BEEMON SMART HIVE AS A STEM ENVIRONMENT FOR COMPETENCE-ORIENTED LEARNING: FROM MEASUREMENT TO MATHEMATICAL PREDICTION

MARTIN I. PETROV **ZLATINA I. ATANASOVA**

ABSTRACT: *BeeMon is presented as a design-and-methodology STEM environment built around a functioning smart-hive system. The model integrates needs and competitor analysis, engineering design and fabrication, ESP32 sensing, web software, authentic data, mathematical analysis and prediction, and product reasoning. The Research Lab supports data-quality checks, correlation, lag analysis, regression, IQR anomaly detection and a chronological forecasting experiment. In the real-data demonstration, the baseline model produced lower prediction errors than the more complex alternatives. This result is important because it shows that adding complexity does not automatically improve forecasting performance. BeeMon presents the same verified calculations through Student, Advanced and Research views, while the local AI assistant is used only to explain already computed results. It does not take part in the calculations themselves. Its contribution is methodological: it shows how a real smart-hive system, real sensor data and several levels of analysis can be combined in a single STEM-oriented framework.*

KEYWORDS: *STEM education, smart hive, IoT, real-world data, data literacy, mathematical modelling, engineering design, artificial intelligence.*

DOI: https://doi.org/10.46687/GUND4112

УМЕН КОШЕР BEEMON КАТО STEM СРЕДА ЗА КОМПЕТЕНТНОСТНО ОРИЕНТИРАНО ОБУЧЕНИЕ: ОТ ИЗМЕРВАНЕТО ДО МАТЕМАТИЧЕСКАТА ПРОГНОЗА[*]

МАРТИН И. ПЕТРОВ **ЗЛАТИНА И. АТАНАСОВА**

АБСТРАКТ: *BeeMon е представен като design-and-methodology STEM среда, изградена около реално функционираща система за интелигентен кошер. Моделът обединява проучване на потребност и конкуренти, инженерно проектиране и изработка, ESP32 и сензори, уеб софтуер, автентични данни, математически анализ и прогнозиране и продуктово осмисляне. В Research Lab работата започва с проверка на качеството на данните, преди да се премине към корелации, времеви зависимости, регресия и откриване на аномалии чрез IQR. Прогнозирането се проверява отделно чрез хронологичен експеримент. При използваните реални данни именно простият baseline модел дава по-добър резултат от по-сложните варианти. Това показва, че добавянето на сложност само по себе си не води непременно до по-добра прогноза. Student, Advanced и Research работят върху едни и същи изчисления. Разликата е в това колко подробно се показват резултатите. Локалният AI се включва след тяхното получаване и се използва само за обяснение. Той не участва в самите изчисления.*

1. Въведение

Компетентностно ориентираното STEM обучение поставя обучаемия в ситуация, в която знанията от различни области не се използват изолирано, а се свързват при решаването на реален проблем. Автентичните задачи, моделирането и работата с реални данни създават

[*] The article is partially supported by the projects RD-08-117/05.02.2026 of the Konstantin Preslavski University of Shumen Research Fund and BG05SFPR001-3.004-0021-C01 – IntegrITy

връзка между математиката, науките, технологиите и инженерството [6, 9, 11]. Така измерването, техническата реализация, обработката на данните и математическото моделиране могат да бъдат разглеждани като свързани етапи от един и същ проект.

Подходящ контекст за подобен тип работа са интелигентните системи за наблюдение на пчелни семейства. Съвременните smart-beehive решения съчетават сензори за тегло, температура и влажност с комуникационни технологии, дистанционна обработка, анализ на данни и прогнозни подходи [2, 4-5, 8, 14]. За настоящото изследване въпросът не е дали такива устройства съществуват, а как една реално функционираща система може да бъде използвана като среда, в която инженерното решение, автентичните данни и математическият анализ са части от общ процес.

