

Využití indexů stability vypočtených z modelu ALADIN pro předpověď bouřek

Storm prediction based on stability indices from the ALADIN numerical model

Martin Motl

Český hydrometeorologický ústav
Odbor distančních měření a informací
Generála Šišky 942, 143 00 Praha 4
✉ martin.motl@chmi.cz

David Rýva

Český hydrometeorologický ústav
Odbor distančních měření a informací
Generála Šišky 942, 143 00 Praha 4
✉ david.ryva@chmi.cz

In this article, we follow up on our previous work focused purely on air sounding measurements. We are now incorporating vertical profiles from forecasts and analyses of the ALADIN model operated by the Czech Hydrometeorological Institute (ČHMÚ), and comparing these with actual measured soundings at corresponding times. In our earlier studies, we explored a wide range of instability indices – from simple historical indices, through combinations of multiple indices, to more complex physically relevant variables used mainly in recent decades. For a selected set of 17 indices, we have now calculated values from both model analyses and forecasts, and compared their ability to predict thunderstorm occurrence in the selected radius of the sounding station during the afternoon and early night hours. We focused both on comparing the predictive capability itself – such as against morning and midnight soundings – and on the reliability of forecasts from different runs of the ALADIN model, starting up to 72 hours before the key noon sounding marking the beginning of the evaluated time interval.

KLÍČOVÁ SLOVA: sondáž – numerický předpovědní model počasí – aerologie – indexy stability – bouřky – předpověď

KEYWORDS: upper air sounding – numerical weather prediction model – aerology – stability indices – thunderstorm – forecast

1. Úvod

Sondážní aerologická měření jsou od jejich úplných počátků klíčovými daty pro zhodnocení stability vzduchové hmoty a umožňují objektivní posouzení rizika výskytu bouřkové činnosti ve sledované oblasti. I v současné době, kdy jsou hlavním podkladem pro předpovědi výstupy numerických předpovědních modelů počasí, představují sondáže nena- hraditelný zdroj informací. Právě sondáže slouží jednak jako jedny ze vstupních dat pro tyto modely, ale také umož- ňují sloužícím meteorologům posoudit souhlas modelové předpovědi s reálným stavem atmosféry. Pro tyto účely jsme v předešlých letech vytvořili v Odboru distančních měře- ní a informací ČHMÚ softwarový balíček v jazyku Python/ Cython (Rýva 2020), který navazuje na software pro zpra- cování sondážních dat a umožňuje data z modelu ALADIN (Brožková, 2019) pro vybrané body zobrazovat stejnou for- mou, jakou jsou zpracovávány i změřená sondážní měření z obou českých stanic, ale i z blízkých stanic v okolních ze- mích. Jde tak o další možnost, jak sledovat očekávaný vývoj labilizace atmosféry během denních hodin i jinak než jen pouhým sledováním hodnot indexů instability v mapovém zobrazení dat z modelu ALADIN.

Ačkoli je v současnosti výrazně upřednostňováno sledování fyzikálně relevantních veličin, jako je vyčíslení potenciální energie dostupné pro konvekci, pracovali jsme jak v přede- šlých dvou pracích (Rýva, Motl 2020; Motl, Rýva 2023), tak i v té stávající i s jednoduššími indexy instability používaný- mi zejména historicky v dobách před masovým rozšířením vý- početní techniky. Některé z jednodušších indexů totiž dávají srovnatelně dobré výsledky a zajímalo nás, jak si povedou při vyhodnocování dat z numerických předpovědních modelů a jak budou souhlasit jejich hodnoty v porovnání s namě- řenými sondážními daty. Tyto indexy vznikaly v období 50. až 70. let minulého století, kdy bylo potřeba rychlé vyhod- nocení naměřených sondážních dat, ale sondážní diagramy pro detailní vyhodnocení bylo ještě nutné kreslit ručně. To bylo velmi zdoluhavé zejména tehdy, kdy se takové vyhod- nocení dělalo pro vícero okolních stanic, což bylo pro spo- lehlivou předpověď často nutností. Počítače byly tehdy stále velká a těžkopádná zařízení, která nebylo možné provozovat všude, a tak nebylo možné počítat a zobrazovat operativně dnes naprosto samozřejmé parametry založené na numerické integraci hodnot ze stovek nebo i tisíců vertikálních hladin ze sondážního měření, ačkoliv byly tyto veličiny již tehdy dobře známe (např. Chromov 1937; Byers, Braham 1949). Zjednodušené indexy, které šlo vypočítat za pomoci jedno-

duchých vstupních hodnot a tabulek, tak byly pomůckou pro požadované zrychlené vyhodnocení (např. Táborský 1966, Strachota 1966). Zvláštním případem pak byla práce českého meteorologa Jiřího Förichtgotta (např. Förichtgott 1971; Förichtgott 1975), která kombinovala oba přístupy. Zjednodušení vyhodnocení dat nebylo až tak velké jako u ostatních indexů, protože autor porovnával teploty vystupující částice s teplotou okolního vzduchu ve 4 hladinách. Absence výpočetní techniky byla řešena vytvořením vlastní výpočetní pomůcky v podobě specializovaného logaritmického pravítka se 4 posuvníky. To umožnilo zachovat rychlé vyhodnocení, sledovat rozložení instability v různých výškách troposféry a přitom stále v rozumném čase vyhodnotit data z vícero okolních stanic, což bylo žádoucí pro komplexní předpovědi.

V tomto článku se zaměřujeme na vyhodnocení přínosu předpovědních vertikálních profilů. Porovnáváme úspěšnost předpovědi na základě sondážních dat nejen z poledního, ale i z ranního (jen pro Prahu-Libuš) a půlnočního termínu daného dne a ty dále srovnáváme i s profily modelových analýz a různých modelových běhů až 72 hodin dopředu. V těchto srovnáních sledujeme, jak se mění úspěšnost předpovědi s tím, jak se přibližuje čas, na který je předpověď počítána. Zaměřili jsme se rovněž na možnost využití vybraných indexů pro pravděpodobnostní předpověď bouřek na základě dostupných dat z modelové předpovědi. Pro účely tohoto srovnání jsme použili data za roky 2021–2025, ze kterých máme modelová data k dispozici v požadovaném formátu vertikálních profilů. Jde sice o krátkou dobu pouhých 5 let, ale i tak lze z těchto dat získat množství velmi cenných poznatků a zajímavých zjištění. Tato studie je součástí výzkumného programu Dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace (DKRVO), na jehož řešení se podílí i naše pracoviště.

2. Zahrnuté indexy a veličiny

Na základě předešlých prací jsme vybrali 17 indexů, které se pro účely této studie jeví jako nejvhodnější. Ve vyhodnocení jsme opět ponechali i některé starší jednoduché indexy stability, u kterých máme z minulých prací ověřené, že jsou dobrým prediktorem bouřkové činnosti. Jejich výpočet je realizovaný na základě jednoduchých součtů a rozdílů teplot a rosných bodů ve dvou nebo třech význačných hladinách. Takto je počítaný například klasický K index (George 1960), který používáme jen jako pomocnou veličinu:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (1),$$

kde T jsou teploty příslušných výškových hladin a T_d teploty rosných bodů v oněch hladinách.

U dalších indexů je výpočet složitější a je nutné počítat pseudoadiabatický výstup vzduchové částice ze zvolené hladiny (zemský povrch, průměr hodnot vrstvy o zvolené vertikální mocnosti od povrchu apod.) do hladiny 500 hPa a zde jen porovnat výslednou teplotu s teplotou okolního vzduchu v této hladině. Asi nejznámějším takovým indexem je Lifted index (LI) (Galway 1956)

$$LI = T_{500} - T_{BEG \rightarrow 500} \quad (2),$$

kde $T_{BEG \rightarrow 500}$ je teplota vzduchové částice pseudoadiabaticky vystoupané z počáteční hladiny do 500 hPa.

