remote Estimation of Vegetation Fraction and Flower Fraction in Oilseed Rape with Unmanned Aerial Vehicle Data', *Remote Sens.*, vol. 8, no. 416, pp. 1–19, 2016.

[51] J. Piekarczyk, M. Wójtowicz, and A. Wójtowicz, 'Estimation of agronomic parameters of winter oilseed rape from field reflectance data', *Acta Agrophysica*, vol. 8, no. 1, pp. 205–218, 2006.

[52] K. Bartoszek, 'Usefulness of MODIS data for assessment of the growth and development of winter oilseed rape', *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 101, no. 4, pp. 445–452, 2014.

[60] X. Yu, H. Lu, and Q. Liu, 'Deep-learning-based regression model and hyperspectral imaging for rapid detection of nitrogen concentration in oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaf', *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 172, pp. 188–193, 2018.

[61] L. Li *et al.*, 'Ability of models with effective wavelengths to monitor nitrogen and phosphorus status of winter oilseed rape leaves using in situ canopy spectroscopy', *F. Crop. Res.*, vol. 215, no. 1, pp. 173–186, 2018.

[62] L. Li *et al.*, 'Methods for estimating leaf nitrogen concentration of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using in situ leaf spectroscopy', *Ind. Crops Prod.*, vol. 91, pp. 194–204, 2016.

[63] X. Zhang, F. Liu, Y. He, and X. Gong, 'Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging', *Biosyst. Eng.*, vol. 115, no. 1, pp. 56–65, 2013.

[64] F. Wang, J. Huang, Y. Wang, Z. Liu, and F. Zhang, 'Estimating nitrogen concentration in rape from hyperspectral data at canopy level using support vector machines', *Precis. Agric.*, vol. 14, no. 2, pp. 172–183, 2013.

[65] P. M. Hansen and J. K. Schjoerring, 'Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression', *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, no. 4, pp. 542–553, 2003.

[77] K. R. Thorp, D. A. Dierig, A. N. French, and D. J. Hunsaker, 'Analysis of hyperspectral reflectance data for monitoring growth and development of lesquerella', *Ind. Crops Prod.*, vol. 33, no. 2, pp. 524–531, 2011.

[80] K. Müller, U. Böttcher, F. Meyer-Schatz, and H. Kage, 'Analysis of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.)', *Biosyst. Eng.*, vol. 101, no. 2, pp. 172–182, 2008.

[81] D. Ganeva, 'Semiautomatic retrieval of biomass based on Vegetation Index optimization and learning machine methods for winter rapeseed crops', in *SES 2018 - Fourteenth International Scientific Conference - SPACE, ECOLOGY, SAFETY*, 2018, no. November 2018, pp. 299–305.

[86] D. Ganeva and E. Roumenina, 'Remote estimation of crop canopy parameters by statistical regression algorithms for winter rapeseed using Sentinel-2 multispectral images', *Aerosp. Res. Bulg.*, vol. 30, pp. 75–95, 2018.

[87] G. Warren and G. Metternicht, 'Agricultural Applications of High-Resolution Digital Multispectral Imagery', *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 71, no. 5, pp. 595–602, 2005.

[96] J. J. Sulik and D. S. Long, 'Spectral Indices for Yellow Canola Flowers', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 36, no. 10, pp. 2751–2765, 2015.

[97] J. J. Sulik and D. S. Long, 'Spectral considerations for modeling yield of canola', *Remote Sens. Env.*, vol. 184, pp. 161–174, 2016.

[98] L. Wan *et al.*, 'Combining UAV-based vegetation indices and image classification to estimate flower number in oilseed rape', *Remote Sens.*, vol. 10, no. 9, 2018.

[99] D. Ashourloo *et al.*, 'Automatic canola mapping using time series of sentinel 2 images', *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 156, no. July, pp. 63–76, 2019.

[100] R. Nedkov, 'Orthogonal transformation of segmented images from the satellite

sentinel-2', *Comptes Rendus L'Academie Bulg. des Sci.*, vol. 70, no. 5, pp. 687–692, 2017.

[101] T. Purevdorj, R. Tateishi, T. Ishiyama, and Y. Honda, 'Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 19, no. 18, pp. 3519–3535, 1998.

[102] Y. Liu, X. Mu, H. Wang, and G. Yan, 'A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images', *J. Veg. Sci.*, vol. 23, no. 3, pp. 406–418, 2012.

[107] J. Mirijovsky and S. Popelka, 'Evaluation of color settings in aerial images with the use of eye-Tracking user study', *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. July, pp. 763–767, 2016.

[108] D. Kendal, C. E. Hauser, G. E. Garrard, S. Jellinek, K. M. Giljohann, and J. L. Moore, 'Quantifying Plant Colour and Colour Difference as Perceived by Humans Using Digital Images', *PLoS One*, vol. 8, no. 8, pp. 1–11, 2013.

[109] D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in business, science and industry*, 3rd editio. John Wiley & Sons, Inc., 1975.

[110] L. Tang, L. Tian, and B. L. Steward, 'Color image segmentation with genetic algorithm for in-field weed sensing', *Agric. Biosyst. Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 1019–1027, 2000.

[111] K. R. Thorp and D. A. Dierig, 'Color image segmentation approach to monitor flowering in lesquerella', *Ind. Crops Prod.*, vol. 34, no. 1, pp. 1150–1159, 2011.

[112] S. N. Ghaiwat and P. Arora, 'Detection and Classification of Plant Leaf Diseases Using Image processing Techniques : A Review', *Int. J. Recent Adv. Eng. Technol.*, vol. 2, pp. 1–7, 2014.

[113] D. Wang *et al.*, 'A Regional Mapping Method for Oilseed Rape Based on HSV Transformation and Spectral Features', *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 7, no. 6, p. 224, 2018.

[115] D. Oppenheim, Y. Edan, and G. Shani, 'Detecting tomato flowers in greenhouses using computer vision', *Int. J. Comput. Inf. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 104–109, 2017.

[116] J. F. Pekel, K. Cressman, P. Ceccato, C. Vancutsem, E. Vanbogaert, and P. Defourny, 'Development and application of multi-temporal colorimetric transformation to monitor vegetation in the desert locust habitat', *5th Int. Work. Anal. Multi-Temporal Remote Sens. Images 2009, MultiTemp 2009*, vol. 4, no. 2, pp. 234–241, 2009.

[121] E. K. Руменина *et al.*, 'ИНТЕГРИРАНА СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОННО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПОСЕВИ НА ЗЕМЕДЕЛСКИ КУЛТУРИ', 2019.

[122] 'Python'. [Online]. Available: <https://www.python.org/>. [Accessed: 20-Jul-2020].

[125] U. Mueller-Wilm, 'S2 Mpc. Sen2Cor Configuration and User Manual', 2019.

[126] E. J. Rykiel, 'Testing ecological models : the meaning of validation', *Ecol. Modell.*, vol. 90, pp. 229–244, 1996.

[131] F. E. Grubbs and G. Beck, 'Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations', *Technometrics*, vol. 14, no. 4, pp. 847–854, 1972.

[145] G. M. Foody, 'Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy', *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 70, no. 5, pp. 627–633, 2004.

[146] R. G. Congalton and K. Green, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Sceond Edi., vol. 25, no. 130. Taylor & Francis Group, 2009.

[148] V. Alchanatis and Y. Cohen, 'Spectral and Spatial Methods of Hyperspectral Image Analysis for Estimation of Biophysical and Biochemical Properties of Agricultural Crops.', in *Hyperspectral Remote sensing of vegetation*, J. Thenkabail, G. Lyon, and A. Huete, Eds. New York: CRC Press., 2012, pp. 289–305.

[149] F. Baret, V. C. Vanderbilt, M. D. Steven, and S. Jacquemoud, 'Use of Spectral Analogy To Evaluate Canopy Reflectance Sensitivity to Leaf Optical Properties', vol. 260, pp. 253–260, 1994.

[150] K. Berger *et al.*, 'Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions', *Remote Sens. Environ.*, vol. 242, no. December 2019, p. 111758, 2020.

Приложение 1. Определени параметри на зимна рапица на тестовите полета с параметрични модели

Количество надземна суха фитомаса (AGBd) и височина на посева (PlantH)

на тестовите полета засети със зимна рапица преди и след презимуване.