При STEM работа с IoT изграждането на системата поставя началото на следващата част от задачата. След като сензорите започнат да събират измервания, върху тях могат да се формулират изследователски въпроси, да се извършва анализ и да се изграждат математически модели. Engineering design е свързан с техническата реализация, а data-driven thinking стъпва върху данните, които системата генерира.

Тази логика е приложена и в design-and-methodology изследването с BeeMon. RQ1 проследява системата като STEM среда през жизнения цикъл на продукта. При RQ2 отправната точка вече са сензорните данни. Първо се формулира изследователски въпрос и се проверява качеството на измерванията, след което се изгражда и валидира модел. Заключението се формулира едва след тази проверка. RQ3 започва след аналитичната част и е свързан с представянето на вече проверените резултати с различна дълбочина. Контролираният AI се използва само за подпомагане на обяснението им и не участва в изчисленията.

2. Методология и проектен модел

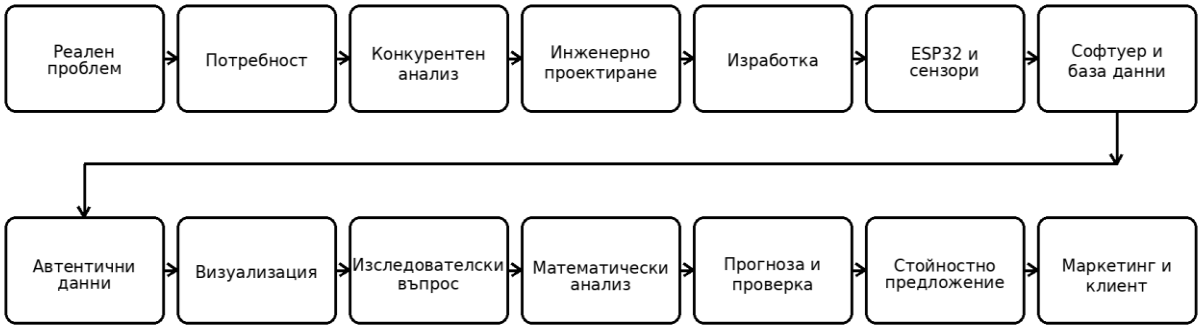
Методологичният модел на BeeMon е изграден така, че отделните дейности да следват логиката на реалната система. BeeMon се изгражда като реално работеща система, в която конструкцията, сензорите, комуникацията и софтуерът трябва да функционират съвместно. След започване на измерванията данните се подготвят и анализират, а при определени задачи се използват и за прогнозиране. В STEM работа същите измервания служат като основа за последваща интерпретация.

Отправната точка е конкретна потребност от практиката: каква информация е необходима на пчеларя, кои показатели могат да бъдат измервани автоматично и какви ограничения имат съществуващите решения. Прегледите в областта на precision beekeeping показват, че цената, необходимостта от поддръжка, автономността и неясната възвръщаемост продължават да бъдат практически бариери при внедряването на подобни системи [4, 8].

След проучването на потребностите и съществуващите решения се определят изискванията към продукта и се преминава към engineering design. Този подход структурира STEM дейността като последователност от дефиниране на проблема, разработване на възможни решения, прототипиране и тестване [12, 15]. При BeeMon инженерната част включва определяне на размерите и товарния път на металната конструкция, избор на подходящи материали, рязане, пробиване, заваряване, сглобяване и защита от атмосферни условия. В учебна среда отделни етапи от този процес могат да бъдат анализирани или възпроизвеждани от обучаемите.

Жизненият цикъл на BeeMon не приключва със създаването на работещ прототип. След техническата реализация и анализа на данните се разглеждат и въпроси, свързани с

целевите потребители, стойностното предложение на продукта и възможните начини за достигане до крайни клиенти.



