

VÝVOJ A VALIDÁCIA BIOKLIMATOLOGICKÉHO MODELU NA PREDIKCIU VNÚTORNEJ KLÍMY VČELIEHO ÚEA

Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ – Ľubomír KORENÝ – Jaroslav VIDO – Jaroslav
ŠKVARENINA

Katedra prírodného prostredia, T. G. Masaryka 24, Technická univerzita vo Zvolene, 960 01 Zvolen, SR,
michaela.hillayova@tuzvo.sk, xkorenym@tuzvo.sk, jaroslav.vido@tuzvo.sk, jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk

ABSTRACT

Korená Hillayová M., Korený Ľ., Vido J., Škvarenina J.: Development and validation of a bioclimatological model for predicting the internal climate of a beehive

This paper presents a biometeorological analysis of the internal climate of two beehives (BH1 and BH2) using multiple linear regression. The study's objective was to model the internal temperature and humidity of the hives based on external temperature and humidity data collected during the active beekeeping season. Both the temperature and humidity models were found to be statistically significant, but they exhibited different predictive capabilities. The models for internal temperature demonstrated a low coefficient of determination ($R^2 \approx 0.20\text{--}0.22$), indicating that external weather conditions explain only a limited portion of the variability in the hives' internal temperature. This finding underscores the effectiveness of the bee colony's active thermoregulation. In contrast, the models for internal humidity showed a higher R^2 value ($R^2 \approx 0.32\text{--}0.33$), suggesting a stronger relationship between external and internal humidity levels. However, the models for humidity also had a higher Mean Absolute Error (MAE $\approx 20\text{--}23\%$) compared to the temperature models (MAE $\approx 1.2\text{ }^\circ\text{C}$). The models developed in this study successfully confirm the fundamental relationship between a beehive's internal climate and its external environment, providing an important starting point for further research. To achieve higher predictive accuracy, it will be necessary to incorporate internal variables reflecting the colony's biological activity and to collect year-round data, thereby extending their applicability to the winter period.

Key words: Bee colony, biometeorology, linear regression, microclimate, thermoregulation

ÚVOD

Bioklimatológia je dynamický vedný odbor, ktorý skúma vzájomné pôsobenie živých organizmov a klimatických faktorov na rôznych priestorových a časových škálach (MAAROUF a MUNN, 2005; CHIOU et al., 2015). Pochopenie týchto vzťahov je kľúčové nielen pre predpovedanie zmien v ekosystémoch, ale aj pre praktické aplikácie v poľnohospodárstve, lesníctve či pri ochrane biodiverzity (DAWSON et al., 2011; MORI et al., 2017). V kontexte prebiehajúcich klimatických zmien sa pozornosť upriamuje na reakcie organizmov na zmeny v ich bezprostrednom prostredí, teda na mikroklimatické podmienky (POTTER et al., 2013; PINCEBOURDE et al., 2016).

Včely medonosné (*Apis mellifera*) predstavujú jeden z najvýznamnejších bioindikátorov stavu životného prostredia, pričom ich prežitie a zdravie sú silne závislé od optimálnych mikroklimatických podmienok v ich úli (SHARIF et al., 2022; DAR et al., 2025). Úl je komplexný a termoregulačne aktívny systém, kde včelstvo dokáže aktívne regulovať teplotu a vlhkosť, aby si udržalo optimálne podmienky pre liahnutie plodu, spracovanie medu a prežitie zimného obdobia (ABOU-SHAARA et al., 2017; JARIMI et al., 2020; RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ et al., 2024). Hoci sú tieto vnútorné procesy dobre zdokumentované, stále existuje priestor pre podrobnejšie skúmanie, ako konkrétne vonkajšie klimatické podmienky ovplyvňujú schopnosť včelstva udržiavať túto stabilitu (KORENÁ HILLAYOVÁ et al., 2022). Predchádzajúce práce (napr. JONES et al., 2004; STABENTHEINER et al., 2010; OCKO a MAHADEVAN, 2014) sa zaoberali skúmaním termoregulácie včelstiev vo vnútri úľov, avšak komplexné modelovanie vzťahu medzi vonkajšími a vnútornými klimatickými dátami ostáva nedostatočne preskúmané.

Cieľom tejto štúdie je vývoj a validácia bioklimatologického modelu na predikciu vnútornej klímy včelieho úľa na základe vonkajších klimatických dát (teplota, vlhkosť). Na základe analýzy rozsiahlych časových radov vnútorných a vonkajších podmienok sa pokúsime identifikovať kľúčové faktory a zostaviť predikčný model. Následne

sa v rámci práce vykoná validácia modelu, aby sa preverila jeho schopnosť presne simulovať vnútorné podmienky v úli.