V naší práci používáme zejména Most unstable (MU) Lifted index, kdy počáteční hladinou je hladina s maximální hodnotou ekvivalentní potenciální teploty ve spodních 300 hPa od povrchu. Právě z rozdílu předešlých zmíněných indexů pak dostáváme hodnotu Thompsonova indexu (TI)

$$TI = KI - MULI \quad (3).$$

Jde o dříve poměrně často užívaný index v Evropě i Severní Americe. Jeho velkou slabinou jsou zejména situace s výrazně suchou a vertikálně mohutnou mezní vrstvou.

Úplně samostatnou kategorií jsou pak různé modifikace CAPE (z angl. Convective Available Potential Energy, viz. např. Chrosov 1937; Sulan 2004; Markovsky, Richardson 2010) tedy potenciální dostupné energie pro rozvoj konvekce, jejíž výpočet je integrálem vztlakové síly působící na částici vzduchu stoupající z výchozí hladiny. Nejlepší úspěšnost při předpovědi bouřek vykazuje varianta Most unstable (MU) CAPE, kdy výstup vzduchové částice začíná z hladiny s maximální hodnotou ekvivalentní potenciální teploty

$$CAPE = \int_{LFC}^{EQL} g(z) \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz \quad (4).$$

kde T je teplota stoupající vzduchové částice z počáteční hladiny a T_e je teplota okolí částice vždy v dané hladině, LFC je hladina volné konvekce a EQL představuje hladinu nulového vztlaku. Teploty v tomto vzorci jsou, na rozdíl od ostatních, zadávány v Kelvinech. Pro srovnání dále počítáme i modifikace Surface based (SB), kdy počítáme s výstupem od povrchu, dále pak Mixed layer 50 hPa (ML), kdy nejprve simulujeme promíchání spodních 50 hPa, a teprve takto vzniklou vzduchovou částici necháme stoupat a nakonec i Surface max. temp (SM), která počítá s maximální odpolední teplotou předpovězenou ze sondáže s tím, že dojde ke konvektivnímu promíchání mezní vrstvy, a tak i změně rosného bodu. Prediktory jako CAPE jsou dnes výrazně upřednostňovány před jednoduchými indexy, protože jde o fyzikálně relevantní veličiny a nikoli jen zjednodušené indexy. Při výpočtu CAPE jsou rovněž počítány hodnoty dalších pomocných veličin, a to výška kondenzační hladiny (LCL), hladiny volné konvekce (LFC) a hladiny nulového vztlaku (EQL) neboli ekvilibria. Pro nás nejzajímavější z těchto veličin je výška hladiny nulového vztlaku (EQLH), kde dochází k vyrovnání teplot vystupující vzduchové částice a okolního vzduchu. Nad touto výškou je vzduchová částice už zpomalována negativním vztlakem. Stejně tak jsou u všech modifikací počítány hodnoty CAPE_f, tedy CAPE se započtením vlivu skupenského tepla tuhnutí na pseudoadiabatický výstup (Yaodong et al. 2004), které je obvykle ve výpočtech nasycené adiabaty ignorováno.

Samostatně je pak počítána skupina indexů Förichtgottovy 4vrstvé metody, ze které ale využíváme v této práci jen index i2, který je vlastně jen opačnou hodnotou Lifted indexu pro Förichtgottovu modifikaci výstupu, proto je v textu vyhodnocován ve skupině LI indexů a označován též jako FGT LI. Pro Förichtgottovu modifikaci výstupu oproti původní verzi autora počítáme také hodnoty CAPE_f a výšku EQLH. Jako

počáteční výška nasyceného pseudoadiabatického výstupu je zvolena hladina 850 hPa s tím, že se předpokládá, že jde zároveň o výšku výstupné kondenzační hladiny, tedy platí $T = T_d$. To, že se kondenzační hladina shoduje s hladinou 850 hPa se ale reálně stane málokdy. Je tedy nutné dopočítat fiktivní počáteční teplotu v této hladině. Tuto teplotu označuje autor jako tzv. „opravenou teplotu“ v 850 hPa a počítáme ji na základě změřeného rosného bodu u zemského povrchu a změřené reálné teploty v 850 hPa. Na její hodnotu má vliv i to, jak moc je kondenzační hladina níž nebo výš než hladina 850 hPa.

Posledními indexy, se kterými pracujeme, jsou tzv. Lapse rates, tedy průměrné hodnoty vertikálního teplotního gradientu mezi dvěma vybranými výškovými hladinami. Různé indexy využívají různé hladiny většinou mezi 850 a 500 hPa (viz například K index), nám se však nejlépe osvědčila hodnota Lapse rate mezi 800 a 600 hPa. Ta v kombinaci s výše zmíněným Thompsonovým indexem dávala statisticky nejlepší výsledky pro předpověď bouřek z polední sondáže pro období 12:00–23:59 UTC.

Mimo indexů stability jsme se zaměřili také na srovnání přízemní teploty T_{sfc} a teploty rosného bodu T_{dsfc} ze sondážních měření a z modelových předpovědních výstupů. Mnohé modely totiž mají problémy s přesnou předpovědí hodnot rosných bodů, na kterých velmi výrazně závisí instabilita prostředí. U modelu ALADIN jde na základě zkušeností předpovědní služby ČHMÚ většinou o nadhodnocování rosných bodů. To pak ve výsledku vede i k nadhodnocování podmínek pro tvorbu konvektivních bouří a jejich intenzivních projevů.

3. Data a metody vyhodnocení

Výše popsané indexy jsme napočítali shodně jako v předešlé práci, tedy pro celé období teplých půlroků (duben–září), ale tentokrát jen pro roky 2021 až 2025. Výpočet byl provedený zvlášť pro Prahu-Libuš i pro Prostějov a odděleně se počítalo s daty ze sondáží a s daty z modelu ALADIN.

Jako vstupní data jsme použili ASCII soubory sondážních dat s plným počtem měřených hladin od povrchu po hladinu, kde došlo k prasknutí balónu, ale reálně jsme využili data pouze do hladiny 100 hPa. Obdobně jsme přistupovali i k modelovým vertikálním profilům (obvykle 77 hladin od povrchu do hladiny 100 hPa).

Pro stejné období jsme zpracovali i data z TDOA (time difference of arrival) sítě detekce blesků LINET, která jsou zdrojem bleskových dat používaných operativně v ČHMÚ. Tato data máme k dispozici v podobě SQLite databázových souborů s uvedenou lokalizací, přesným časem výskytu výboje, ale i informacemi o polaritě a typu výboje (mezioblačný vs. výboj mezi oblakem a zemí). Souřadnice místa výboje byly přepočteny do gnomónické projekce PACZ23 využívané v ČHMÚ i pro zobrazení radarových dat s rozlišením 1 km/px. Na základě předchozích interních zjištění jsme v každém pixelu mapy považovali za den s bouřkou tu situaci, kdy v okruhu do 15 km došlo k alespoň dvěma výbojům blesku do země. Takový odhad výskytu bouřky dle předešlých zjištění nejlépe koresponduje s pozorováními z profesionálních meteorologických stanic. Pro každý termín jsme tak měli k dispozici datový soubor s dvourozměrným polem informací typu bouřka vs. bez bouřky s rozlišením 1 km.