Фиг. 1. Жизнен цикъл на BeeMon като интегрирана STEM среда

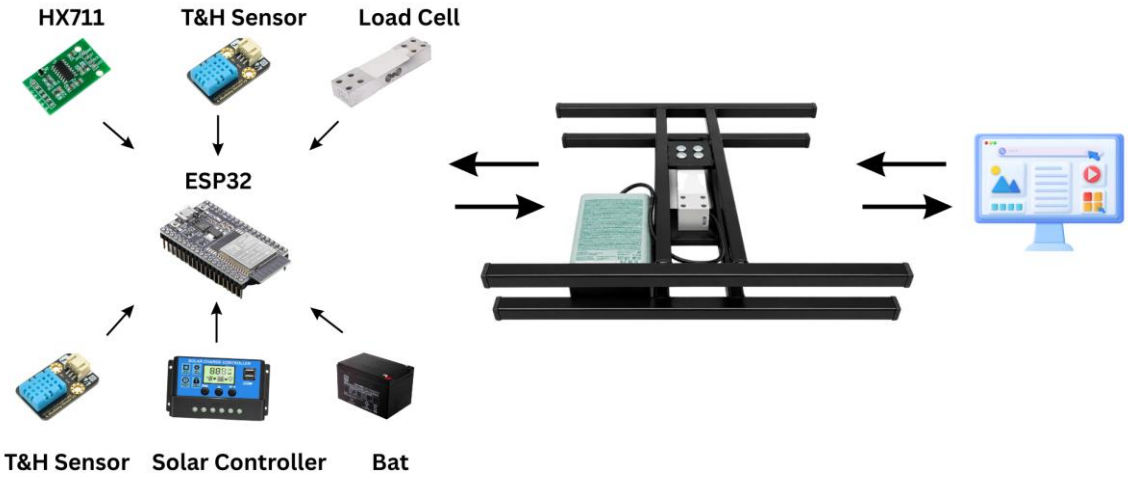
3. Сензорна и софтуерна архитектура

Електронният слой на BeeMon е изграден около ESP32. Към него са свързани товарен датчик за измерване на теглото и сензори за температура и влажност във и извън кошера. BeeMon може да се разширява с допълнителни датчици според конкретната задача — например за валеж, атмосферно налягане или вятър. При добавяне на нов сензор трябва да се проверят диапазонът и точността на измерване, необходимостта от калибриране и подходящата честота за запис. След това идват решенията за захранването, защитата на електрониката и комуникацията. Същите практически въпроси могат да се използват и като инженерни задачи в учебна среда.

Събраните от сензорите данни се предават към уеб приложението BeeMon. Laravel/PHP обслужва приложната логика и интерфейса, базата данни съхранява измерванията, а визуалният слой ги представя чрез контролни панели и интерактивни графики. По този начин процесът от физическото измерване до визуализацията на резултата остава проследим в рамките на една система.

Основните измервани величини са тегло, вътрешна и външна температура и влажност. Наред с тях се съхраняват и технически показатели, свързани със състоянието на системата, като ниво на батерията и качество на сигнала. BeeMon записва и метеорологични стойности от Open-Meteo, но те се разглеждат като FORECAST – прогнози, налични към момента на записването им, а не като впоследствие наблюдавана локална метеорологична история. Това разграничение между измерена стойност, производен показател и прогноза е важно както за методологията на анализа, така и за обучението, свързано с произхода и надеждността на данните.