MATERIÁL A METÓDY

Charakteristika experimentálneho územia

Včelstvá sa nachádzajúna strednom Slovensku v obci Piešť II. oblasť Horná Liečna. Územie sa nachádza 48°30'31"N a 19°25'56"E v

nadmorskej výške 535 m n. m. v katastrálnom území mesta Detva. V lokalite prevláda klimageografický subtyp teplej horskej klímy. Priemerná teplota počas roka sa pohybuje cca pri 7,9 °C, priemerný ročný úhrn zrážok je cca 745 mm a priemerná ročná vlhkosť vzduchu 75,2 %. Reliéf má vrchovinový charakter. Vegetačný kryt tvoria hlavne trvalé trávnaté porasty, lúky a pasienky v menšej miere aj lesy, a to bučiny a jedľa – bučiny. V nižších častiach pohoria rastú dubiny a dubové – hrabiny (Korený 2021).

Zber dát vo vnútri úľov

Na zber bioklimatologických dát od mája do augusta 2025 vo vnútri včelieho úľa bol použitý prístroj „Srdce úľa“ (BeeHive Monitoring, Slovenská republika) (Obr. 1a), ktorý je špeciálne navrhnutý na monitorovanie včelstiev bez rušenia ich prirodzeného prostredia. Celkovo boli dáta zbierané z dvoch včelích úľov. Zariadenie s rozmermi 70 x 60 x 8 mm a hmotnosťou 30 g bolo umiestnené vo vnútri úľa, na rámiky s plodom, pričom elektronika smerovala nadol. Prístroj poskytoval údaje o teplote a vlhkosti vo vnútri úľa v 10-minútových intervaloch.

Zber meteorologických dát

Na meranie vonkajších klimatických podmienok od mája do augusta 2025 bola použitá automatická meteorologická stanica so senzorom EMS33 (EMS Brno, Česká republika), ktorá merala teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu v rovnakom období ako srdce úľa. Stanica (Obr. 1b) bola umiestnená na otvorenom priestranstve približne 10 metrov od včelích úľov. Meteorologické premenné sa merali v 10-minútových intervalov. Tento prístup bol zvolený s cieľom získať presnejšiu priemernú hodnotu teploty a minimalizovať tak vplyv mikrometeorologickej variability.

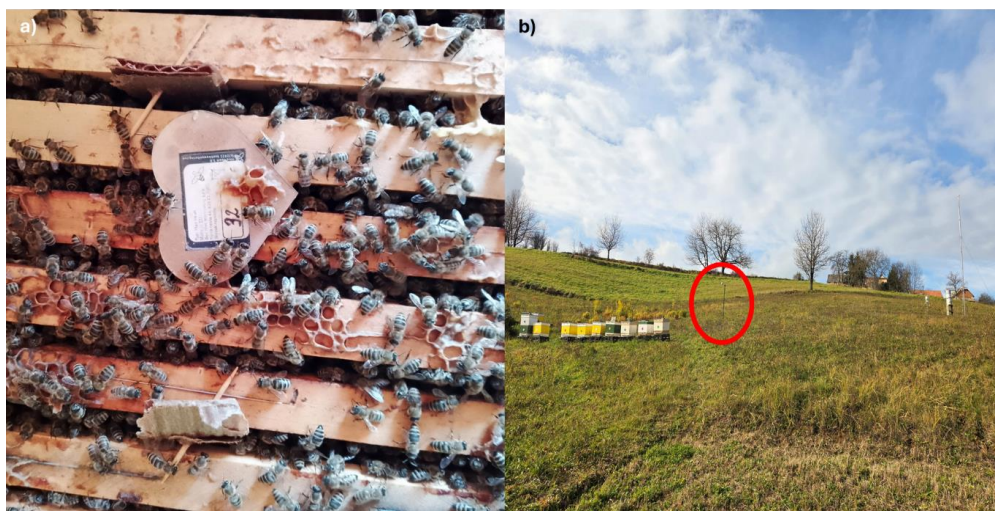
Návrh a validácia predikčného modelu

Na základe zozbieraných rozsiahlych časových radov vnútornej a vonkajšej teploty a vlhkosti z dvoch úľov bol vyvinutý bioklimatologický model na predikciu vnútorných podmienok včelieho úľa. Celkový súbor dát bol rozdelený na tréningovú sadu (80 %) a validačnú sadu (20 %).