3.1 Prostorová a časová reprezentativnost sondáží a modelových profilů

S ohledem na četnost sondáží a vzdálenosti sondážních stanic ve střední Evropě jsme zvolili jako reprezentativní okolí stanice do 150 km. Při určení poloměru reprezentativního okolí jsme vycházeli také z prací na obdobné téma (Púčik et al. 2015; Doswell, Evans 2003), zároveň alespoň v případě Prahy dobře odpovídá rozměrům české kotliny. Co se časové reprezentativnosti týče, zabývali jsme se v této práci schopností predikce bouřek na časové rozmezí 12:00–23:59 UTC. Vzhledem k tomu, že sondáž 00:00 UTC slouží často i jako podklad pro předpověď na celý následující den, sledovali jsme i její vztah k bouřkám v čase 12:00–23:59 UTC a pro Prahu-Libuš jsme opět přidali i sondáž z 06:00 UTC. Také u tohoto termínu jsme zjišťovali jeho schopnost předpovědět bouřky odpoledne nebo večer, tj. opět na interval 12:00–23:59 UTC. Pro porovnání byla sledována i schopnost sondáže ve 12:00 UTC předpovídat bouřky v intervalu 12:00–23:59 UTC následujícího dne. Ke spočítaným indexům z každé zpracované sondáže tak přibyla informace o procentech plochy TS_{perc} s bouřkou v okruhu do 150 km kolem sondážní stanice ve sledovaném časovém rozmezí.

Tab. 1 Předstih, s jakým jsou k dispozici použítá data vzhledem ke sledovanému termínu 12:00 UTC, jejich původ a označení v textu.

Table 1. Advance time with which the data used are available in relation to the monitored time of 12:00 UTC, their origin, and designation in the text.

Data k dispozici vzhledem k termínu	Zdroj	Délka předpovědi	Označení v textu
t-69	Předpověď ALADIN	72	ALADIN+72
t-57	Předpověď ALADIN	60	ALADIN+60
t-51	Předpověď ALADIN	54	ALADIN+54
t-45	Předpověď ALADIN	48	ALADIN+48
t-39	Předpověď ALADIN	42	ALADIN+42
t-33	Předpověď ALADIN	36	ALADIN+36
t-27	Předpověď ALADIN	30	ALADIN+30
t-21	Předpověď ALADIN	24	ALADIN+24
t-15	Předpověď ALADIN	18	ALADIN+18
t-12	Sondáž	–	Sondáž 00
t-9	Předpověď ALADIN	12	ALADIN+12
t-6	Sondáž (jen Praha)	–	Sondáž 06
t-3	Předpověď ALADIN	6	ALADIN+06
t-0	Sondáž	–	Sondáž 12
t+0,5	Analýza ALADIN	–	ALADIN+00

Aby byly výsledky dobře porovnatelné, k profilovým datům modelu ALADIN bylo přistoupeno analogicky. Použity byly vertikální profily v uzlových bodech nejbližších stanicím Praha-Libuš a Prostějov. Zpracovány byly analýzy modelu ALADIN pro 12:00 UTC (analýzy vytváří model každou hodinu cca 30 minut po termínu) a předpovědi pro 12:00 UTC s délkou +06, +12, ... +60 a +72 h. Vynechána je pouze délka +66 h, která by odpovídala běhu z 18:00 UTC před třemi dny, protože model ALADIN do roku 2024 v tomto termínu počítal pouze předpovědi do délky +54 h. Předpovědní profily modelu ALADIN jsou k dispozici obvykle cca 3 h po termínu začátku běhu. Použitá data jsou pro přehlednost znázorněna v následující tabulce, seřazena podle času, kdy jsou k dispozici.

V meteorologických předpovědích jsou pro prostorový rozsah výskytu jevu používány pojmy „ojediněle“ v případě, že se jev vyskytuje na 5–29,9 % území a „místy“ v případě výskytu jevu na 30–49,9 % území. Proto bylo dále pracováno s hranicemi $TS_{perc} \geq 5\%$ a $TS_{perc} \geq 30\%$ pro alespoň ojedinělý, respektive místní výskyt bouřek.

3.2 Použité statistické metody vyhodnocení efektivity předpovědi bouřek

True Skill Score

TSS je metrika, pomocí níž lze vyhodnocovat kvalitu binární předpovědi. Binární předpověď má 4 základní stavy:

- a* – jev byl předpovězen a nastal,
- b* – jev byl předpovězen, ale nenastal,
- c* – jev nebyl předpovězen, ale přesto nastal,
- d* – jev nebyl předpovězen a nenastal.

Je zřejmé, že snaha předpovědi je minimalizovat skupiny *b* a *c*. Pro kvantifikaci úspěšnosti předpovědi bylo zvoleno True skill score (TSS), často využívané pro nebezpečné jevy, definované jako:

$$TSS = POD - PFOD \quad (5),$$

kde POD (probability of detection) je pravděpodobnost, že byl jev předpovězen:

$$POD = a/(a+c) \quad (6)$$

a PFOD (probability of false detection) je pravděpodobnost falešné detekce:

$$PFOD = b/(b+d) \quad (7).$$

Tedy na základě hodnoty indexu stability určujeme, zda bouřky v časovém rozmezí 12:00–23:59 UTC zasáhly alespoň 5 %, resp. 30 % sledovaného území. Pro toto rozhodnutí je vždy nutno určit prahovou hodnotu indexu – při jejím překročení je předpověď na výskyt jevu, při nedosažení je předpověď, že se jev nevyskytne. Vždy je hledána taková prahová hodnota indexu, aby byla TSS maximální.

Brier Skill Score (BSS)

Kromě výpočtu prahových hodnot indexů, které určují binární předpověď, zda bude/nebude bouřka, se lze na celou problematiku dívat také z pravděpodobnostního hlediska. Tedy, že dané hodnotě indexu odpovídá určitá pravděpodobnost vzniku bouřek daného rozsahu.

Prvním krokem tohoto přístupu je vyjádřit pravděpodobnost vhodným výpočtem z hodnoty indexu. Při hledání vhodné funkce vyjadřující tuto pravděpodobnost byly stanoveny následující požadavky:

- funkce je monotónní. Předpokládáme, že s růstem indexu roste pravděpodobnost bouřek (v případě řístí indexů klesá) a funkce nemá lokální maxima či minima, což odpovídá známému chování zkoumaných indexů
- funkce je pro velmi nízké a velmi vysoké hodnoty indexu konstantní. To zajistí, že výsledná pravděpodobnost nebude nikdy méně než 0 % nebo více než 100 %.
- funkce je spojitá v celém oboru reálných čísel
- v nekonstantní části funkce se jedná o polynom 2. řádu. Tato podmínka byla stanovena z důvodu možnosti strojového hledání optimální proložené funkce.

Přínos takovéto předpovědi závisí jednak na tom, do jaké míry vypočtená pravděpodobnost odpovídá realitě, ale také na tom, s jakou četností vyjádřená pravděpodobnost dosahuje dostatečně nízkých nebo vysokých hodnot – např. vyjdeme-li z dlouhodobých dat, alespoň ojedinělé bouřky jsou v teplé polovině roku ve sledované oblasti okolo Prahy v 36 % dnů (klimatologická předpověď). Pokud bychom ale každý den předpovídali bouřky s pravděpodobností 36 %, bude to sice pravda, ale moc přínosné to nebude. Naopak druhý extrém je, že by předpověď udávala vždy správně pravděpodobnost bouřek buď 0 %, nebo 100 %.

Pro kvantifikaci těchto pravděpodobnostních předpovědí bylo použito Brier Skill Score (BSS):

$$BSS = 1 - \frac{N \sum (p_k - o_k)^2}{(\sum_{k=1}^N o_k)(N - \sum_{k=1}^N o_k)} \quad (8),$$

kde p_k jsou vypočtené pravděpodobnosti výskytu jevu pro jednotlivé případy, o_k jsou pozorované výskyty jevu, nabývající hodnot {0,1}.