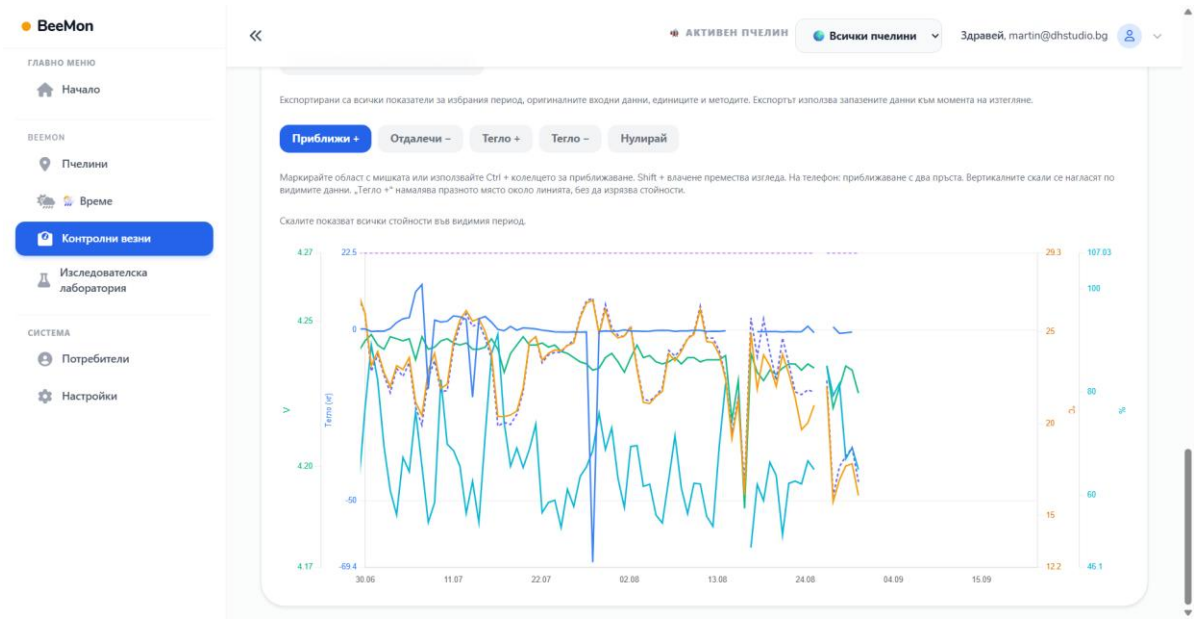
IoT образованието обединява компоненти като sensing, networking, services и interfaces, а систематичните обзори подчертават ролята на нискобюджетния хардуер, open-source софтуера и активните методи на обучение [1]. Benita et al. разглеждат data-driven thinking като част от IoT-базирана STEM екосистема [3]. BeeMon следва сходна технологична логика, но я прилага към конкретен пчеларски продукт, при който инженерната конструкция, сензорните измервания, софтуерната платформа и математическият анализ са свързани в общ процес. В български контекст развитието на дигиталните компетентности на педагогическите специалисти също се разглежда като необходим компонент на съвременното образование [10].



Фиг. 2. Обобщена схема на BeeMon: ESP32, сензори и връзка с уеб платформата

4. Автентични данни и подготовка за анализ

Графичното наблюдение е първата стъпка при работата с данните. Потребителят избира период и показателите, които иска да проследи – тегло, температура, влажност, батерия и метеорологични данни. В уеб интерфейса на BeeMon на едно място са показани текущите стойности, обобщената информация и интерактивните графики за наблюдавания период (фиг. 3). Това позволява потребителят първо да проследи състоянието на системата и промените в измерванията, преди да премине към по-задълбочен анализ. Така измерванията могат първо да бъдат разгледани визуално, преди да се премине към математическия им анализ.



Фиг. 3. Уеб интерфейс на BeeMon - текущи измервания, обобщения и интерактивни графики

Основен производен показател в BeeMon е дневната промяна в теглото. За всеки ден се използва един и същ часови прозорец, в рамките на който се изчислява медианата на наличните измервания. Разликата между стойността за текущия и предходния ден определя дневната промяна. За изчислението са необходими поне две измервания, направени в различни моменти. Използването на медиана ограничава влиянието на единични крайни стойности, а еднаквият часови прозорец прави резултатите по-съпоставими. Полученият показател описва промяната в масата на кошера и не трябва автоматично да се интерпретира като „добив на мед“.