За P0, P01 и P02 използваните СИ са

- от 4.12.2016 за преди и
- от 3.04.2017 за след презимуване;

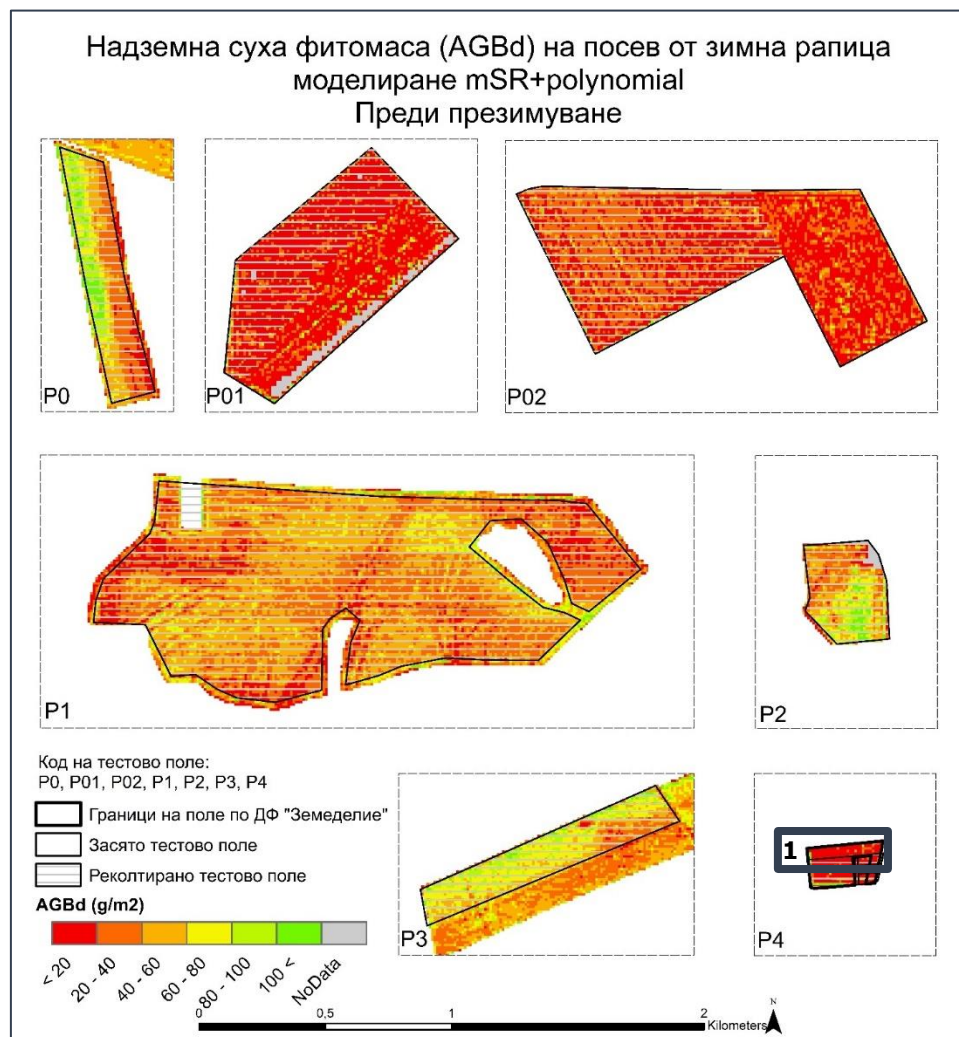
За P1, P2 и P3 използваните СИ са

- от 9.12.2017 за преди и
- от 3.04.2018 за след презимуване;

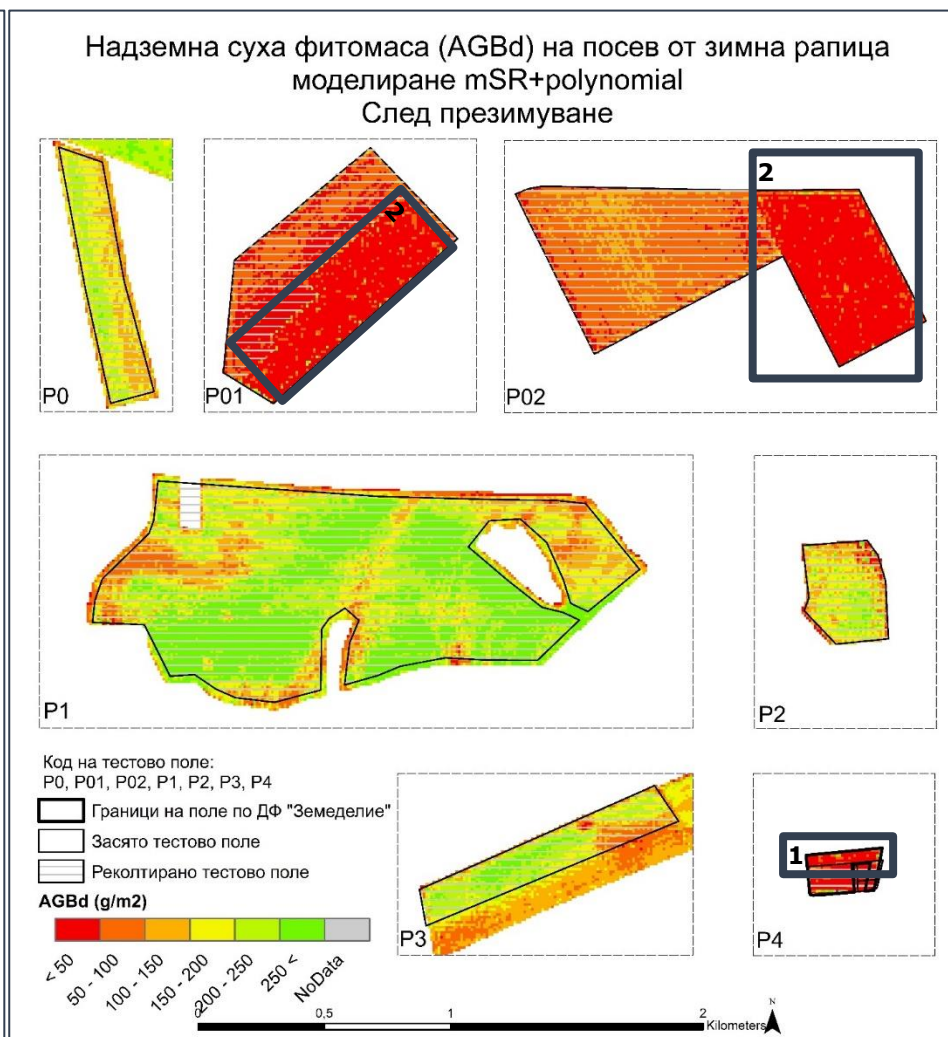
За P4 използваните СИ са

- от 4.11.2018 за преди и
- от 24.03.2019 за след презимуване;