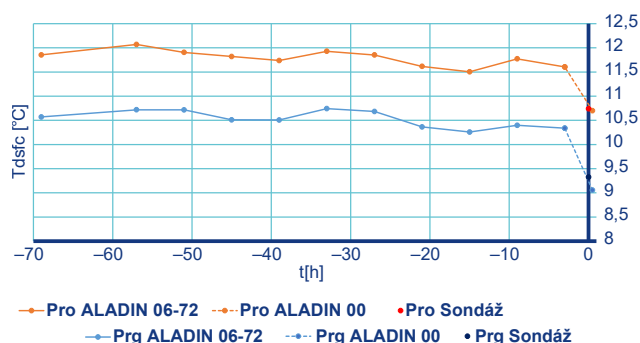
BSS nabývá hodnoty 0 pro klimatologickou předpověď a hodnoty 1 pro dokonalou binární předpověď, tedy čím vyšší má hodnotu, tím lepší je pravděpodobnostní předpověď (Stull 2015).

4. Výsledky

4.1 Hodnoty indexů vypočtených z modelu ALADIN a sondáží

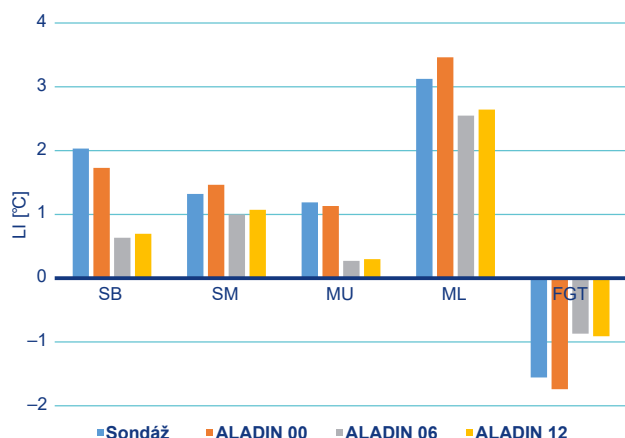
Ve sledovaném období byla průměrná přízemní teplota ze sondáží na stanici Praha-Libuš v termínu 12:00 UTC 20,2 °C, zatímco jak analýza, tak předpovědi byly teplejší – pohybovaly se v intervalu 21,0–21,4 °C.

Rozdíl je způsoben dvěma faktory: Jelikož polední termín sondáže zpravidla startuje již v 11:15 UTC, aby při délce vzestupné části letu cca 90 minut střed měření co nejlépe odpovídal



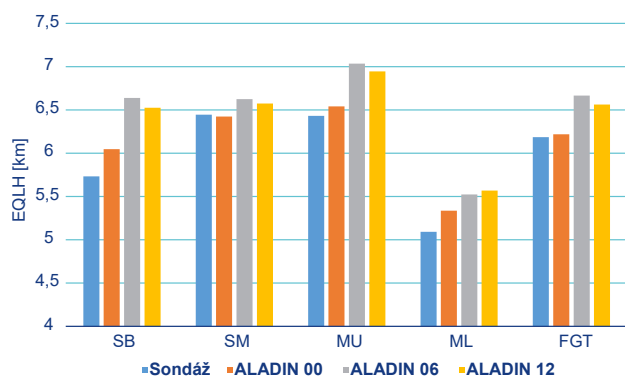
Obr. 1 *Tdsfc* ze sondáže, analýzy a předpovědi modelu ALADIN podle času, kdy je tento údaj změřen či spočítán.

Fig. 1. *Tdsfc* from sounding, analysis, and ALADIN model forecasts according to the time when this input is measured or calculated.



Obr. 2 Průměrné hodnoty různých variant *LI* pro stanici Praha-Libuš ze sondáže, analýzy ALADIN a předpovědi ALADIN délky 06 a 12 h.

Fig. 2. Average values of different *LI* variants for the Prague-Libuš station from the sounding, ALADIN analysis, and ALADIN forecasts for 6 and 12 hours.



Obr. 3 Průměrné hodnoty různých variant *EQLH* pro stanici Praha-Libuš ze sondáže, analýzy ALADIN a předpovědi ALADIN délky 06 a 12 h.

Fig. 3. Average values of different *EQLH* variants for the Prague-Libuš station from the sounding, ALADIN analysis, and ALADIN forecasts for 6 and 12 hours.

termínu 12:00 UTC, je v důsledku denního chodu teploty přízemní teplota nižší cca o 0,4 °C. Druhým faktorem je nadmořská výška, kdy stanice Praha-Libuš je 304 m n. m., zatímco nejbližší uzlový bod modelu ALADIN má přiřazenou nadmořskou výšku 270 m n. m. Tento posun způsobuje u *Tsfc* dalších cca 0,5 °C. Po započtení těchto dvou faktorů je shoda modelu a sondážních dat pro *Tsfc* velmi dobrá.

Výška uzlového bodu modelu ALADIN v Prostějově se liší o pouhý metr oproti stanici, tomu odpovídá i shoda povrchových teplot – ze sondážních dat 21,1 °C, modelová data dávají průměry v intervalu 21,1–21,4 °C.

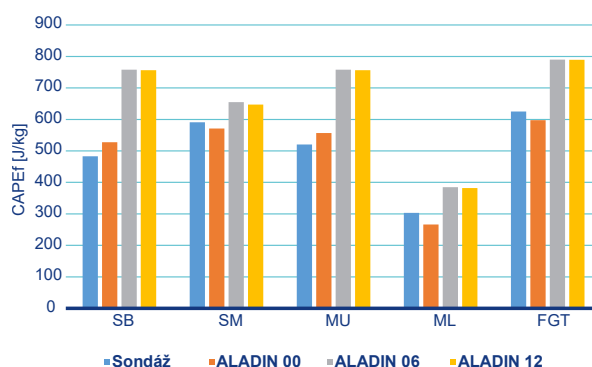
Totéž však nelze říct o *Tdsfc*, kde mají tyto opravy velmi malý vliv. Jak lze vidět na obr. 1, *Tdsfc* analýzy je v poměrně dobré shodě, zatímco předpovědi do délky 24 h nadhodnocují *Tdsfc* cca o 1 °C, delší předpovědi ještě cca o 0,3 °C více. Z toho vyplývá, že přízemní modelové vrstvy jsou oproti sondáži o něco vlhčí.

Porovnání průměrných hodnot vypočtených indexů je na obr. 2–4 pro jednotlivé skupiny indexů. Zobrazeny jsou pouze pro sondáž, analýzu a nejkratší dvě délky předpovědi na stanici Praha-Libuš. Pro delší předpovědi a stanici Prostějov je chování obdobné.

Obecně lze vidět velmi dobrou shodu průměrných hodnot analýzy ALADIN 00 s pozorováním a systematický posun u obou zobrazených termínů předpovědi (ALADIN 06 a ALADIN 12). U předpovědi dochází k posunu *EQLH* výše, snížení *LI* (resp. zvýšení *FGT LI*) a zvýšení *CAPEf*. Všechny tyto systematické změny odpovídají nadhodnocení instability atmosféry předpovědním modelem. Co se týče způsobu výpočtu indexů, největší rozdíly jsou patrné u výpočtu *SB* a *MU*.