Преди да се премине към математическия анализ, Research Lab показва какви данни реално ще участват в изчисленията. Потребителят вижда избрания период и часовата зона, броя на календарните и използваемите дни, оригиналните измервания, липсващите стойности и дните, които са изключени заедно с причината за това. По този начин качеството на данните се проверява още преди избора на аналитичен метод. Необичайните стойности не се изтриват автоматично. Те се отбелязват и остават видими, за да може след това да се провери дали са резултат от реално събитие, технически проблем или друга причина.

Работата с подобни автентични данни е пряко свързана с развитието на data literacy. Систематичен обзор на 83 емпирични изследвания подчертава значението на използването на реални данни и тяхната внимателна интерпретация в STEM контекст [6].

5. Математически анализ и прогнозиране

Изследователската лаборатория е организирана като последователен процес: изследователски въпрос -> избор на данни -> проверка на качеството -> математически анализ -> интерпретация -> заключение. В нея са реализирани Pearson и Spearman корелация, lagged relationships от -7 до +7 календарни дни, проста и множествена линейна регресия с до три фактора, прогнозен експеримент и откриване на аномалии чрез IQR. Автоматично заключение на база p-value не се извежда, тъй като независимостта на последователните дневни наблюдения не е установена. По същата причина установената корелация се разглежда като зависимост в данните, а не като доказателство за причинност.

Едни и същи данни и математически изчисления могат да бъдат представени в три режима – Student, Advanced и Research. Разликата е в начина и дълбочината на представяне. Student използва по-достъпни обяснения и насоки, Advanced показва основните количествени показатели и графики, а Research предоставя по-пълна статистическа и методическа информация. Това позволява една и съща задача да се използва при различно ниво на подготовка, без да се променя нейната математическа основа.

Pearson и Spearman дават възможност да се сравняват линейни и рангови зависимости. Чрез lag анализа се проверява дали по-силна връзка се наблюдава в същия ден или при времево изместване. Получените коефициенти се интерпретират описателно в рамките на конкретния набор от данни и не се приемат автоматично като доказателство за причинен механизъм.

Линейната регресия е реализирана като прост и множествен модел с до три фактора. Така анализът преминава от въпроса „има ли зависимост?“ към следващата стъпка – „може ли тази зависимост да бъде описана и проверена като модел?“. В автентични STEM ситуации математическото моделиране свързва реалния проблем с неговата математическа формализация, последващата интерпретация и валидация [9, 16].

При прогнозния експеримент се проверяват три варианта – baseline, History-only и History + Weather. За да бъдат сравнени при еднакви условия, и трите се оценяват върху едни и същи по-късни дни. По-ранните наблюдения остават за обучение на моделите, а по-

късните се използват за проверка на прогнозата. Получените грешки се сравняват чрез MAE и RMSE.

IQR служи за откриване на стойности, които се отличават от останалите наблюдения, но самото им маркиране не е достатъчно основание те да бъдат премахнати. При BeeMon такава стойност може да съвпадне с реално събитие в кошера, намеса на пчеларя, промяна в условията или технически проблем. Затова след статистическото откриване следва проверка на конкретния случай. Едва тогава може да се прецени как трябва да бъде интерпретирана наблюдаваната аномалия.

6. Демонстрация с реални данни

За демонстрацията е проведен прогнозен експеримент с данни от контролна везна 1 за периода 26.05–17.09.2026 г. Използван е часови прозорец 22:00–23:00, а като метеорологични фактори са включени температурата и валежът. След подготовката на данните са формирани 68 training и 21 test наблюдения. Трите модела са оценени върху едни и същи тестови дни, което позволява резултатите им да бъдат сравнени при еднакви условия (табл. 1).