Pred samotným modelovaním bola vykonaná deskriptívna štatistická analýza, ktorá zahŕňala výpočet priemerov, mediánov, smerodajných odchýlok, minimálnych a maximálnych nameraných hodnôt pre vnútorné a vonkajšie premenné. Na preskúmanie lineárneho vzťahu medzi premennými bola použitá korelačná analýza, ktorá potvrdila vhodnosť ďalšieho modelovania. Následne bol pre predikciu vnútornej teploty a vlhkosti úľa použitý model viacnásobnej lineárnej regresie s nasledovnou všeobecnou formou:

$$Y_{\text{pred}} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (1)$$

V tomto modeli Y_{pred} reprezentuje predikovanú hodnotu (vnútornú teplotu alebo vlhkosť), X_1 až X_n sú nezávislé premenné (vonkajšia teplota, vonkajšia vlhkosť) a β_0 až β_n sú regresné koeficienty. Tento prístup, zameraný na modelovanie mikroklimatických podmienok, je v súlade s trendmi v digitálnom včelárstve (ROBUSTILLO et al., 2022). Presnosť a výkonnosť modelu bola overená na validačnej sade dát pomocou štandardných štatistických metrík: stredná kvadratická chyba (RMSE), stredná absolútna chyba (MAE) a koeficient determinácie (R^2).



Obr. 1 Použité zariadenia na zber dát. a) „Srdce úľa“ na meranie vnútorných podmienok, b) Meteorologická stanica
Fig. 1 Equipment used for data collection. a) "Heart of the hive" for measuring internal conditions, b) Meteorological Station

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na základe zozbieraných bioklimatologických dát z dvoch včelích úľov a jednej meteorologickej stanice bola vykonaná deskriptívna štatistická analýza. Celkový dátový súbor obsahoval 36 378 jednotlivých meraní (6063 meraní teploty a 6063 meraní vlhkosti pre každý úľ a meteorologickú stanicu), ktoré boli zozbierané počas aktívnej sezóny včelstiev. Priemerná vonkajšia teplota počas sledovaného obdobia bola 10.53 °C, s výraznými výkyvmi od minima -5.85 °C po maximum 27.46 °C. Priemerná vonkajšia vlhkosť dosahovala 75.43 %, s extrémnym rozsahom od minima 18.91 % po maximum 100 %. Naopak, vnútorné prostredie úľov si udržiavalo stabilnejšiu teplotu, pričom priemerná hodnota pre Úľ₁ bola 20.81 °C a pre Úľ₂ 20.84 °C. Vnútorná teplota v Úľi 1 sa pohybovala od minima 5 °C po maximum 41.2 °C, zatiaľ čo pre Úľ₂ to bolo od 5.7 °C po 40.3 °C. Priemerná vnútorná vlhkosť pre Úľ₁ bola 43.91 % a pre Úľ₂ 46.39 %, s rozsahom od 19.6 % do 61.2 % v Úľ₁ a od 19.2 % do 64.3 % v Úľ₂. Použili sme Durbin-Watsonov test, ktorý potvrdil, že autokorelácia reziduí je nevýznamná/v prijateľnom rozsahu (DW=1,95, p>0.05).

Predikčný model pre vnútornú teplotu

Pre vnútornú teplotu v úľoch 1 a 2 boli vyvinuté modely viacnásobnej lineárnej regresie, ktoré predikujú vnútornú teplotu (Y_{pred}) na základe vonkajšej teploty ($T_{vonkajšia}$) a vonkajšej vlhkosti ($V_{vonkajšia}$). Obe dva modely boli postavené na 4 850 pozorovaniach (trénovacia sada) a sú štatisticky vysoko významné ($p < 0.001$), čo potvrdzuje, že vzťah medzi premennými nie je náhodný.

$$\text{Model pre Úľ}_1: Y_{pred} = 16.60 + 0.14 \cdot T_{vonkajšia} - 0.006 \cdot V_{vonkajšia} \quad (2)$$

$$\text{Model pre Úľ}_2: Y_{pred} = 17.21 + 0.137 \cdot T_{vonkajšia} - 0.005 \cdot V_{vonkajšia} \quad (3)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre Úľ₁ = 0.220 a pre Úľ₂ = 0.205, čo znamená, že približne 20-22 % variability vnútornej teploty je vysvetlených vonkajšími faktormi. Zvyšná variabilita je pravdepodobne spôsobená komplexnými vnútornými faktormi, ako je aktivita včelstva alebo množstvo plodu. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade a dosiahla pre Úľ₁ strednú absolútnu chybu (MAE) 1.2 °C a pre Úľ₂ MAE = 1.22 °C, čo svedčí o dobrej predikčnej schopnosti napriek nízkym hodnotám R^2 .