Оградените в сиво части са определени некоректно

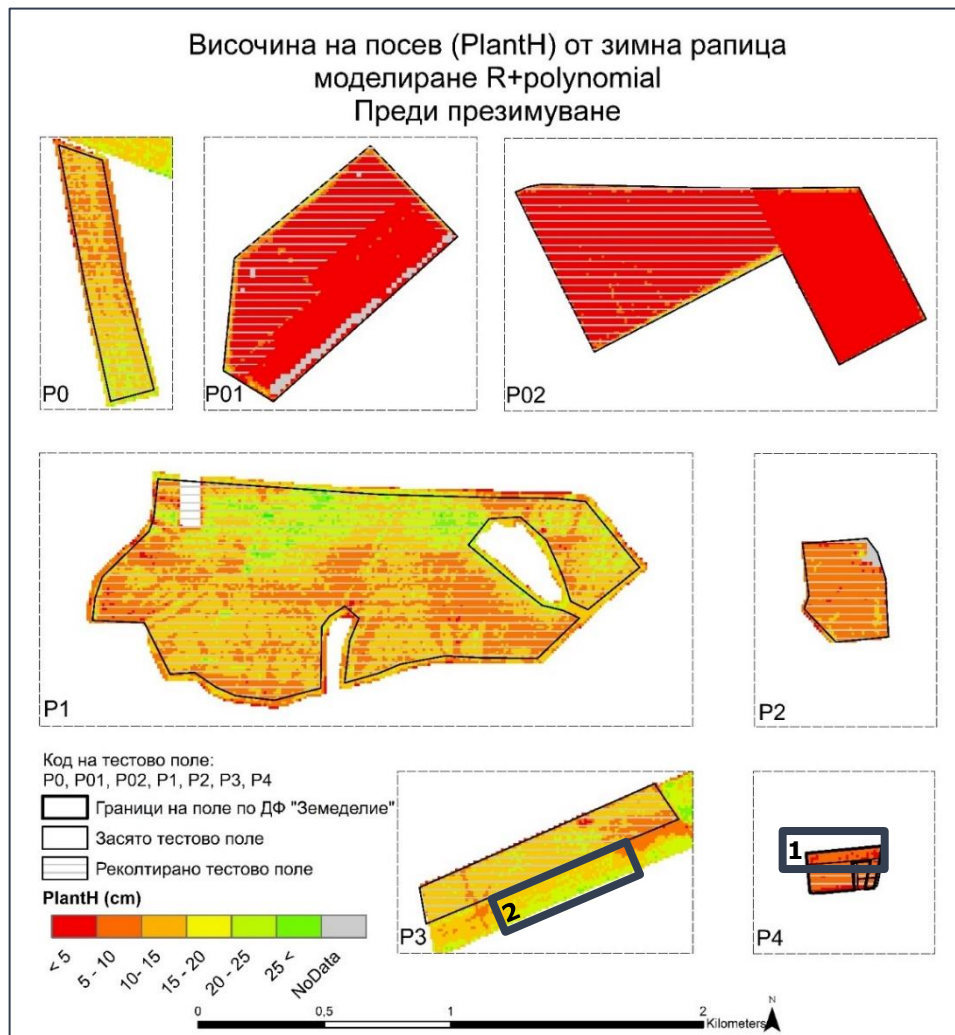


1 - Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определено количество надземната фитомаса



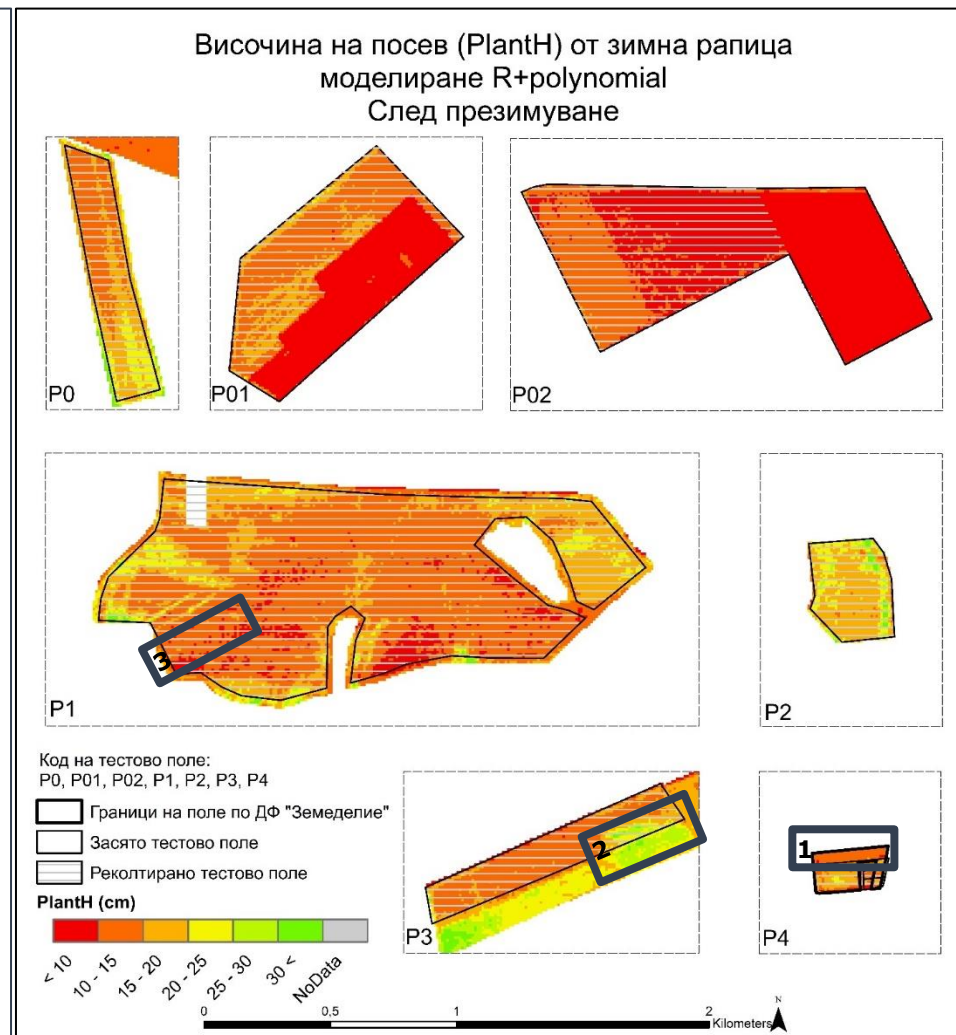
1 - Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определено количество надземната фитомаса

2 - Голата почва в унищожения посев на P01 и P02, след презимуване, е определена като посев с определено количество



1 - Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определена височина ;

2 - Високи стойности в част до P3, преди и след презимуване, които не отговарят на наземните наблюдения;



1 - Голата почва на P4, преди и след презимуване, е определена като посев с определена височина ;

2 - Високи стойности в част до P3, преди и след презимуване, които не отговарят на наземните наблюдения;

3 - Високи стойности в местата с издълбаните от вода коловози, на P1 след презимуване, които не отговарят на наземните наблюдения

Приложение 2. Определени параметри на зимна рапица на тестовите полета с непараметрични модели

Количество надземна свежа и суха фитомаса (AGBf, AGBd),
височина на посева (PlantH),
гъстота на посева (NbPlant) и
общо площно покритие (VF)
за тестовите полета засети със зимна рапица преди и след презимуване.