Таблица 1

Резултати от сравнителния прогнозен експеримент

Модел	Фактори	MAE, kg	RMSE, kg
Baseline	Прираст	0,3090	0,6036
History-only	Прираст	0,6017	0,6930
History + Weather	Прираст, температура, валежи	1,6883	2,1217

За разглеждания период най-ниска грешка показва baseline моделът. History-only не води до подобрение, а добавянето на температура и валеж увеличава както MAE, така и RMSE. Резултатът показва, че по-сложният модел не е непременно по-точен и че качеството му трябва да се оценява върху данни, които не са използвани при обучението. В този смисъл по-слабият резултат на по-сложния модел не е провал на изследователската задача, а част от самия процес на проверка и сравнение.

Това не означава, че метеорологичните фактори нямат отношение към динамиката на кошера. За конкретния период и използвания набор от данни простият baseline модел се оказва по-надежден от разгледаните по-сложни варианти.

7. BeeMon като компетентностно ориентирана STEM среда

Основният методически принос е, че отделните STEM области не се обединяват само около обща тема, а се свързват чрез един реален продукт и последователност от практически задачи. Engineering design и design thinking подкрепят прехода от формулирането на проблема към разработването на прототип и неговата проверка [12, 15], а български изследвания разглеждат както същността на STEM, така и нагласите към STE(A)M(E) в националния образователен контекст [11, 13].

При BeeMon отделните елементи не се разглеждат самостоятелно. IoT инфраструктурата осигурява реалните данни, върху които след това се извършват обработката и математическият анализ. Получените резултати се свързват и с начина, по който самият продукт се оценява и представя. Така инженерната реализация, работата с данни и продуктовото мислене остават части от един и същ STEM процес.

Таблица 2
Последователност на проекта и възможни компетентностни направления

Етап	Дейност	Компетентностен акцент
Проблем и потребност	Проучване на пчеларския контекст	Проблемно мислене, природни науки
Конкурентен анализ	Сравнение на решения, функции и ограничения	Предприемачество, аргументация
Инженерно проектиране	Размери, чертеж, материали, товарен път	Инженерство, технологии, математика
Изработка	Рязане, пробиване, заваряване, боядисване	Практически технологични умения
Електроника и програмиране	ESP32, сензори, калибриране, комуникация	ИТ, електроника, физика
Уеб система и данни	Laravel, база, графики, експорт	Програмиране, информационни технологии
Анализ и прогноза	Въпрос, качество, модел, проверка, заключение	Математика, data literacy, изследователски умения
AI подпомагане	Обяснение на проверени резултати, Сократов диалог, изследователски въпроси и учебни задачи	Дигитална компетентност, критично мислене, работа с ИИ
Продукт и стойностно предложение	Целеви потребители, основни ползи, себестойност, ориентировъчна цена и отличителни характеристики	Предприемачество, икономическо мислене, аргументация
Маркетинг и достигане до потребителя	Представяне на продукта, реклама, комуникационни канали и достигане до крайни потребители	Маркетинг, комуникация, предприемачески компетентности

Образователният сценарий не приключва с техническото изграждане на системата или с математическия анализ на събраните данни. В последния етап се включва и маркетинговото мислене – как разработеният продукт да бъде представен, към кои потребители е насочен и по какъв начин може да достигне до тях.

По този начин RQ1 се разглежда през целия жизнен цикъл на продукта, докато RQ2 се проследява чрез последователната работа с данните, генерирани от самата система. Тази рамка позволява механичните, електронните, софтуерните и аналитичните компоненти да не се изучават като отделни дейности, а като взаимосвързани части на една автентична STEM задача [1, 3, 6, 9].

8. Контролирано AI подпомагане

Локалният AI помощник следва принципа: „BeeMon изчислява. AI избира и обяснява проверени варианти. Потребителят прави заключението“.