Systematický posun průměrných hodnot vypočtených indexů ale ještě neznamená, že jejich schopnost předpovídat bouřky bude snížena. Nicméně při využití vypočtených indexů v předpovědní praxi je třeba brát na tento posun zřetel. Lze také očekávat posun optimálních prahových hodnot z hlediska dosažení maximálního TSS.

Obr. 5 pak zobrazuje korelační koeficienty vypočtených hodnot z jednotlivých běhů modelu a sondáží z odpovídajícího termínu. Z obrázku je vidět, že všechny sledované indexy mají korelační koeficient vyšší než 0,85, tedy jsou ve velmi dobré shodě s indexy vypočtenými ze sondážního měření. Zejména



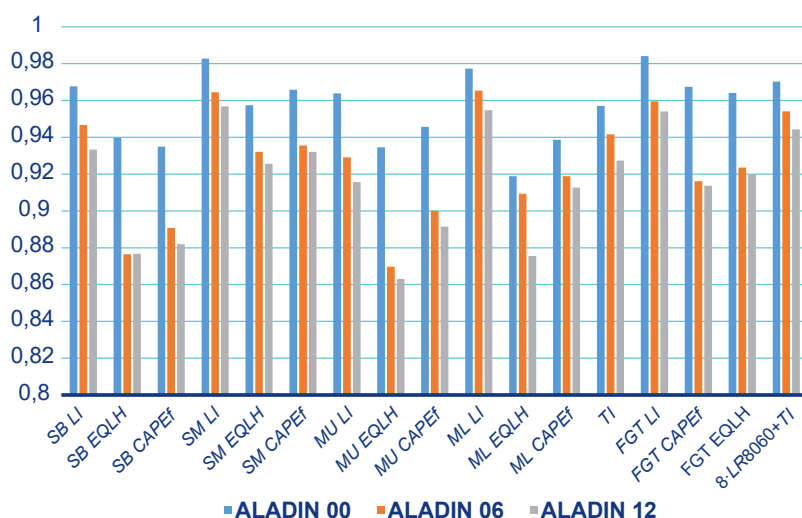
Obr. 4 Průměrné hodnoty různých variant *CAPEf* pro stanici Praha-Libuš ze sondáže, analýzy ALADIN a předpovědi ALADIN délky 06 a 12 h.

Fig. 4. Average values of different *CAPEf* variants for the Prague-Libuš station from the sounding, ALADIN analysis, and ALADIN forecasts for 6 and 12 hours.

u předpovědi je ale znát, že z vybraných indexů jsou korelace *EQLH* přece jen o něco nižší, nejlepší shodu pak vykazují různé varianty *LI*. Z hlediska způsobu výpočtu za ostatními mírně zaostávají *MU* a *SB*.

4.2 Vypočtené maximální TSS z modelu ALADIN

Pro 17 sledovaných indexů byly spočteny optimální prahové hodnoty a jim odpovídající maximální TSS.



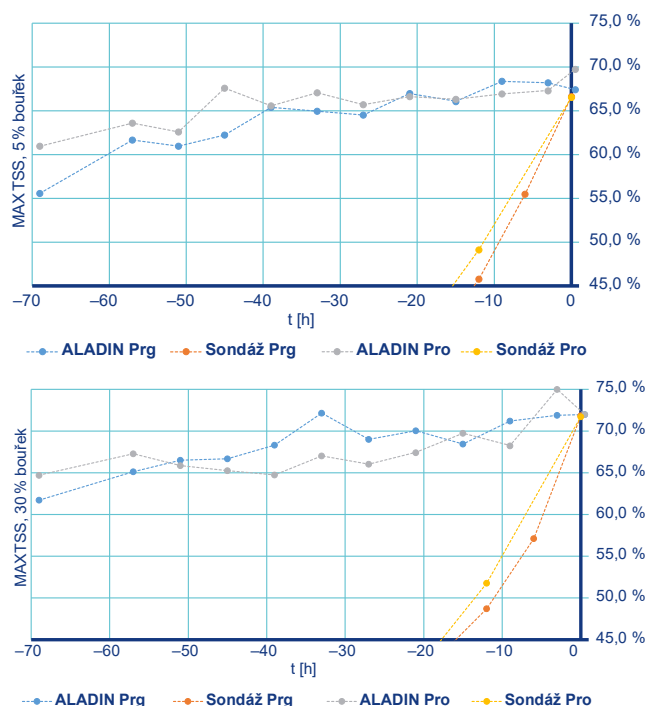
Obr. 5 Pearsonův korelační koeficient vypočtený ze sondáže a jednotlivých sad dat modelu ALADIN.

Fig. 5. Pearson's correlation coefficient calculated from the sounding and individual data sets of the ALADIN model.

Z obr. 6–9 je patrný poměrně očekávatelný postupný pokles schopnosti předpovídat bouřky s prodlužující se délkou předpovědi, a to jak pro nejlepší index, tak pro průměr přes všech 17 sledovaných indexů. Pokles není monotónní, což je s největší pravděpodobností dáno náhodnými fluktuacemi při relativně krátké časové řadě.

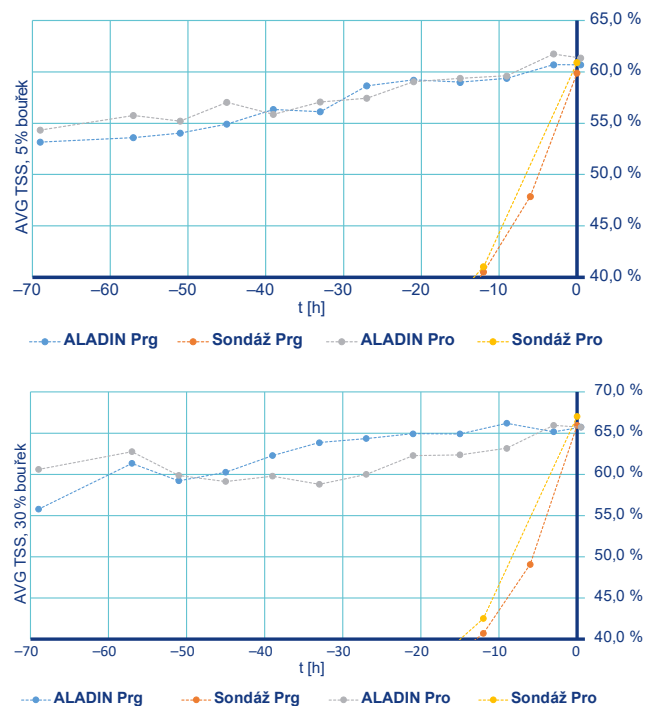
Další informací, kterou lze z obr. 6–9 vyčíst, je, že nejen data z analýzy termínu 12 h (která jsou k dispozici krátce po měření), ale i data z ranního běhu modelu, jsou co do schopnosti předpovídat bouřky pomocí prahových hodnot indexů srovnatelná s měřením samotným. Dále potom všechny delší předpovědi, a to až do maximální délky +72 h mají lepší schopnost předpovědi odpoledních bouřek, než ranní či půlnoční sondáž příslušného dne. Sondáž z poledne dne předchozího, která je mimo zobrazovanou oblast grafů, pak má předpovědní schopnosti ještě podstatně nižší. Dosahuje TSS okolo 30 %, nejlepší index pro $TS_{perc} \geq 30\%$ se pro Prahu i Prostějov blíží 38 %.