За P0, P01 и P02 използваните СИ са

- от 4.12.2016 за преди и
- от 3.04.2017 за след презимуване

За P1, P2 и P3 използваните СИ са

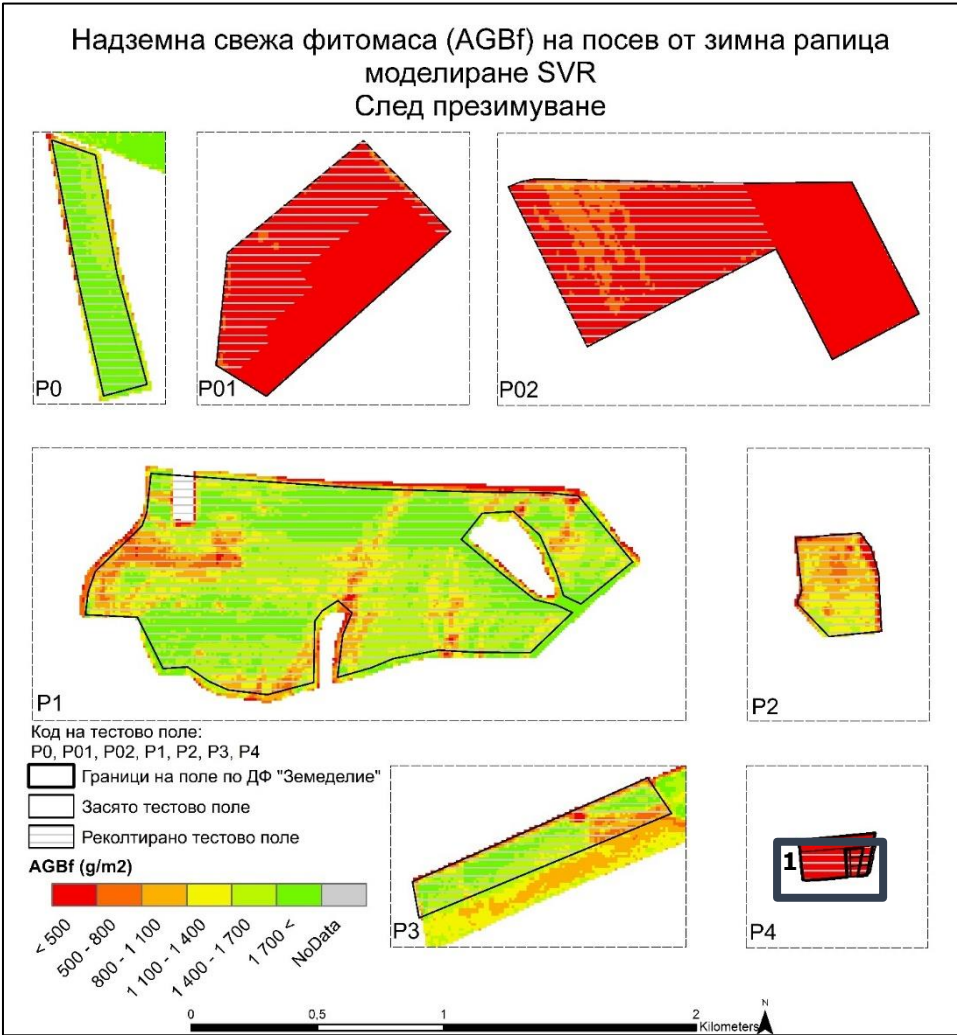
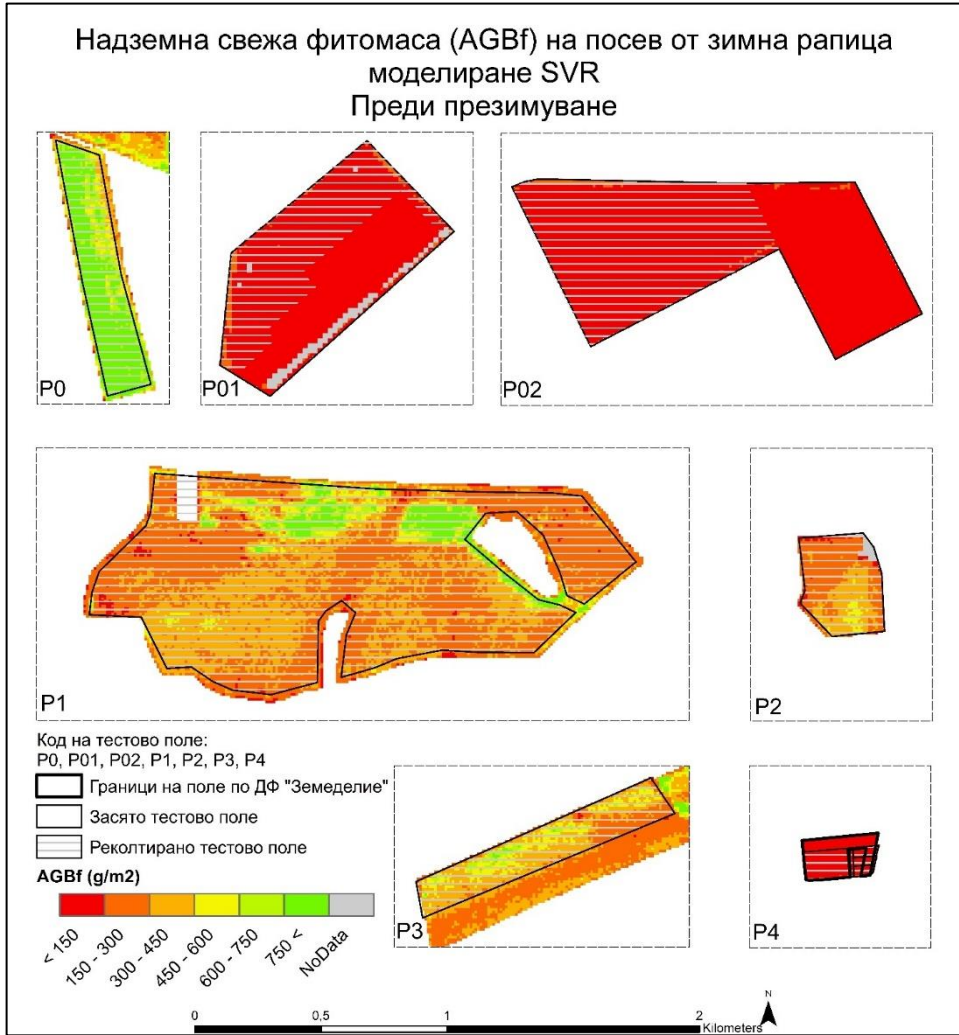
- от 9.12.2017 за преди и
- от 3.04.2018 за след презимуване

За P4 използваните СИ са

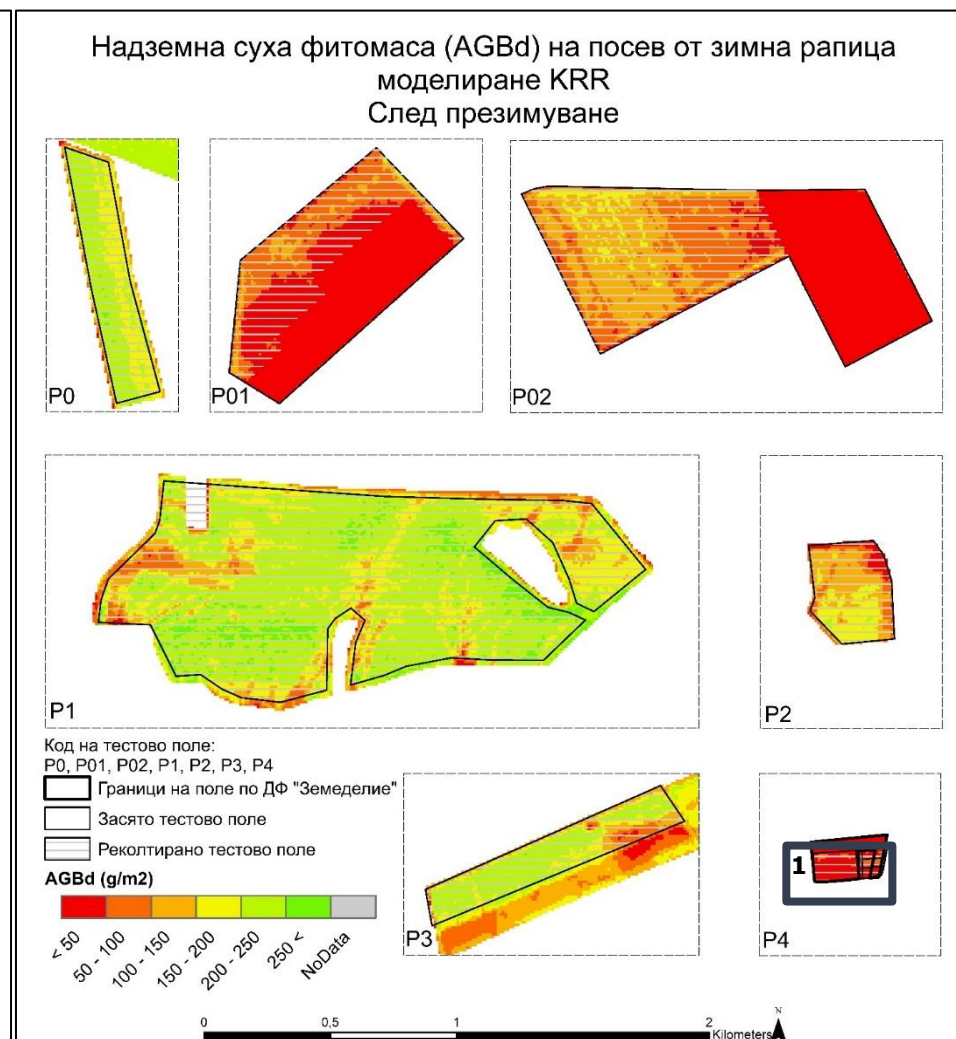
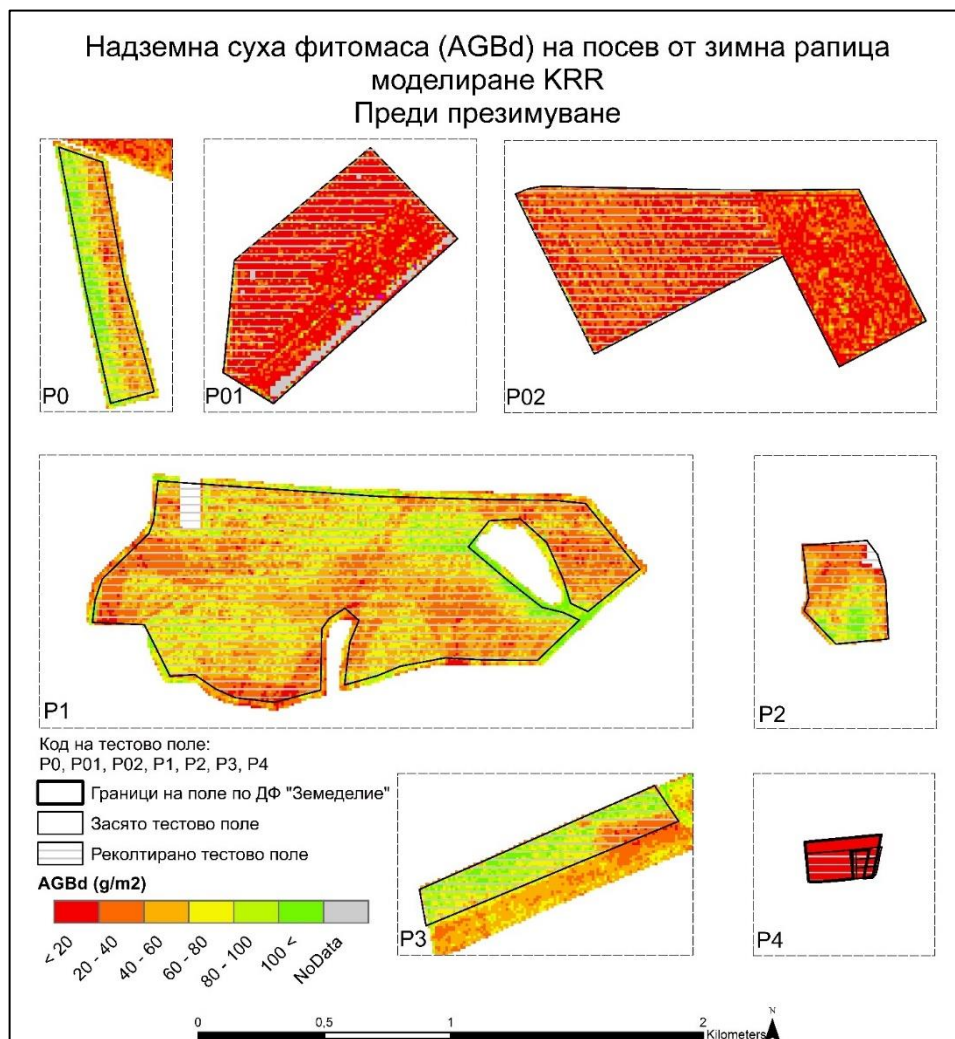
- от 4.11.2018 за преди и
- от 24.03.2019 за след презимуване