AI има помощна роля в BeeMon и не участва в измерванията или в математическите изчисления. Неговата задача е да представя и обяснява вече получени резултати. Ако езиковият модел не е достъпен, графиките, анализите, записването и експортът продължават да работят, защото тези функции не зависят от него. При част от действията суровите измервания изобщо не се подават към модела. По този начин аналитичната част на BeeMon остава отделена от AI слоя, който се използва само за подпомагане на интерпретацията.

По този начин RQ3 се разглежда чрез диференцирано представяне на резултатите и контролирана помощна роля на AI върху една и съща проверима аналитична основа. Теоретични разработки върху адаптивната обратна връзка и AI-подпомаганите виртуални среди също очертават потенциала на персонализираното технологично взаимодействие [7].

9. Дискусия

Резултатите показват, че BeeMon може да се използва като design-and-methodology среда, в която отделните части на проекта се проследяват в общ процес. При първия изследователски въпрос BeeMon се проследява като реален продукт – от потребността, която стои в началото, до неговата реализация и използване. Вторият въпрос е свързан с това какво се прави със събраните данни: те се подготвят, използват се за моделиране, резултатите се проверяват и едва след това се формулира заключение. Третият въпрос е насочен към представянето на вече получените резултати. Те могат да се показват с различна дълбочина, а AI се използва само като помощ при обяснението им, без да участва в изчисленията.

Полученото от анализа важи за конкретния кошер и за периода, от който са налични измерванията. Затова установените чрез корелация и регресия зависимости не могат да се приемат като доказателство за причинност. Ограничение има и при метеорологичните данни: използваните стойности са прогнози, записани към съответния момент, а не архивирани локални наблюдения за целия разглеждан период.

Прогнозният експеримент показва още един практически важен резултат. За разглеждания период baseline моделът дава по-ниска грешка от по-сложните варианти. Това означава, че моделът трябва да се проверява върху хронологично отделени test данни, а не да се приема предварително, че по-сложната архитектура непременно ще даде по-добра прогноза.

При BeeMon отделните приноси произтичат от начина, по който една реална система се използва през целия изследователски процес. IoT частта на BeeMon осигурява реалните данни за анализа. В Research Lab те преминават през подготовка, проверка и моделиране, като процесът започва от изследователския въпрос и завършва с валидиран резултат и заключение. Начинът на представяне се променя според избрания режим, но самата аналитична основа остава една и съща. AI се включва едва след приключване на анализа и служи за обяснение на получените резултати.

10. Заключение

BeeMon е пример за това как една реално работеща smart-hive система може да обедини различни STEM дейности около общ практически проблем. Разработката започва от конкретна потребност, преминава през инженерното изграждане и уеб системата и продължава с работа върху събраните данни. Към този процес се добавя и начинът, по който готовият продукт се представя и осмисля от гледна точка на неговото приложение. Така отделните дейности следват развитието на един реален продукт, вместо да бъдат разглеждани като самостоятелни задачи.