Obr. 10 nabízí detailnější pohled na jednotlivé indexy – průměrné hodnoty TSS přes všechny délky předpovědi. Je vidět, že kombinace 8-LR8060+TI si udržuje před samostatnými indexy výhodu



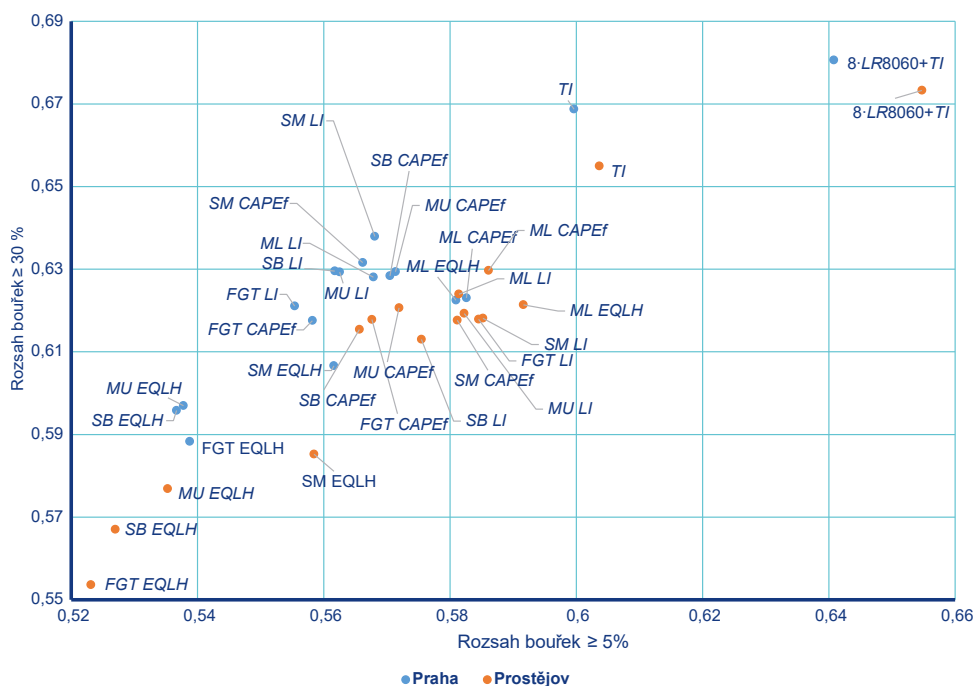
Obr. 6–7 Nejvyšší dosažené TSS v závislosti na zdrojových datech a čase, kdy jsou tato data k dispozici pro vznik bouřek alespoň ojediněle (obr. 6) a alespoň místy (obr. 7).

Fig. 6–7. Highest TSS achieved depending on source data and the time when this data is available for the occurrence of storms at least isolated (Fig. 6) and at least locally (Fig. 7).



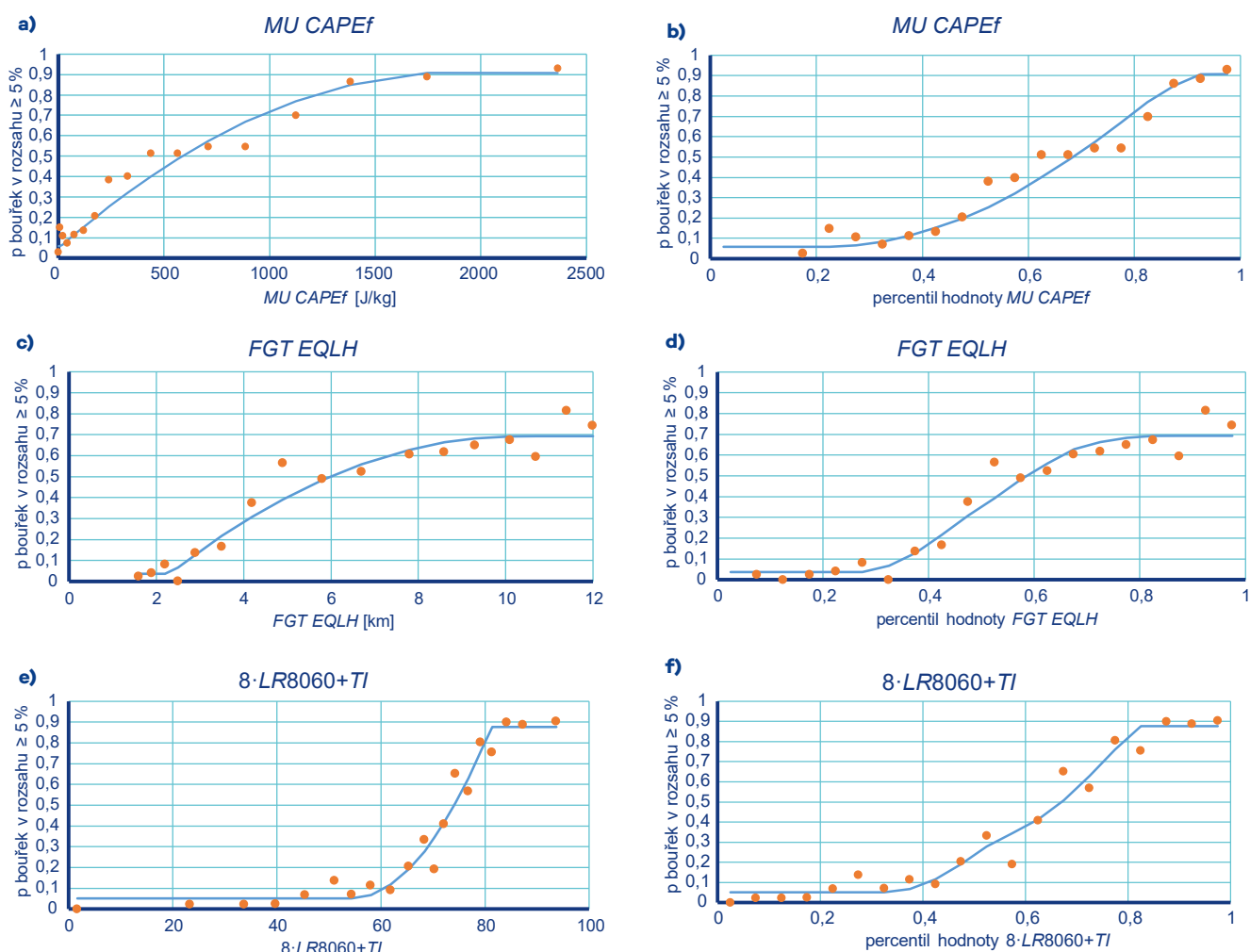
Obr. 8–9 Průměrné dosažené TSS pro 17 sledovaných indexů v závislosti na zdrojových datech a čase, kdy jsou tato data k dispozici pro vznik bouřek alespoň ojediněle (obr. 8) a alespoň místy (obr. 9).

Fig. 8–9. Average TSS achieved for 17 monitored indices depending on source data and the time when this data is available for the occurrence of storms at least isolated (Fig. 8) and at least locally (Fig. 9).



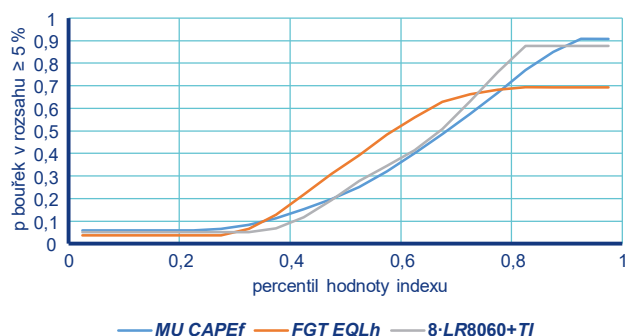
Obr. 10 Průměrná hodnota TSS jednotlivých indexů spočtená přes všechny předpovědní běhy modelu ALADIN (ALADIN 06-72).

Fig. 10. Average TSS value of individual indices calculated across all ALADIN model forecast runs (ALADIN 06-72).