Оградените в сиво части са определени некоректно

Оградените във виолето части имат висока несигурност при определяне на стойностите

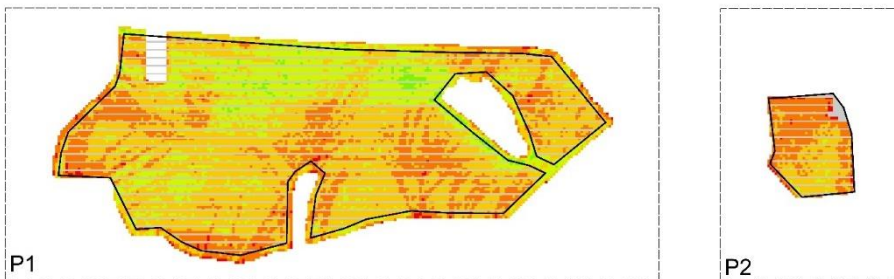
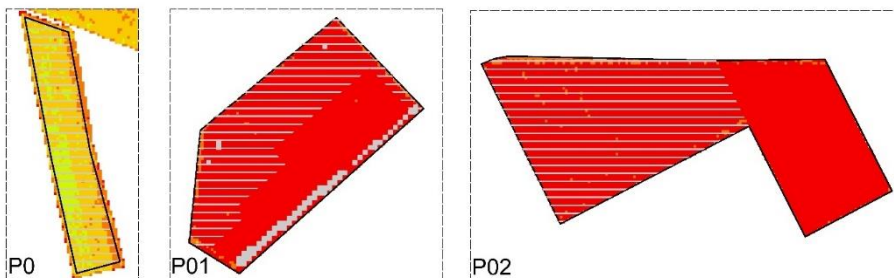


1 - Количеството надземна фитомаса на P4, след презимуване, е определена с по-ниски стойности отколкото измерените [Фиг.]



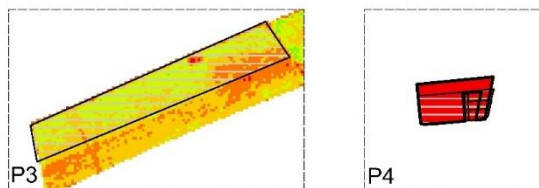
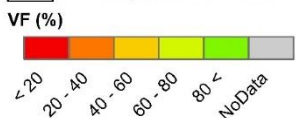
1 - Количеството надземна фитомаса на P4, след презимуване, е определена с по-ниски стойности отколкото измерените [Фиг.]

Общо площно покритие (VF) на посев от зимна рапица
 моделиране PLSR
 Преди презимуване

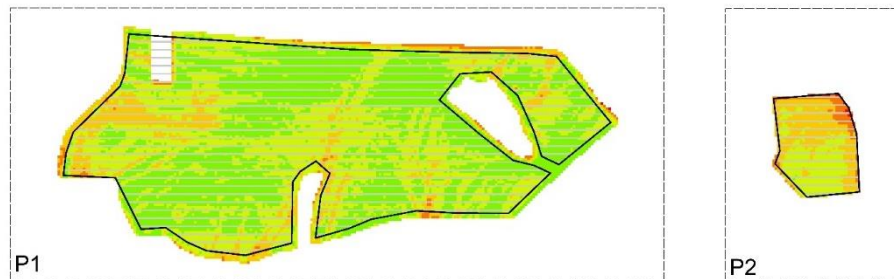
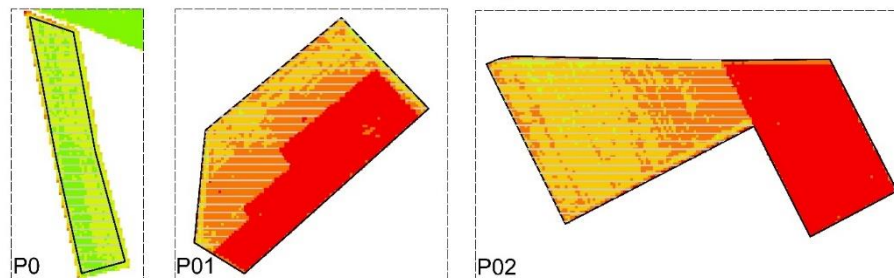


Код на тествано поле:
 P0, P01, P02, P1, P2, P3, P4

- Граници на поле по ДФ "Земеделие"
- Засято тествано поле
- Реколтирано тествано поле

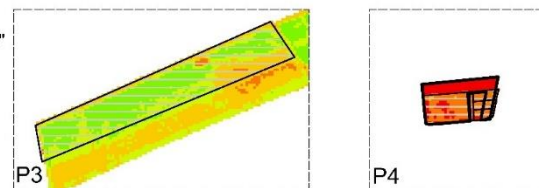
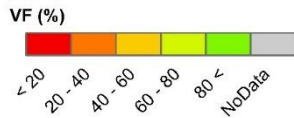