Koeficient pre vonkajšiu teplotu bol v oboch modeloch veľmi podobný (0.140 pre Úľ₁ a 0.137 pre Úľ₂), čo naznačuje, že s nárastom vonkajšej teploty o 1 °C sa vnútorná teplota úľa zvýši približne o 0.14 °C. Podobne aj koeficient pre vonkajšiu vlhkosť bol konzistentne negatívny, s hodnotami -0.006 a -0.005, čo môže súvisieť s termoreguláciou včelstva.

Predikčný model pre vnútornú vlhkosť

Pre vnútornú vlhkosť v úľoch 1 a 2 boli vyvinuté modely viacnásobnej lineárnej regresie, ktoré predikujú vnútornú vlhkosť (Y_{pred}) na základe vonkajšej teploty ($T_{\text{vonkajšia}}$) a vonkajšej vlhkosti ($V_{\text{vonkajšia}}$). Obe dva modely sú štatisticky vysoko významné a boli postavené na 4 850 pozorovaniach (trénovacia sada).

$$\text{Model pre } \dot{U}T_1: Y_{\text{pred}} = 25.17 + 0.78 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.14 \cdot V_{\text{vonkajšia}} \quad (4)$$

$$\text{Model pre } \dot{U}T_2: Y_{\text{pred}} = 24.31 + 0.84 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.16 \cdot V_{\text{vonkajšia}} \quad (5)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre $\dot{U}T_1 = 0.323$ a pre $\dot{U}T_2 = 0.328$, čo je výrazne vyššie ako v prípade modelov pre teplotu. To naznačuje, že vonkajšie faktory majú väčší vplyv na variabilitu vnútornej vlhkosti než teploty. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade, kde MAE pre $\dot{U}T_1$ bolo 20.08 % a pre $\dot{U}T_2 = 23.37$ %. Hoci je MAE v absolútnych číslach vysoké, modely sú silnejšie vo vysvetľovaní celkovej variability.

Koeficienty pre vonkajšiu teplotu (0.78 pre $\dot{U}T_1$ a 0.84 pre $\dot{U}T_2$) a vonkajšiu vlhkosť (0.14 a 0.16) sú v oboch úľoch pozitívne a konzistentné, čo poukazuje na silný a priamy vzťah medzi vonkajšími a vnútornými vlhkosťmi podmienkami.

Vyvinuté modely sú síce štatisticky významné, no pre dosiahnutie vyššej predikčnej presnosti je potrebné do analýzy zahrnúť aj ďalšie vnútorné premenné, ktoré odrážajú biologickú aktivitu včelstva. Tieto modely však úspešne demonštrujú základný vzťah medzi vnútornou klímou úľa a vonkajším prostredím a potvrdzujú, že včelstvá aktívne regulujú svoju vnútornú teplotu.

ZÁVER

Vo výskumnej práci sme sa venovali modelovaniu vnútornej teploty a vlhkosti v dvoch veľkých úľoch ($\dot{U}T_1$ a $\dot{U}T_2$) pomocou viacnásobnej lineárnej regresie. Modely boli postavené na základe vonkajšej teploty a vonkajšej vlhkosti. Napriek tomu, že oba modely pre teplotu boli štatisticky vysoko významné a ich koeficienty konzistentné, zistili sme, že sú schopné vysvetliť len 20-22 % variability vnútornej teploty. Naopak, modely pre vnútornú vlhkosť dosiahli vyššiu hodnotu R^2 (≈ 0.32 - 0.33), čo naznačuje, že vonkajšie podmienky majú na vnútornú vlhkosť úľa výraznejší vplyv než na teplotu. Táto relatívne nízka hodnota R^2 pre teplotu a mierne nárasty chybovosti (MAE a RMSE) potvrdzujú, že vnútorné termoregulačné a vlhkosťné procesy včelstva sú ovplyvnené aj inými, vnútornými faktormi, ktoré neboli v tejto štúdii zohľadnené.