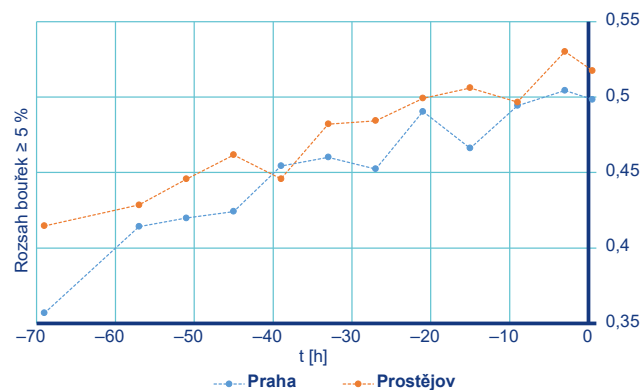
Obr. 11 Vždy první z dvojice grafů (11a, 11c, 11e) zobrazuje závislost pravděpodobnosti vzniku alespoň ojedinělých bouřek pro stanici Praha (svislá osa) na hodnotě indexu – průměr pro kvantily šířky 0,05 (hnědé tečky) a proložená křivka reprezentující tuto závislost. Druhý z každé dvojice grafů (11b, 11d, 11f) zobrazuje stejné veličiny, ale na ose x je kvantil hodnot indexu.

Fig. 11. The first of two charts (11a, 11c, 11e) shows the relation of the probability of at least isolated storms for the Prague station (vertical axis) to the index value – the average for quantiles of width 0.05 (brown dots) and a fitted curve representing this interrelation. The second of each pair of charts (11b, 11d, 11f) shows the same variables, but the x-axis shows the quantile of the index value.



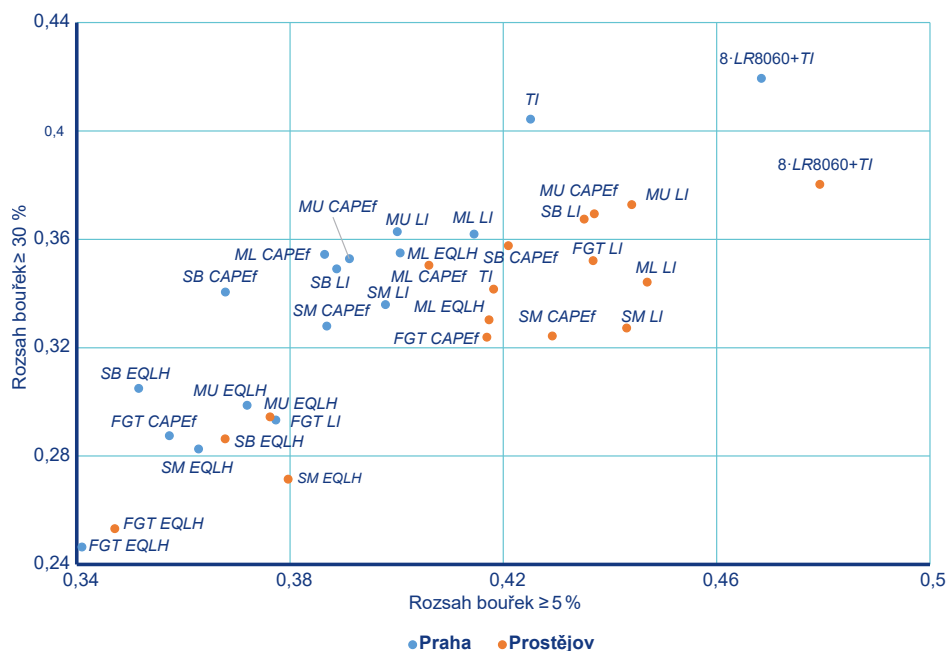
Obr. 12 Vypočtená závislost pravděpodobnosti vzniku alespoň ojedinělých bouřek pro stanici Praha na kvantilu hodnoty indexů *FGT EQLH*, *MU CAPEf* a *8-LR8060+TI*.

Fig. 12. Calculated probability of at least isolated thunderstorms for the Prague station based on the quantile values of the *FGT EQLH*, *MU CAPEf*, and *8-LR8060+TI* indices.



Obr. 14 Časový vývoj BSS nejlepšího indexu pro jednotlivé běhy modelu Aladin pro předpověď bouřek alespoň ojediněle.

Fig. 14. Time evolution of the BSS of the best index for individual runs of the Aladin model for forecasting storms at least isolated.



Obr. 13 Hodnota BSS jednotlivých indexů pro data ze sondáže ve 12:00 UTC.

Fig. 13. BSS value of individual indices for data from the survey at 12:00 UTC.

i v modelových předpovědích, a to zejména pro prahovou hodnotu $TS_{perc} \geq 5\%$, tedy alespoň ojedinělé bouřky. Ve sledovaném období je úspěšnost předpovědi pro $TS_{perc} \geq 5\%$ mírně lepší v Prostějově, pro $TS_{perc} \geq 30\%$ naopak v Praze. Oproti sondážím pak má v modelu znatelné zlepšení Thompsonuův index, který mírně vyčnívá nad ostatními. Naopak většina *EQLH*, s výjimkou *ML EQLH*, znatelně zaostává, ačkoli jejich schopnost předpovědi bouřek ze sondáže samotné byla srovnatelná s *LI* a *CAPEf*. To odpovídá nižším korelacím s daty spočtenými ze sondáže, jak bylo popsáno výše.

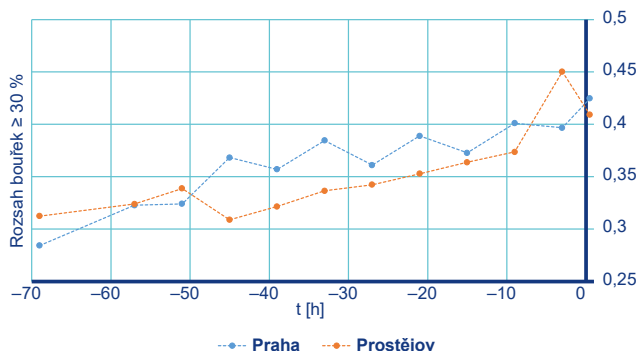
4.3 BSS sondáže

Pro tvorbu pravděpodobnostní předpovědi pomocí bouřkových indexů vypočtených ze sondáže, bylo pro jednotlivé indexy nejprve nutno vytvořit funkce vyjadřující závislost pravděpodobnosti vzniku bouřek na hodnotě indexu.

Na obr. 11 jsou příklady několika takto proložených křivek pro alespoň ojedinělé bouřky v Praze. První z dvojic obrázků (11a, 11c a 11e) ilustrují způsob proložení pozorovaných pravděpodobností v závislosti na hodnotě indexu funkcí.

Druhý z dvojic obrázků, kde je na ose x kvantil hodnot indexu, pak umožňuje lepší představu o podílu situací, kdy je předpověď nejistá a postupně přechází z minimální pravděpodobnosti do maximální.

U nejméně úspěšného indexu ze sledovaných, *FGT EQLH*, se i v nejvyšších hodnotách dostává předpovězená pravděpodobnost vzniku bouřek pouze na 70 %, zatímco u zbylých 2 zobrazených indexů jsme v určitých případech schopni předpovědět bouřky s jistotou 90 %. Důvod, proč je pro *8-LR8060+TI* vyšší BSS než pro *MU CAPEf*, je pak lépe vidět na obr. 12, kde je na ose x místo absolutních hodnot indexů nanesen percentil těchto hodnot. Zde je vidět, že pravděpodobnost vzniku bouřek pro velmi nízké hodnoty jak *MU CAPEf*, tak *8-LR8060+TI*, je téměř stejná, cca 5 %, obdobně pro velmi vysoké hodnoty se u obou indexů pohybuje kolem 90 %. Ovšem u indexu *8-LR8060+TI* tyto hodnoty, kdy máme poměrně vysokou jistotu, zda bouřky budou, či ne, popisují cca 50 % situací, zatímco u indexu *MU CAPEf* pouze cca 35 % situací. Proto vychází lépe použití *8-LR8060+TI*, jelikož cílem předpovědi je mít co největší jistotu v co největší části případů.