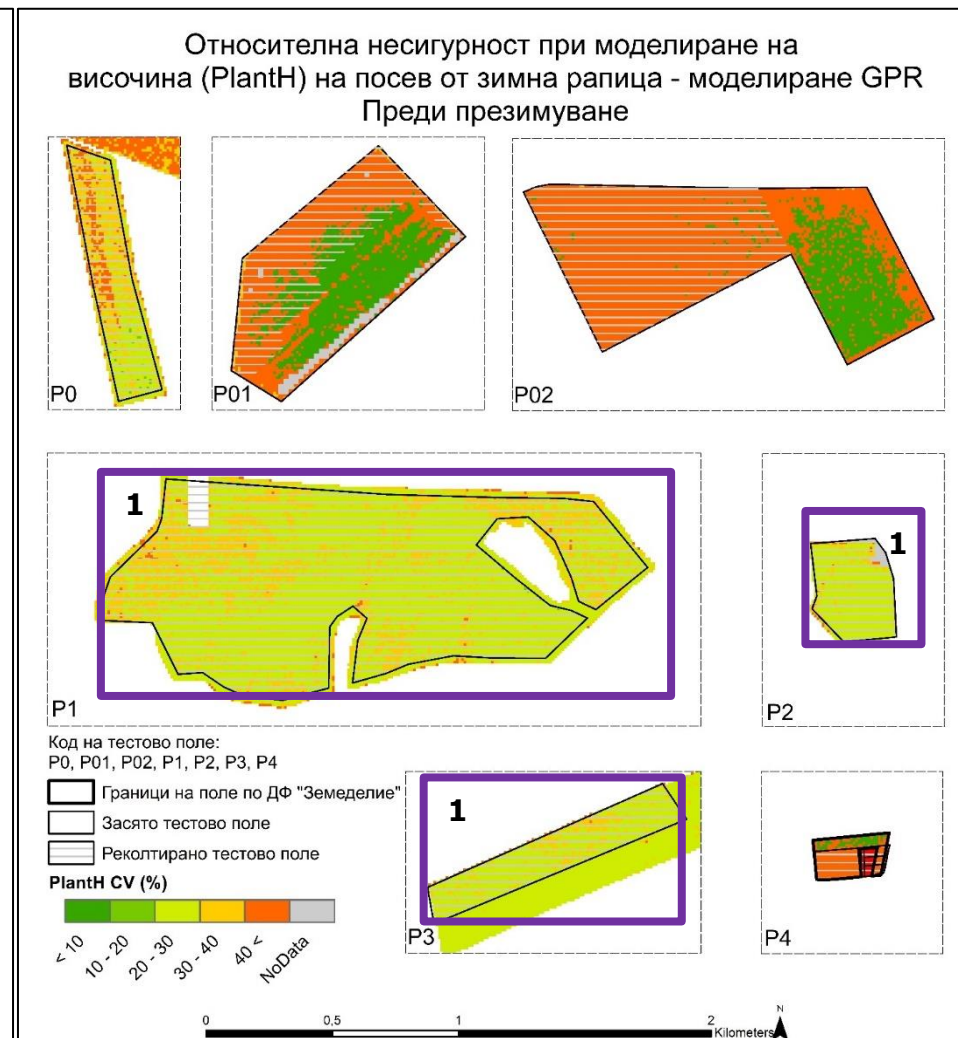
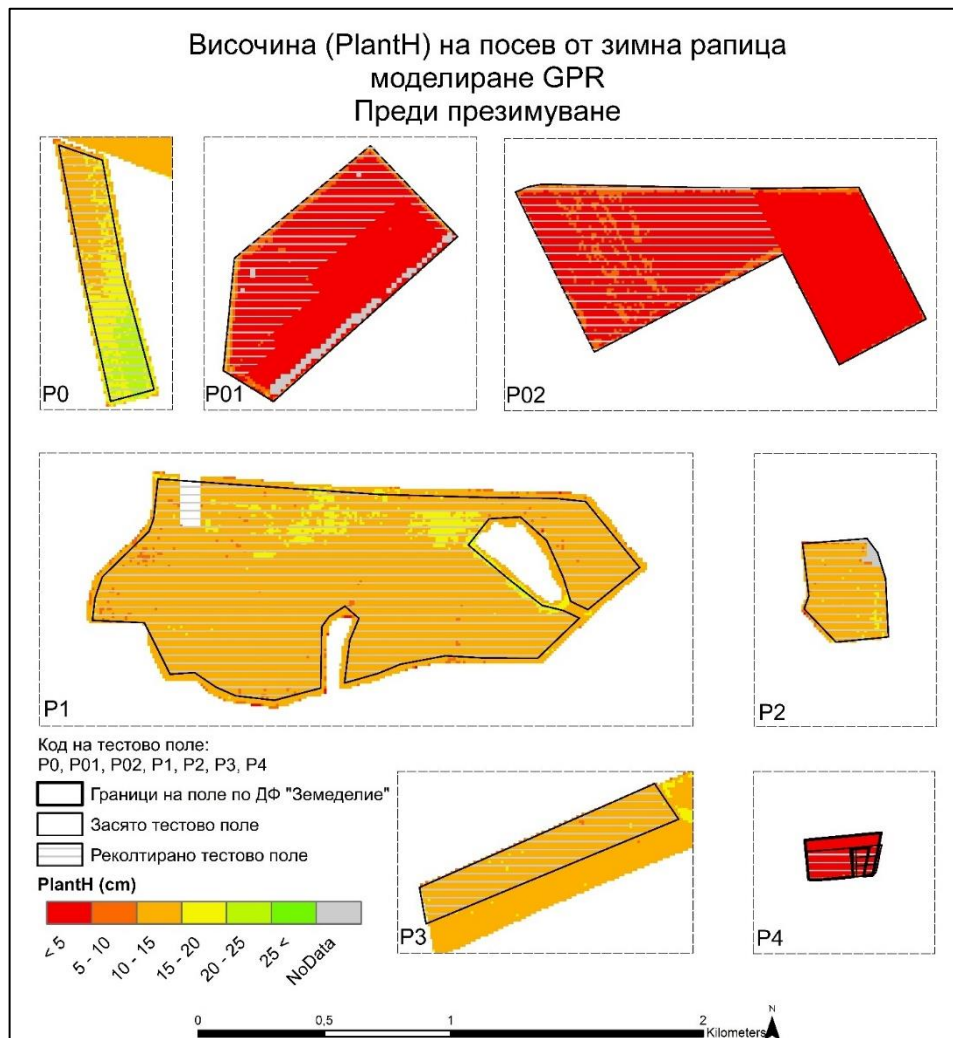
Общо площно покритие (VF) на посев от зимна рапица
 моделиране PLSR
 След презимуване



