

Vývoj a validácia bioklimatologického modelu na predikciu vnútornej klímy včelieho úľa

Michaela Korená Hillayová¹ – Ľubomír Korený² – Jaroslav Vido³ – Jaroslav Škvarenina⁴

^{1, 2, 3, 4} Katedra prírodného prostredia, T. G. Masaryka 24, Technická univerzita vo Zvolene, 960 01 Zvolen, SR,
[1michaela.hillayova@tuzvo.sk](mailto:michaela.hillayova@tuzvo.sk), [2xkoreny@tuzvo.sk](mailto:xkoreny@tuzvo.sk), [3jaroslav.vido@tuzvo.sk](mailto:jaroslav.vido@tuzvo.sk), [4jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk](mailto:jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk)

Abstract

This research 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 ($R^2 \approx 0.20-0.22$), 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 ($R^2 \approx 0.32-0.33$), suggesting a stronger relationship between external and internal humidity levels. However, the models for humidity also had a higher Mean Absolute Error (MAE $\approx 20-23\%$) compared to the temperature models (MAE ≈ 1.2 °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 vedný odbor, ktorý sa zaoberá vzťahmi medzi klímou a živými organizmami. Pochopenie týchto vzťahov je kľúčové pre ochranu biodiverzity a prispôbenie sa klimatickým zmenám. Včely medonosné sú ideálnym bioindikátorom stavu prostredia, pretože ich zdravie a prežitie silne závisia od optimálnych podmienok vo vnútri úľa. Včelstvo aktívne reguluje vnútornú teplotu a vlhkosť. Predošlé štúdie sa zameriavali na termoreguláciu, avšak vzťah medzi vonkajšími a vnútornými podmienkami ostáva nedostatočne preskúmaný.

Cieľom tohto výskumu je vytvoriť bioklimatologický model na predpovedanie vnútornej klímy včelieho úľa na základe vonkajších klimatických dát (teplota, vlhkosť) a overiť jeho presnosť.

Materiál a metódy

Štúdia prebiehala od mája do augusta 2025 v oblasti Javorie/Ostrôžky na strednom Slovensku (Obr. 1).

• Zber dát

Vnútorne dáta: Na meranie teploty a vlhkosti vo vnútri dvoch včelích úľov bol použitý senzor "Srdce úľa" (Obr. 2a), ktorý zaznamenával dáta každých 10 minút (6 063 meraní za sledované obdobie).

Vonkajšie dáta: Meteorologická stanica EMS33 (Obr. 2b) bola umiestnená 10 metrov od úľov a zaznamenávala vonkajšiu teplotu a relatívnu vlhkosť v rovnakých časových intervaloch (6 063 meraní za sledované obdobie).

• Návrh a validácia modelu

Model: Na predikciu vnútornej teploty a vlhkosti bol použitý model viacnásobnej lineárnej regresie.

Dáta: Celkový súbor dát bol rozdelený na tréningovú (80 %) a validačnú sadu (20 %).

Hodnotenie: Presnosť modelu bola overená na validačnej sade pomocou štatistických metrík ako RMSE, MAE a R^2 .



Obr. 2 Použité zariadenia na zber dát. a) „Srdce úľa“ na meranie vnútorných podmienok, b) Meteorologická stanica EMS Brno na meranie externých podmienok

Záver

Výskum potvrdzuje, že včelstvá aktívne regulujú svoju vnútornú teplotu, zatiaľ čo vlhkosť je výraznejšie ovplyvnená vonkajšími podmienkami. Nízka vysvetlená variabilita teplotných modelov to jednoznačne preukazuje, čo podporuje hypotézu o aktívnej termoregulácii včiel. Zistenia sú v súlade s predchádzajúcimi štúdiami a poukazujú na dôležitú adaptačnú schopnosť včelstiev. Vyvinuté modely slúžia ako základný nástroj na pochopenie vzťahu medzi úľom a prostredím. Pre vyššiu presnosť je potrebné do budúcnosti zahrnúť aj dáta odrážajúce biologickú aktivitu včelstva a zber dát v zimnom období.

Podakovanie

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.



Obr. 1 Poloha výskumnej včelnice v rámci Slovenska

Výsledky a diskusia

Počas sledovaného obdobia (máj – august 2025) boli zozbierané dáta z dvoch úľov a jednej meteorologickej stanice. Kým vonkajšia teplota kolísala od $-5,85^{\circ}\text{C}$ do $27,46^{\circ}\text{C}$ a vlhkosť od 18,91% do 100%, vnútorné prostredie úľov si udržiavalo stabilnejšiu klímu (Obr. 3). Priemerná vnútorná teplota sa pohybovala okolo $20,8^{\circ}\text{C}$ a vlhkosť medzi 44 % a 46 %.

