СИСТЕМА ЗА ПОДПОМАГАНЕ НА РЕШЕНИЯ ЗА ПРОИЗВОДИТЕЛИТЕ НА НАПОЯВАНИ КУЛТУРИ

Александър Садовски, Илия Христов

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR IRRIGATED CROPS GROWERS

Alexander Sadovski, Iliia Christov

Abstract: Against the background of climate change, which reduces water availability in many areas of the world, every year the global Agriculture, the world's largest user of the planet's water resources, spends a huge amount of water without achieving optimal crop yields. Finding a universally applicable way to ensure the efficient use of irrigation water in agriculture is a real business need and its successful transformation into a fully functional automated decision support system is a technology that can lead to creation of a product, which will be a novelty for irrigation management. The article describes a comprehensive technology that allows scientific management of the state of irrigated crops for virtually any agricultural field that has been tested in long-term field trials and brought to the TRL6 software prototype. The structure of the Decision Support System is presented and links between the individual partial mathematical models and their technological relationship with the databases used are shown.

Key words: irrigation, decision support, agrometeorological characteristics, moisture energy

I. ВЪВЕДЕНИЕ

Проблемите, засягащи напояването на земеделски култури в световен мащаб, не са тайна за никого. На фона на изменението на климата, водещо, наред с други неща, до намаляване на водната наличност в много части на света, всяка година глобалното селско стопанство - най-големият ползвател на водните ресурси на планетата - харчи огромно количество вода без да получи оптимални резултати за реколтата. Статистиката показва, че въпреки различните налични опити за управление на напоителните води, селскостопанският сектор продължава да консумира около 70% от достъпната сладководна вода на планетата; по-голямата част от този ресурс се използва точно за напояване. Цифрите недвусмислено потвърждават мнението, споделено от водещи световни еко-експерти, че неефективното използване на вода в селското стопанство вреди на околната среда чрез промяна на нивото на подпочвените води и/или тяхното изчерпване.

Дори да оставим настрана екологичното измерение и свързаната с разходите страна на напояването на земеделие, трябва да отбележим, че неефективното напояване води до преки отрицателни ефекти върху добивите от земеделските култури. Доказано е както научно, така и на практика, че в случай на драстично намаляване на влагата в кореновата система на културите, в организма на растенията се пораждат необратими процеси. При някои критични фази на растителната еволюция този спад може да доведе до намаляване наполовина на очакваните добиви от земеделските култури въпреки вложените суровини (семена,

торове и т.н.) в началото на вегетационния период [7]. От друга страна, прекомерното напояване би възпрепятствало растенията да поглъщат водата, създавайки условия за разпад на корените, изчерпване на почвената продуктивност и ерозия на почвата.

II. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

Посочената по-горе ситуация определя както проблема в различните му измерения, така и пазарната възможност, която този проблем разкрива. Намирането на универсално приложим начин за гарантиране на ефективното използване на напоителните води в селското стопанство несъмнено е реална бизнес-нужда; нейната успешна трансформация в напълно функционална автоматизирана система за подпомагане на решенията (Decision Support System), технология която може да доведе до пускането на продукт, който със сигурност ще бъде новост за сегашния пазар на инструменти за управление на напояването. Накратко, такова потенциално успешно решение във въпросната област трябва да осигури ефективен, но евтин начин за управление на вложените водни ресурси, от една страна, и количеството и качеството на добивите, от друга [1], [3], [13].

Такъв е случаят с предложението за ключовия продукт, който екипът разработва по този проект с инициативата на компанията "Архимед.ЮДиЕсЕс" ООД (Archimedes UDSS LCC) от началото на 2018 г. и с помощта на Европейския Съюз по програмата "Хоризонт 2020". За първи път научната иновация, която е в основата на нашата разработка, се

фокусира не само върху влажността на кореновия слой, а върху енергията, поглъщана от растенията по време на вегетацията. Въз основа на това се предлага всеобхватна технология, която позволява научно управление на състоянието на напояваните култури практически за всяко земеделско поле, която е експериментирана и проверена в дългосрочни полски опити и доведена до софтуерен прототип TRL6.