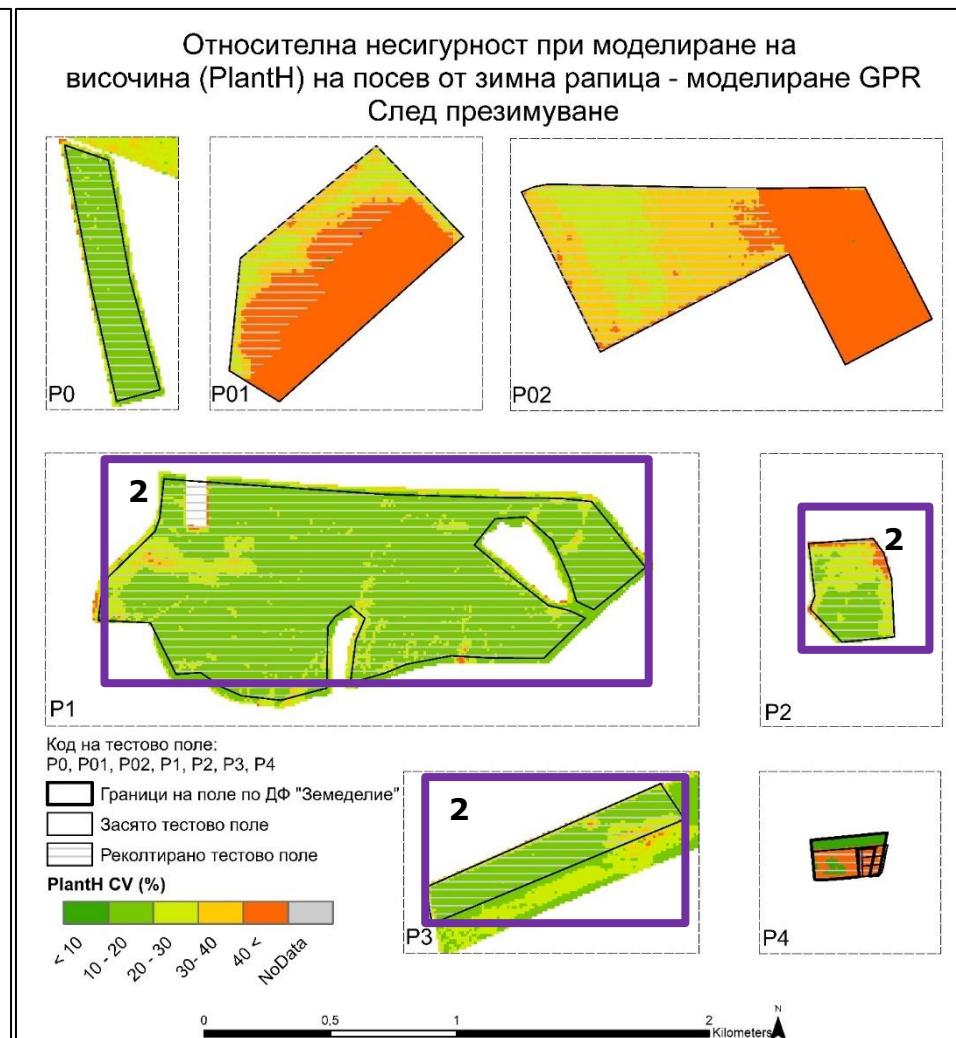
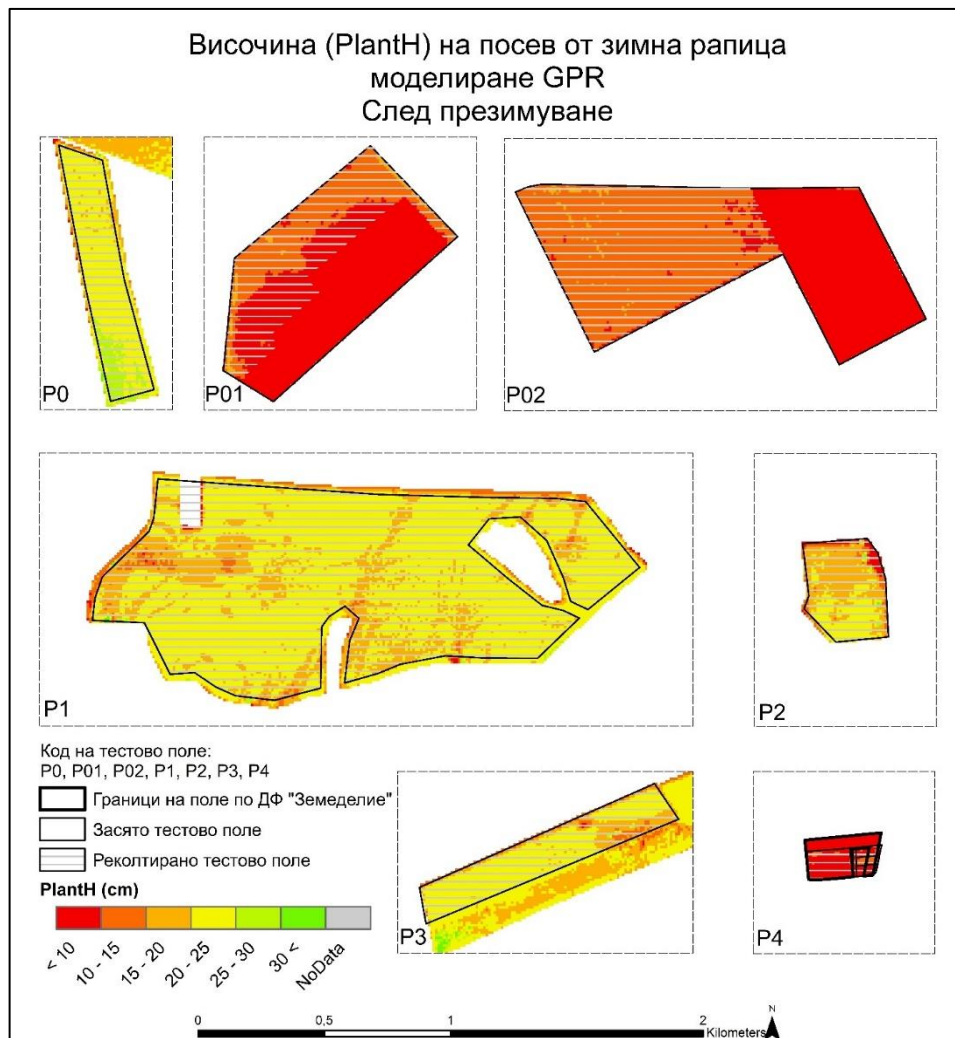
Код на тествано поле:
 P0, P01, P02, P1, P2, P3, P4

- Граници на поле по ДФ "Земеделие"
- Засято тествано поле
- Реколтирано тествано поле



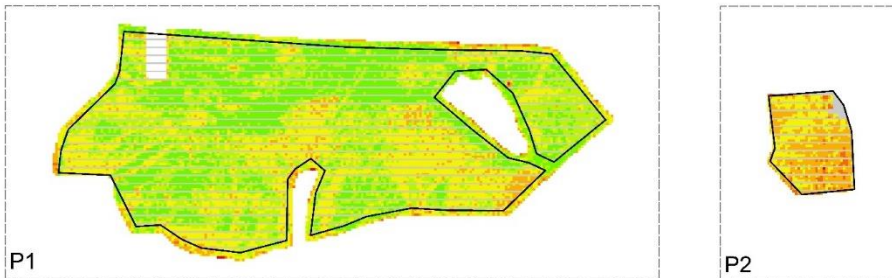
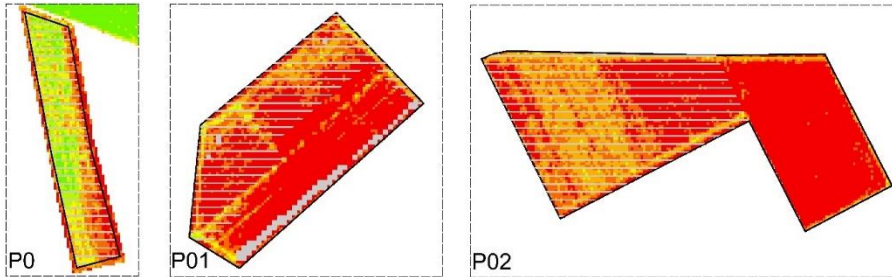


1 - Висока относителна несигурност, >20%, което показва, че моделът не е много сигурен в така определената равномерна



2 - Моделът след презимуване е много по-сигурен, относителна несигурност < 10

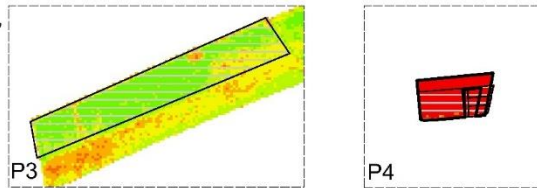
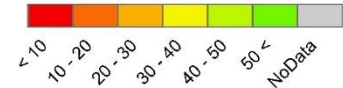
Гъстота (NbPlant) на посев от зимна рапица
 моделиране GPR
 Преди презимуване



Код на тествано поле:
 P0, P01, P02, P1, P2, P3, P4

- Граници на поле по ДФ "Земеделие"
- Засято тествано поле
- Реколтирано тествано поле

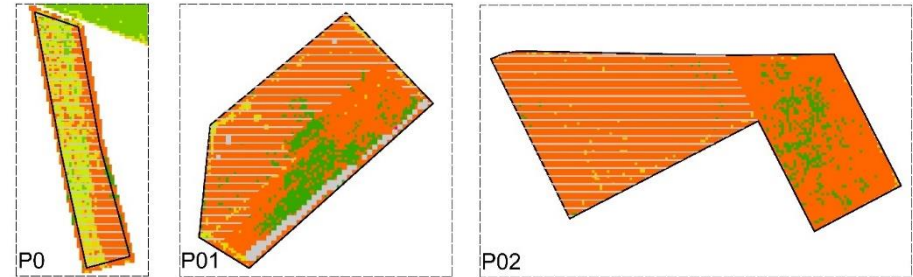
NbPlant (plants/m²)