Моделът започва с конкретен проблем и необходимостта той да бъде решен. След проучване на потребността и съществуващите конкурентни решения се преминава към инженерното проектиране и изработката на системата. Следва изграждането на хардуерната част с ESP32 и сензорите, както и разработването на софтуера и базата данни. Когато системата започне да събира реални измервания, данните се визуализират и върху тях се формулира изследователски въпрос. Следват анализ, прогнозиране и проверка на получения резултат. Едва след това разработката преминава към стойностното предложение, маркетинга и крайния потребител. В тази последователност математическата прогноза не е самостоятелна крайна задача, а част от по-широк процес по създаване, проверка и представяне на реално технологично решение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Abichandani, P., Sivakumar, V., Lobo, D., Iaboni, C., Shekhar, P., Internet-of-Things Curriculum, Pedagogy, and Assessment for STEM Education: A Review of Literature. IEEE Access, 10 (2022), 38351-38369. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3164709.
[2] Atanasov, A.Z., Hristakov, I., Dochev, V., Monitoring agrometeorological factors and beehive weight during sunflower (Helianthus annuus) flowering. Engineering for Rural Development, 22 (2023). DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF011.
[3] Benita, F., Virupaksha, D., Wilhelm, E., Tunçer, B., A smart learning ecosystem design for delivering Data-driven Thinking in STEM education. Smart Learning Environments, 8 (2021), 11. DOI: 10.1186/s40561-021-00153-y.
[4] Danieli, P.P., Addeo, N.F., Lazzari, F., Manganello, F., Bovera, F., Precision Beekeeping Systems: State of the Art, Pros and Cons, and Their Application as Tools for Advancing the Beekeeping Sector. Animals, 14(1) (2024), 70. DOI: 10.3390/ani14010070.
[5] Edwards-Murphy, F., Magno, M., Whelan, P.M., b+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring. Computers and Electronics in Agriculture, 124 (2016), 211-219. DOI: 10.1016/j.compag.2016.04.008.
[6] Friedrich, A., Schreiter, S., Vogel, M., et al., What shapes statistical and data literacy research in K-12 STEM education? A systematic review of metrics and instructional strategies. International Journal of STEM Education, 11 (2024). DOI: 10.1186/s40594-024-00517-z.
[7] Gradinarov, P., Multisensory Virtual Reality and Adaptive Psychological Profiling: A Theoretical Review. Annual of Konstantin Preslavsky University of Shumen, Faculty of Mathematics and Informatics, XXVI C (2025), 3-11. DOI: 10.46687/VFBQ4177.
[8] Hadjur, H., Ammar, D., Lefèvre, L., Toward an intelligent and efficient beehive: A survey of precision beekeeping systems and services. Computers and Electronics in Agriculture, 192 (2022), 106604. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106604.
[9] Hällström, J., Norström, P., Schönborn, K., Authentic STEM education through modelling: an international Delphi study. International Journal of STEM Education, 10 (2023). DOI: 10.1186/s40594-023-00453-4.
[10] Ivanov, I.G., Повишаване дигиталните компетенции на педагогическите специалисти. Научни трудове, том XV - Колеж - Добрич (2023), 171-178. ISSN: 2367-8356.
[11] Kozhuharova, D., Zhelyazkova, M., Същност на STEM обучението. Педагогически форум, 9(3) (2021), 19-29. DOI: 10.15547/PF.2021.016.
[12] Nguyen, L.C., Hoa, H.Q., Hien, L.H.P., Integrating design thinking into STEM education: Enhancing problem-solving skills of high school students. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 21(4) (2025), em2611. DOI: 10.29333/ejmste/16084.
[13] Pavlova, N., Toncheva, M., Attitudes of Future Kindergarten Teachers towards the STEM Approach. Pedagogika-Pedagogy, 94(8) (2022), 1053-1063. DOI: 10.53656/ped2022-8.08.
[14] Šabić, J., Perković, T., Šolić, P., Šerić, L., Buzzing with Intelligence: A Systematic Review of Smart Beehive Technologies. Sensors, 25(17) (2025), 5359. DOI: 10.3390/s25175359.
[15] Seetao, C., Sukmak, P., Lohakan, M., Klinbumrung, K., The Outcome of STEM Education-Based Learning Using an Engineering Design Process with Training Packages for Industrial Internet of Things (IIoT) in Vocational Thailand. International Journal of Learning, Teaching and Educational Research, 24(4) (2025), 277-297. DOI: 10.26803/ijlter.24.4.13.
[16] Suh, H., Han, S., Promoting Sustainability in University Classrooms Using a STEM Project with Mathematical Modeling. Sustainability, 11(11) (2019), 3080. DOI: 10.3390/su11113080.

Мартин Иванов Петров
Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“
ORCID ID: 0009-0007-0340-1888
E-mail: m.petrov@shu.bg

Златина Илиева Атанасова
Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“
ORCID ID: 0009-0008-5685-9873
E-mail: zl.ilieva@shu.bg