Първата проверка на точността на разработения метод е направена с прототипа на софтуер, разработен в Института "Н. Пушкин", в близост до с. Горни Лозен и Челопечене, област София, както и чрез производствен експеримент с царевица, проведен в осем модулни единици, разположени в различни български агроекологични райони, което потвърждава универсалността на модела [8], [9].

Метеорологичните показатели за вегетационния период са взети от хидрометеорологичната станция "Ботунец", разположена в близост до полетата, както и ежедневните данни за слънчевата радиация - от Националния институт по метеорология и хидрология в София. Потенциалната евапотранспирация се определя от компенсаторен тип лизиметри. Водният запас в почвата бе проследен с помощта на почвени проби по термостатичния тегловен метод. Сравнението на средните експериментални стойности на водния запас в почвата с изчислените стойности въз основа на пилотния модел е представено в Таблица 1. Както може да се види, стойностите, получени при използване на прототипа, показват впечатляваща степен на съвпадение с измерванията на почвени проби.

Таблица 1. Измерен (M1) и изчислен (M2) воден запас за слоя 0 - 80 cm

Дата	M1 (mm)	M2 (mm)	Разлика (%)
5.VI	262.0	272.1	3.9
13.VI	251.9	256.0	1.6
30.VI	264.0	263.4	-0.3
11.VII	223.0	217.2	-2.6
25.VII	231.6	236.9	2.2
8.VIII	241.2	246.4	2.2
25.VIII	271.4	278.5	2.6

Структурата на Системата за подпомагане на решения се представя на Фиг. 1. Научна база при нейното конструиране са най-добрите съвременни научни постижения на Почвознанието, Агрономията и Метеорологията. Взети са под внимание и наши нови резултати, свързани с проблема.

Въз основа на данните от фермера за полетата за напояване, културите и площта на които се отглеждат, датите на засяване и технологията за обработка, се създава база данни за полетата. Текущите реални метеорологични данни се организират в друга база данни, която се актуализира периодично (ежедневно или през интервал от три дни). Третата база данни съдържа специфична информация за културите, а четвъртата база данни обхваща данни за почвените профили, механичния състав и тяхните водно-физически свойства.

Растежът и развитието на селскостопанските култури се извършва под решаващото влияние на климатични и метеорологични фактори и явления. Оттук се появява въпросът - кои метеорологични (неконтролируеми променливи) от огромното мнозинство от този вид, са най-значими и трябва да бъдат включени в математическия модел на добива [11]. За решаване на този проблем - избор на малък брой взаимно независими променливи, се използва методът на главните компоненти. Предмет на анализа са следните характеристики: Максимална денонощна температура на въздуха (°C); Минимална денонощна температура на въздуха; Средна денонощна температура на въздуха; Средна денонощна влажност на въздуха (%); Продължителност на слънчевото греене (h); Средна денонощна скорост на вятъра (km/h); Денонощно количество на валежите (mm) и брой дни с валежи над 0,1 mm.

Фиг. 1

В резултат на анализа са получени петте най-големи собствени стойности, чиято сума обяснява 98,42%, както и съответните собствени вектори [10]. Установено е, че избраните девет метеорологичните характеристики могат да бъдат разделени на три групи с много високи значителна корелация в рамките на групите и почти несвързани между тях групи. Първата главна компонента може да се нарече "температурна" и е обусловена от слънчевото греене; втората компонента е свързан с валежите и третата се идентифицира с вятъра. Тези три компонента обясняват 92,29% от дисперсията. Естествено е, че пълното обяснение на вариациите може да стане с отчитането на по-голям брой метеорологични характеристики [2].