Predikčný model pre vnútornú teplotu

Vyvinuli sme modely viacnásobnej lineárnej regresie na predikciu vnútornej teploty (Y_{pred}) na základe vonkajšej teploty ($T_{\text{vonkajšia}}$) a vonkajšej vlhkosti ($V_{\text{vonkajšia}}$):

$$\text{Model pre } \mathcal{U}1_1: Y_{\text{pred}} = 16.60 + 0.14 \cdot T_{\text{vonkajšia}} - 0.006 \cdot V_{\text{vonkajšia}}$$

$$\text{Model pre } \mathcal{U}1_2: Y_{\text{pred}} = 17.21 + 0.137 \cdot T_{\text{vonkajšia}} - 0.005 \cdot V_{\text{vonkajšia}}$$

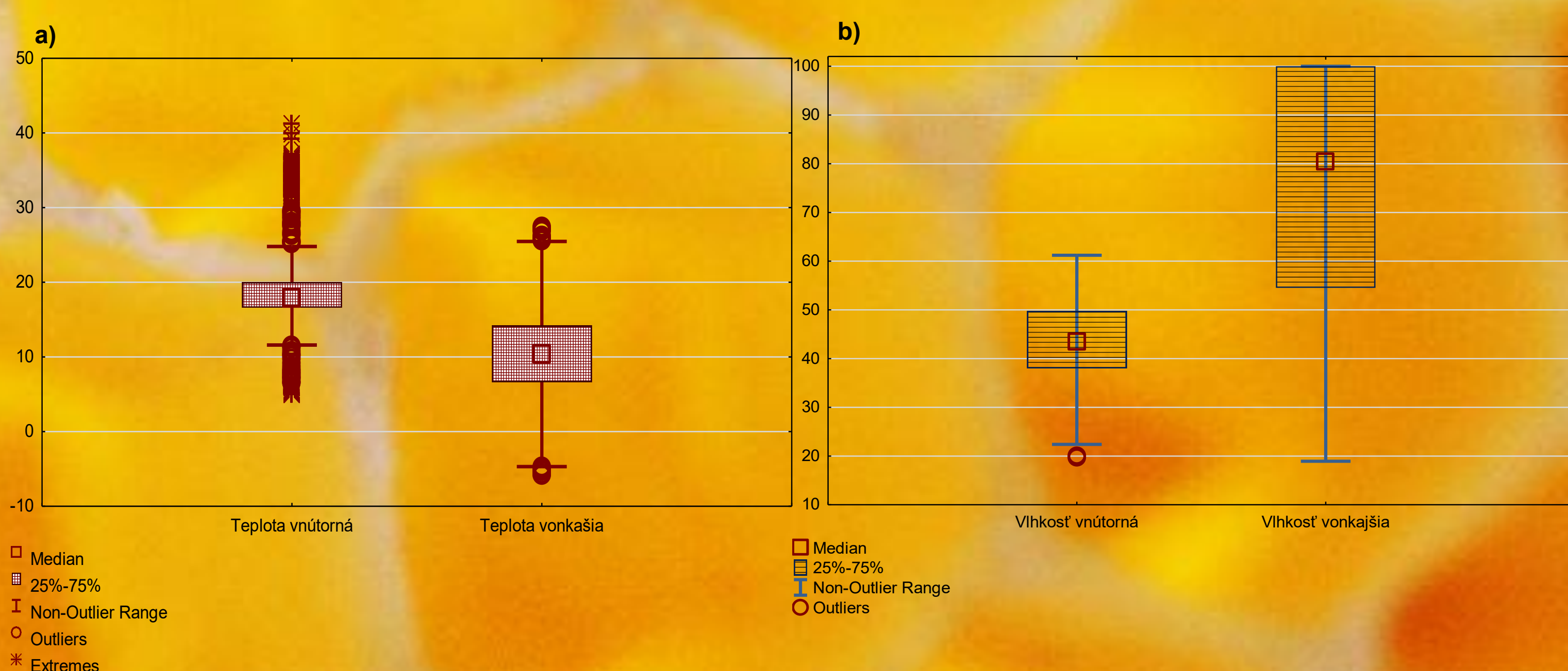
Tieto modely vysvetľujú približne 20-22 % variability vnútornej teploty, čo potvrdzuje, že včelstvo aktívne termoreguluje. S nárastom vonkajšej teploty o 1°C sa vnútorná teplota zvýši len o $0,14^{\circ}\text{C}$. Presnosť modelov je vysoká, s MAE približne $1,2^{\circ}\text{C}$.

Predikčný model pre vnútornú vlhkosť Pre vnútornú vlhkosť (Y_{pred}) sme zostavili modely s týmito rovnicami:

$$\text{Model pre } \mathcal{U}1_1: Y_{\text{pred}} = 25.17 + 0.78 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.14 \cdot V_{\text{vonkajšia}}$$

$$\text{Model pre } \mathcal{U}1_2: Y_{\text{pred}} = 24.31 + 0.84 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.16 \cdot V_{\text{vonkajšia}}$$

Tieto modely sú úspešnejšie, vysvetľujú približne 32 % variability vnútornej vlhkosti. Pozitívna korelácia poukazuje na silnejší vplyv vonkajších podmienok na vlhkosť ako na teplotu. Hoci MAE v absolútnych číslach je vyššie, modely lepšie vysvetľujú celkovú variabilitu vlhkosti.



Obr. 3 Boxploty porovnávajúce distribúciu vnútornej a vonkajšej a) teploty a b) vlhkosti