P4



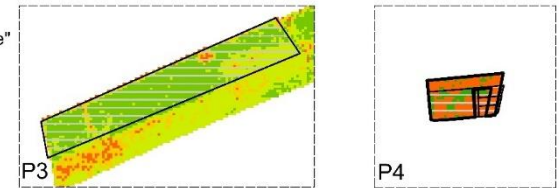
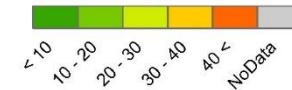
Относителна несигурност при моделиране на
 гъстота (NbPlant) на посев от зимна рапица - моделиране GPR
 Преди презимуване



Код на тествано поле:
 P0, P01, P02, P1, P2, P3, P4

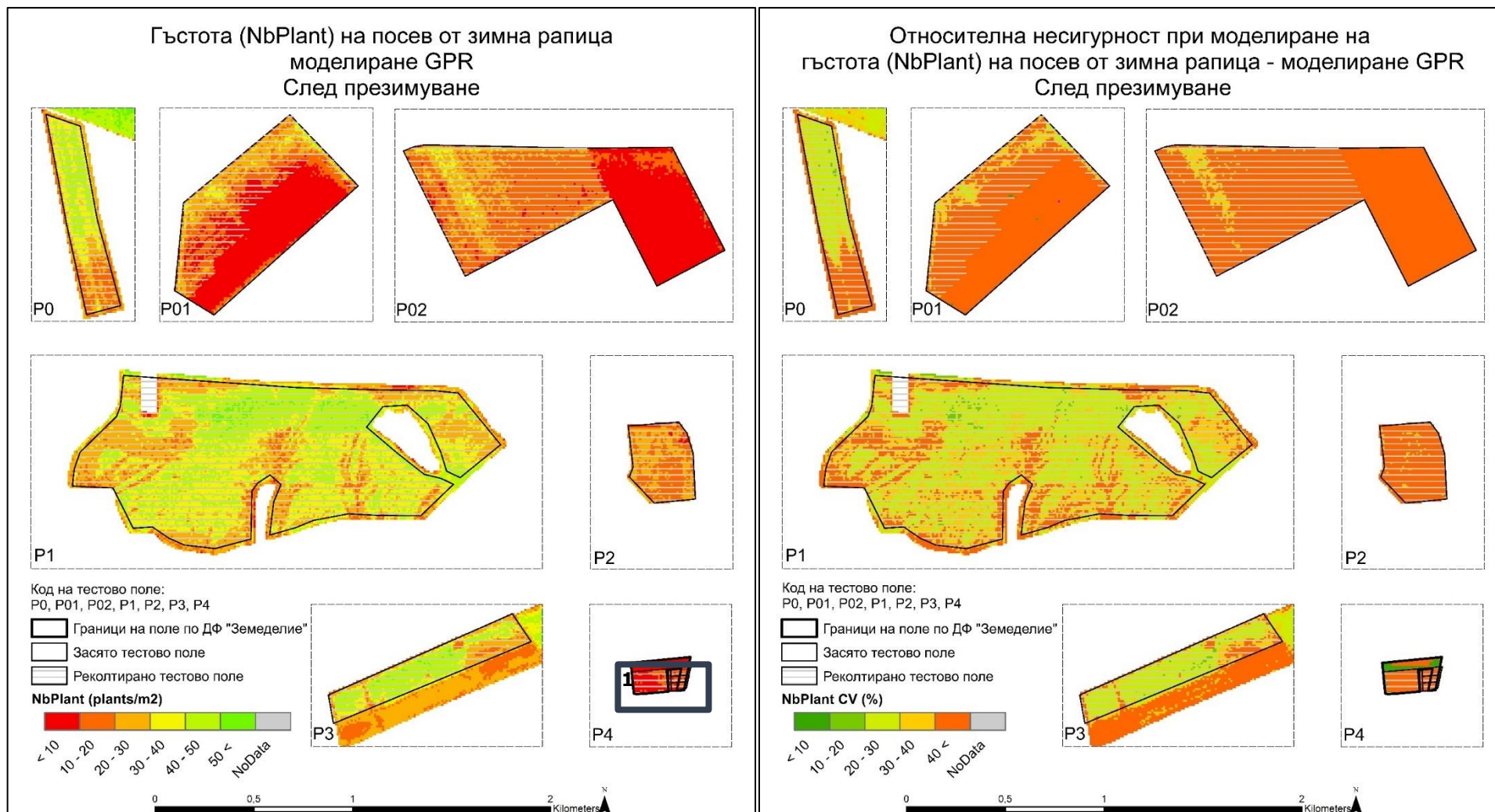
- Граници на поле по ДФ "Земеделие"
- Засято тествано поле
- Реколтирано тествано поле

NbPlant CV (%)



P4





1 - Гъстотата на посева на P4 след презимуване, е определена с по-ниски стойности в сравнение с измерените

PhD Thesis Title: Monitoring of winter rapeseed crops in Northeast Bulgaria through satellite and terrestrial data

Author: Dessislava GANEVA, Research associate

Affiliation: Space Research and Technology Institute (SRTI) – Bulgarian Academy of Sciences (BAS)

Abstract

The present study presents a methodology coded in Python for assessing winter rapeseed crops from Sentinel-2 images. Three important periods of winter rapeseed crop development are studied: before and after winter and flowering. For the assessment before and after winter, rapeseed canopy parameters are retrieved, such as above-ground phytomass fresh and dry (AGB_f, AGB_d), crop density (NbPlant), plant height (PlantH), vegetation fraction (VF) and nitrogen content in leaf samples (N), which are indicative for farmers.

For the retrieval of those parameters regression parametric and nonparametric algorithms were compared. The training, calibration and testing data is from field campaigns close to the Sentinel-2 visit dates. For the parametric models different Vegetation Indices (VI) and fitting functions were tested. The tested nonparametric algorithms are Partial Least Squares Regression (PLSR), Support Vector Regression (SVR), Kernel Ridge Regression (KRR) or Least Square Support Vector Regression and Gaussian Processes Regression (GRR). The best models are based on NRMSE_{test} (Normalized Root Mean Square Error on the test samples). For the training/validation data we used Sentinel-2 data, from several dates that are close together, for one field data. It was done when the development of the studied parameters remained unchanged. The best models for retrieval of the studied parameters are achieved with training regression nonparametric algorithms. The RMSE_{test} for each retrieved parameter is: for AGB_f: 254.52g/m² with SVR, for AGB_d: 29.81g/m² with KRR, for PlantH: 3.34cm with GPR, for NbPlant: 11plants/m² with GPR and for VF: 16% with PLSR.

No stable model was found that had generalization properties satisfactory for retrieval of total nitrogen in leaf samples (N).

Due to the small difference between the RMSE_{test} for each parameter compared to the measured ones, the results before the winter season can only be viewed as indicative, while the results after the winter are much more reliable. In practice, the issue of larger concern for the farmers is the development of crops after winter, so that they could make the right decision to preserve or destroy the respective crop of winter rapeseed and sow in its place a spring crop.

Additionally, the flowering duration for winter rapeseed crop was also studied. RGB images from camera mounted on UAV and processed into an orthophotomosaics were used as ground information. The RGB orthophotomosaics were transformed into HSV color model and unsupervised classification was applied to determine flowering/non-flowering pixels. The classified terrestrial information serves to set threshold values for two VIs: NDYI to determine the beginning and VARIGreen to determine the end of flowering.

Further, the assessment maps for winter rapeseed crops use the studied parameters and classify them in three categories (good, bad and good with risk of frost) before the winter season, and two states after winter (good and bad), as they did not fit the initially created categories of good, medium and bad for both periods. The use of two instead of three states was deemed a better alternative considering the magnitude of the RMSEtest of each retrieved parameter.

Finally, to calculate the flowering duration, we used the retrieved dates of beginning (NDYI) and end (VARIGreen) of flowering. The presence of a cloud cover at the beginning and end of flowering made determining the duration rather difficult or even impossible.

Considered the limitations of the current study here are suggestions for improving the results in further research:

- A study on the soil reflectance is needed. The more accurate information is obtained from bare soil, the better it can be applied for the training data of the regression models and the threshold values for the VI for beginning and end of flowering.
- Collecting more field training data will create a possibility to retrieve parameters with heterogeneous conditions.
- The algorithms should be altered to give better account for cloud and shadow removals.