Втората група от основни фактори, определящи развитието на културите и величината на добива са почвено-физическите свойства на почвения тип, върху който те се засяват. Тук е важно да се подчертае значението на величините пределна полска влагоемност, влажност на трайно завяхване, и плътност на почвата. От тях се определя продуктивният

воден запас в почвата. Изхождайки от съвременните енергетични представи за процесите на извличане на вода от почвата чрез корените на растенията, се въвежда индикатор L на енергетичното ниво на почвената влага, който позволява да се установи зависимост между този индикатор и количеството на добива [4], [5], [7], [12].

След редица модификации и подобрения на модела, въведени след първоначалните опити, се извършиха многогодишни експерименти, проведени край град Лом, а резултатите от тях и съответните заключения са обобщени по-долу. Показани в Таблица 2 са препоръчителните нива на влага в почвата, както и енергетичните нива $L = 5$ и $15 \text{ J}^{1/2}/\text{kg}^{1/2}$, необходими за получаване на максимално генетично възможно количество добив и съответно разумно за два сортове царевица. При почвените и регионалните условия, специфични за Северозападна България, разумните добиви на зърно са средно равно на 11.54 и 11.07 t/ha за сортовете царевица Н 708 и Кнежа 611.

Таблица 2. Енергетичните нива на почвата (L , $J^{1/2}/kg^{1/2}$), препоръчани да бъдат създадени в полетата за сортове царевица Н 708 и Кнежа 611 и съответните минимални допустими стойности на потенциала на почвената влага (ψ_{min} , J/kg) на всеки етап от отглеждането на култури. Стойностите на добива на царевично зърно (максимално генетично възможни количества при $L = 5 J^{1/2}/kg^{1/2}$ и едно разумно при $L = 15 J^{1/2}/kg^{1/2}$) са получени експериментално (е) на полето и изчислени (с), използвайки регресионните уравнения, основани на множество експериментални данни.

Клас номер	Име на класа	L ($J^{1/2}/kg^{1/2}$)	ψ_{min} (J/kg)	Царевица зърно (t/ha)	
				Н 708	Кнежа 611
I	Клас биологичен оптимум	5	-50	16.21 (е)	15.60 (е)
				16.69 (с)	15.12 (с)
III	Клас на слабо занижени нива	15	-225	11.91 (е)	–
				11.18 (с)	11.07 (с)

Съществен елемент на модела за конкретната култура, лежащ в основата на представената система е отношението на измерената или действителната евапотранспирация към потенциалната евапотранспирация, което се нарича коефициент или биологична функция на културата, K_s . Друг основен параметър е датата на ефективната покривка за всяка отделна култура.

На Фиг. 2 са показани връзките между отделните частни математически модели и технологичната им връзка с използваните бази данни. Ежедневните реални метеорологични данни включват посочените по-горе величини. Слънчевото греење и радиация се определят в зависимост от географската ширина на полето [12].

Фиг. 2

Почвената база данни съдържа съответните за почвения тип генетични профили, тяхната мощност по дълбочина, механичен състав по размери на частиците, общи химични свойства – хумус (%), киселинност рН (H_2O), водно-физични свойства – пределна полска влагоемност, влажност на трайно завяхване, обемна плътност на почвата, порьозност. Съществуват международни и наши бази данни, които могат да бъдат ползвани за целта [14], [15].

Централният модел определя оптималния воден дефицит, количеството продуктивна влага, точния ден за напояване, поливната норма вода и необходимото количество за напояване на всяко поле.

III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

В резултат на функциониране на системата се получава резултатна информация, даваща указания за оперативни решения по напояване на отделните полета и култури. На Фиг. 3 са дадени метеорологичните данни и пресметнатата потенциална евапотранспирация за полето в Челопечене.

Фиг. 4 съдържа графика за програмирано напояване с указване на датата за напояване, поливната норма и необходимото количество вода за напояване на полето.