Získané modely preto slúžia ako základný nástroj, ktorý demonštruje existenciu priameho vzťahu medzi vonkajšími a vnútornými podmienkami úľa počas aktívnej včelárskej sezóny. Pre dosiahnutie vyššej predikčnej presnosti v reálnych aplikáciách bude do budúcnosti potrebné navrhnuť komplexnejšie modely, ktoré zohľadnia aj premenné odrážajúce biologické procesy včelstva a zber dát v zimnom období.

PodĎakovanie

Autori ďakujú programu EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti pre Slovensko v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00380 (<https://enviherb.tuzvo.sk/>), a Vedeckej agentúre Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR a Slovenskej akadémie vied (VEGA) v rámci projektov VEGA 1/0443/23 a VEGA 1/0562/24.

LITERATÚRA

- ABOU-SHAARA, H. F., OWAYSS, A. A., IBRAHIM, Y. Y., & BASUNY, N. K. (2017). A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. *Insectes sociaux*, 64(4), 455-463. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0573-8>
- DAR, S. A., SAAD, M., HASAN, W., DEVI, Y. K., RIDOUANE, F. L., ALYAMMAHI, K., ... & EL-SAMAD, L. M. (2025). Solitary Bees as Vital Bioindicators: A Comprehensive Review of the Diversity, Decline, and Conservation Imperatives of the Halictidae Family. *Entomological Research*, 55(6), e70047. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70047>
- DAWSON, T. P., JACKSON, S. T., HOUSE, J. I., PRENTICE, I. C., & MACE, G. M. (2011). Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *science*, 332(6025), 53-58. DOI: 10.1126/science.1200303
- CHIOU, C. R., HSIEH, T. Y., & CHIEN, C. C. (2015). Plant bioclimatic models in climate change research. *Botanical studies*, 56(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40529-015-0104-8>
- JARIMI, H., TAPIA-BRITO, E., & RIFFAT, S. (2020). A Review on Thermoregulation Techniques in Honey Bees (Apis Mellifera) Beehive Microclimate and Its Similarities to the Heating and Cooling Management in Buildings. *Future Cities & Environment*, 6. <https://doi.org/10.5334/fce.81>

- JONES, J. C., MYERSCOUGH, M. R., GRAHAM, S., & OLDROYD, B. P. (2004). Honey bee nest thermoregulation: diversity promotes stability. *Science*, 305(5682), 402-404. DOI: [10.1126/science.1096340](https://doi.org/10.1126/science.1096340)
- KORENÁ HILLAYOVÁ, M., KORENÝ, L., & ŠKVARENINA, J. (2022). The local environmental factors impact the infestation of bee colonies by mite *Varroa destructor*. *Ecological Indicators*, 141, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109104>
- KORENÝ, L. (2021). Vplyv teploty a vlhkosti vzduchu na spád klieštika včelieho (*Varroa destructor*). Bakalárska práca. Zvolen: TU Z, 2021.
- MAAROUF, A. R., & MUNN, R. E. (2005). Bioclimatology. In *Encyclopedia of world climatology* (pp. 158-165). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_29
- MORI, A. S., LERTZMAN, K. P., & GUSTAFSSON, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- OCKO, S. A., & MAHADEVAN, L. (2014). Collective thermoregulation in bee clusters. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(91), 20131033. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1033>
- PINCEBOURDE, S., MURDOCK, C. C., VICKERS, M., & SEARS, M. W. (2016). Fine-scale microclimatic variation can shape the responses of organisms to global change in both natural and urban environments. *Integrative and Comparative Biology*, 56(1), 45-61. <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>
- POTTER, K. A., ARTHUR WOODS, H., & PINCEBOURDE, S. (2013). Microclimatic challenges in global change biology. *Global change biology*, 19(10), 2932-2939. <https://doi.org/10.1111/gcb.12257>
- ROBUSTILLO, M. C., PÉREZ, C. J., & PARRA, M. I. (2022). Predicting internal conditions of beehives using precision beekeeping. *biosystems engineering*, 221, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.006>
- RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, S., BEJAR, A. A. G., ROMO-CHACÓN, A., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ-RÍOS, H., & OROZCO-AVITIA, J. A. (2024). Hive temperature regulation by honeybees in response to extreme conditions. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i3.3082>
- SHARIF, M. Z., DI, N., & LIU, F. (2022). Monitoring honeybees (*Apis* spp.)(Hymenoptera: Apidae) in climate-smart agriculture: A review. *Applied Entomology and Zoology*, 57(4), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s13355-021-00765-3>
- STABENTHEINER, A., KOVAC, H., & BRODSCHNEIDER, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation—regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS one*, 5(1), e8967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>