Институт "Н. Пушкиров"
Изчислителен Център

Дата: 10/05/1977

МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ДАННИ И ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЯ

ОКРЪГ: СОФИЯ		АПК: ОПИТНО ПОЛЕ		ПУНКТ: ЧЕЛОПЕЧЕНЕ			НАЧАЛНА ДАТА: 19/05		
ДЕН		СРЕДНА ТЕМПЕРАТУРА	ОТНОС. ВЛАЖНОСТ	СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ	СР. СКОРОСТ НА ВЯТЪРА	ТЕМПЕР. НА ОРОСЯВАНЕ	НЕТО РАДИАЦИЯ	ТОПЛИНЕН ПОТОК	ПОТЕНЦ. ЕВАПОТРАНС- СПИРАЦИЯ
НОМЕР	ДАТА								
80	19 МАЙ	18.35	75.0	455	4.30	13.32	240.2	11.55	5.8576
81	20 МАЙ	18.45	76.0	503	2.30	14.49	271.1	4.20	4.8876
82	21 МАЙ	19.40	69.0	480	2.70	13.86	254.3	9.60	5.6011
83	22 МАЙ	19.10	67.0	471	2.70	14.45	251.6	3.30	5.3853

Фиг. 3

Институт "Н. Пушкиров"
Изчислителен Център

Дата: 10/05/1977

ГРАФИК ЗА ПРОГРАМИРАНО НАПОЯВАНЕ

ОКРЪГ: СОФИЯ		АПК: ОПИТНО ПОЛЕ		ПУНКТ: ЧЕЛОПЕЧЕНЕ			НАЧАЛНА ДАТА: 19/05		
ПОЛЕ НОМЕР	КУЛТУРА		ВОДЕН ДЕФИЦИТ ММ	ОПТИМАЛЕН ДЕФИЦИТ ММ	ДЕН ЗА НАПОЯВАНЕ		ПРОДУКТИВНА ВЛАГА ММ	ПОЛИВНА НОРМА КУБ.М/ДКА	КОЛИЧЕСТВО ВОДА КУБ.М
	КОД	НАИМЕНОВАНИЕ			НОМЕР	ДАТА			
1	6	ЦАРЕВИЦА	13.2	26.0	97	5 Юни	38.1	43.93	439

Фиг. 4

Разработени са параметрите за биологичните функции на голям брой селскостопански култури. Същите са получени в две алтернативни форми - като линеен модел на

части и като логистична функция. Тук се привеждат Фиг. 5 и 6 за коефициентите на културата царевица.

Фиг. 5 Линеен модел на части

Фиг. 6 Логистичен модел

Съответните регресионни уравнения и коефициенти са:

За линейния модел на части

$$K_c = a_1 + b_1(\text{Day}) \text{ if Day} \leq J_1$$

$$K_c = a_2 + b_2(\text{Day}) \text{ if } J_1 < \text{Day} \leq J_2$$

$$K_c = a_3 + b_3(\text{Day}) \text{ if Day} > J_2,$$

където

$$a_1 = 0.1459609 \quad a_2 = -0.4607935 \quad a_3 = 2.655409$$

$$b_1 = 1.001513E-03 \quad b_2 = 2.619787E-02 \quad b_3 = -2.542916E-02$$

$$J_1 = 24.08104 \quad J_2 = 60.35991; \quad R^2 = 0.954769.$$

За логистичния модел

$$y = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b},$$

където

$$a=0.044538818 \quad b=0.98506885 \quad c=60.358416 \quad d=12.551947; \quad R^2 = 0.954149.$$

Практически няма разлика в точността на двата модела, но вторият може да бъде предпочетен, тъй като на оценка подлежат само четири параметъра.

Една практическа демонстрация на иновативното развитие на описания модел е извършена в Синдос, района на Солун, Гърция, по международен проект, финансиран от научното отделение на НАТО, която отново доказва ефективността и прецизността на метода за програмиране на напояването [6]. Имайки предвид нетната слънчева радиация, конвекционният фактор и слабите валежи, всички характеризиращи високите изисквания за

изпарение в атмосферата, може да се заключи, че напояването на културите в региона Синдос е от голямо значение за селскостопанското производство. Точното управление с разработената компютърна технология е средство за увеличаване ефективността на водата при напояване в селското стопанство.

Пилотна демонстрация в реални условия вече се извършва със софтуерният прототип TRL6 на бъдещата Система за подпомагане на решения за производителите на напоявани култури във ферма в землището на с. Паничери, окръг Хисаря. Производственият опит се извежда на две полета (1 хектар слънчоглед - хибрид Пионер

P63LE113 и 1 хектар царевица - хибрид Пионер P9415). Слънчогледът е засят на редове, с междуредово разстояние 70 см. и оптимална гъстота на посева 5500 раст./дка. Междуредовото разстояние при сеитбата на царевица е също 70 см. при гъстота 8000 раст./дка. Извършено е торене с азот, фосфор и калия 15 x 15 x 15 кг/дка. Метеорологичните данни се въвеждат в системата ежедневно от станция, която се намира в с. Паничери на 700 м от полето (42.45 N, 24.61 E). В края на стопанската година ще се определят и отчетат първите резултати, които могат да бъдат съобщени чрез панаири, семинари и публикации. Това е стъпка към привличане на вниманието на други фермери иноватори, провокиране на техния интерес и убеждаване, че това е пътят за решаване на проблеми.

Съществени елементи на описаната система са два нови метода:

Първият е метод за агрометеорологична характеристика на местоположението въз основа на ограничен набор от данни. Той дава възможност за използване на преносими локални метеорологични уреди, които са способни да измерват само някои основни метеорологични параметри и ги преобразува в пълен набор от необходимите за системата характеристики - максимална денонощна температура на въздуха (°C); минимална денонощна температура на въздуха; средна денонощна влажност на въздуха (%); продължителност на слънчевото греење (h) и др.

Вторият е метод за определяне величината на добива от културите чрез енергията на влагата в почвите. Статистическият анализ на данни за количеството (Y, t/ha) на добива от царевица, получен при съответни енергетични равнища ($L, J^{1/2}/kg^{1/2}$) на почвената влага показва, че съществува добра корелационна зависимост между тях. Обработката на данните за средните добиви, получени от вариантите с подходящи норми на торене през периода 1982 - 1988 г. води до получаването на уравнението:

$$Y = 19.214 - 0.516 L,$$

като коефициентът на корелация е $R = 0.973$.

Използването на компютърната технология за подпомагане на решения по напояване в различни географски (почвени, релефни и климатични) условия, е възможно. Можем да установим зависимостите на количеството добив от културите и качеството на състоянието на водите в почвата, изчислени от индекса на енергийните нива на почвената влага за различни региони. За тази цел е

необходимо да бъдат проведени полски експерименти в бъдеще.

Не е преувеличено да се каже, че днес компютърната техника и информационните технологии са толкова необходими, колкото и трактора за селското стопанство.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прилагайки усъвършенствуваната научна основа и съответния компютърен софтуер, ние можем целесъобразно да използваме наличните водни ресурси, да увеличаваме ефективността на водата и торовете при селскостопанските напоителни практики в широк мащаб и грижливо да защитаваме околната среда.

Междувременно, по отношение на разработването на продукта, завършването на тази първа демонстрация в истинска ферма ще доведе технологията ни до TRL7 (в съответствие с дефиницията на ЕО – демонстрация на прототип на системата в оперативна среда) още преди завършването на оценка на осъществимостта.

БЛАГОДАРНОСТИ: Този проект е получил финансиране от програмата на Европейския Съюз за научни изследвания и иновации "Хоризонт 2020" по споразумение за отпускане на безвъзмездна помощ № 826310. Изказваме благодарност за оказаната помощ от Европейския Съюз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christov, I.D., A.N. Sadovski. System for Scientific and Effective Management of Crop Water Status in the Country. – Proceedings of the First Congress for Physicists in Bulgaria, Sofia, 28 September -1 October 1983, p. 491. (in Bulg.)
2. Christov, I.D. Climatic Factors Effect on Evapotranspiration. – Hydrology and Meteorology, 6, 55-61, Sofia 1983. (in Bulg.)
3. Christov I., A. Sadovski. Optimal water regime determined by using meteorological, soil-physical and biological information. Hydrol. and Meteor., XXXIII, № 6, 73-82. Sofia 1984. (in Bulg.)
4. Christov, I.D. Energy Levels of Soil Moisture and Biological Productivity. - Agricultural Science, 5, 69-75, Sofia 1989. (in Bulg.)
5. Christov, I.D. Irrigation Schedules for Realizing Different Energy Levels of Soil Moisture. – Plant Science, (9-10), 31-36, Sofia 1993. (in Bulg.)

6. Christov I., A. Sadovski, A. Louisakis, A. Panoras, Y. Mavroudis. Application of Computer Technology for Crop Irrigation Scheduling to reduce negative Impact on Environment. J. of Balkan Ecology, vol. 1, No. 3, 34-40, 1998.
7. Christov, I.D. Estimation of Agroecosystem Water Status and Formation of Plant Water Supply in Soils. – Monograph, Ecology Series, PublishScieSet-Eco, Sofia 2004, ISBN 954-749-044-3, 216 pp. (in Bulg.)
8. Krafti G., A. Sadovski, I. Christov, B. Kolev. Prognosis and management of the irrigation regime. Plant Sci., vol. XVII, No. 4, 135-143. Sofia 1980. (in Bulg.)
9. Krafti G., I. Christov, A. Sadovski, B. Kolev. Model for Prognosis and management of irrigation regime. Proceedings of Symp. "Physics - Farming", St. Zagora, 30.X.-1.XI.1980, 306-312. SPhB, Sofia 1981. (in Bulg.)
10. Sadovski A. Application of principal components analysis in study of some noncontrolable factors influencing yields. Hydrology & Meteorology, vol. XXV, No. 5. Sofia 1976. (in Bulg.)
11. Sadovski A. Self-organizing Models of Biological and Environmental Systems. J. of Balkan Ecology, vol. 1, No. 2, 15-20, 1998.
12. Sadovski A. Basic natural factors influencing sustainable agriculture. Ecological Engineering and Environment Protection, No. 1, 66-72, Sofia 2018.
13. Sadovski A. An Introduction to the Mathematical Agronomy: Theoretical and Experimental bases. BSC-IEAS, Sofia. GlobeEdit, 2018. ISBN 978-613-8-23895-9, 310 pp. (in Bulg.)
14. Teoharov M., Sv. Popandova, R. Kancheva, T. Atanasova, V. Tsoleva, M. Banov, P. Ivanov, E. Filcheva, R. Ilieva. Reference database for soils in Bulgaria. In: M. Teoharov et al. (Eds.). Agric. Academy, Inst. of Soil Sci. "N. Poushkarov", Sofia. Publ. House "Poni", 2009, 416 p. (in Bulg.)
15. World Soil Information. ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset (Ver. 3.1) Report 2008/02. Wageningen. https://www.isric.org/isric/Webdocs/Docs/ISRIC_Report_2008_02.pdf.

проф. д-р Александър Садовски

академик на МАНЕ

тел.: 02-981-5586

e-mail: alexsad@hotmail.com

проф. д-р Илия Христов

тел.: 02-862-2582

e-mail: ichristov@gmail.com

Prof. Dr. Alexander Sadovski

Academician of the IEAS

Phone: +3592-981-5586

e-mail: alexsad@hotmail.com

Prof. Dr. Ilia Christov

Phone: +3592-862-2582

e-mail: ichristov@gmail.com