Obr. 15 Časový vývoj BSS nejlepšího indexu pro jednotlivé běhy modelu ALADIN pro předpověď bouřek alespoň místy.

Fig. 15. Time evolution of the BSS of the best index for individual runs of the ALADIN model for forecasting storms at least in locally.

Úspěšnost předpovědi pravděpodobnosti vzniku bouřek z hlediska BSS pro sondážní měření z času 12:00 UTC je na obr. 13. Jak bylo řečeno v úvodu, pro klimatologickou předpověď, kdy každý den počítáme se stejnou dlouhodobou pravděpodobností vzniku bouřek, by hodnoty BSS byly 0.

Pokud bychom klimatologickou předpověď vylepšili o roční chod dle pravděpodobností vzniku bouřek v jednotlivých měsících, dostaneme se pro Prahu a Prostějov na hodnoty BSS = (0,056;0,057) pro alespoň ojedinělé bouřky, a na hodnoty BSS = (0,072;0,079) pro bouřky alespoň místy. Vypočtená předpovědní schopnost sledovaných indexů je tedy podstatně vyšší.

Kromě potvrzení efektivity kombinace 8-LR8060+TI lze také vyčíst, že různé varianty EQLH, ačkoli jsou srovnatelné s CAPEf a LI z hlediska TSS a prahových hodnot, pro pravděpodobnostní předpověď už jsou slabší, s výjimkou ML EQLH. V tomto ohledu jsou výsledky BSS sondážních dat velmi podobné s výsledky TSS předpovědních dat modelu ALADIN. Dále je opět patrná vyšší efektivita indexů pro Prostějov v případě bouřek alespoň ojedinělých, zatímco bouřky většího rozsahu (alespoň místy) se lépe předpovídají z pražské sondáže.

4.4 BSS předpovědní model ALADIN

Schopnost pravděpodobnostní předpovědi bouřek byla napočítána i pro jednotlivé běhy modelu ALADIN. V naprosté většině případů vycházely nejlepší hodnoty pro kombinaci 8-LR8060+TI, ojediněle měl vyšší BSS samotný TI, rozdíl byl však v takových případech minimální.

Na obr. 14 a 15 je znázorněn časový průběh BSS nejlepšího indexu pro jednotlivé běhy modelu ALADIN. Potvrdilo se, že i z hlediska pravděpodobnostní předpovědi bouřek jsou data z modelu zcela srovnatelná s daty ze sondáže, na obrázcích je zřetelný očekávaný pokles kvality předpovědi s její délkou.

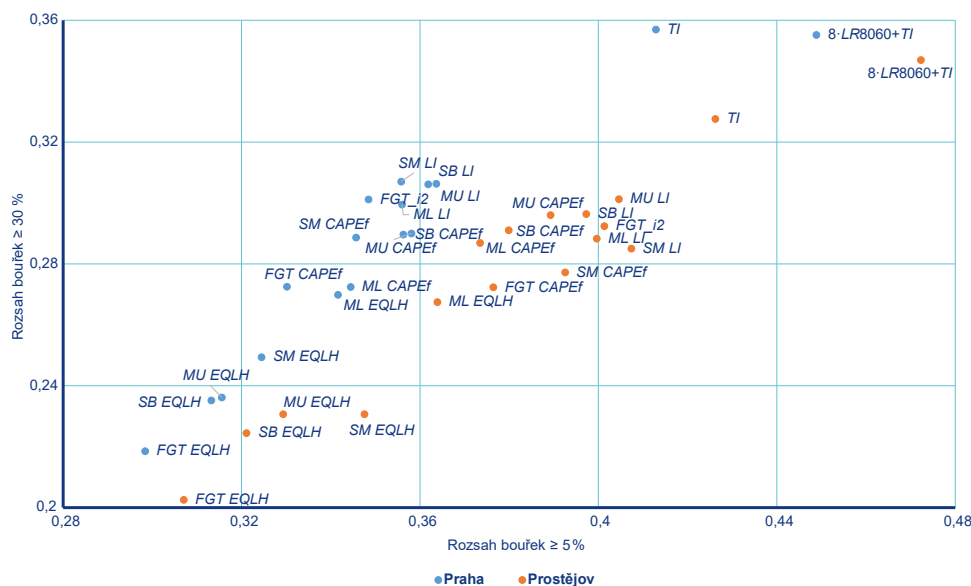
Obr. 16 znázorňuje průměrné hodnoty BSS pro jednotlivé indexy, průměrováno přes všechny předpovědní běhy modelu ALADIN. Potvrdily se rysy pozorované už při stejném výpočtu ze sondáží (obr. 13). Pro Prostějov je předpověď úspěšnější pro $TS_{perc} \geq 5\%$, zatímco pro Prahu pro $TS_{perc} \geq 30\%$. Indexy EQLH oproti ostatním sledovaným ztratí a nejlépe vychází kombinace 8-LR8060+TI, a to zejména pro $TS_{perc} \geq 5\%$.

Zároveň lze vypořovovat některé rysy specifické pro modelová data. Zatímco v případě sondáže TI předčil ostatní indexy pouze pro Prahu, pro modelová data to platí i v Prostějově. Dále lze pozorovat, že ve všech sledovaných variantách vychází LI lépe než CAPEf.

5. Závěr

Bylo zjištěno, že zatímco povrchová teplota modelu ALADIN je ve velmi dobré shodě s měřením, teploty rosného bodu modelové předpovědi nadhodnocují o cca 1 °C při délce předpovědi do 24 h. V případě delších předpovědí ještě o něco více. Analýzy modelu ALADIN pak mají dobrou shodu s měřením jak pro $Tsfc$, tak pro $Tdsfc$.

To je patrně jednou z příčin systematického posunu hodnot indexů stability vypočtených z předpovědních běhů modelu ALADIN. Jejich průměrné hodnoty bez výjimky odpovídají labilnějšímu prostředí, než jaké vychází z měření.



Obr. 16 Průměrné hodnoty BSS jednotlivých indexů vypočtených z modelu Aladin.

Fig. 16. Average BSS values for individual indices calculated from the Aladin model.

Analýza maximálních TSS prokázala, že pro předpověď vzniku bouřek pomocí indexů stability je nejen analýza, ale i předpověď modelu ALADIN srovnatelná se sondážním měřením. Je ovšem třeba mít na paměti výše zmíněný posun k labilitě, tedy to, že prahové hodnoty pro vznik bouřek jsou adekvátně posunuté.

Stabilitní indexy vypočtené z předpovědi modelu ALADIN výrazně předčily schopnosti sondáže předpovídat bouřky na delší dobu dopředu, pro předpověď odpoledních bouřek je tedy zjevně smysluplnější v ranních hodinách využít půlnoční běh modelu ALADIN než půlnoční nebo ranní sondáž.

Bylo zjištěno, že pro předpověď z indexů spočtených z modelových předpovědí jsou různé varianty *LI* a *CAPEf* vhodnější, než *EQLH*. Potvrdil se přínos kombinace *TI* a *LR8060* zjištěný v dřívější práci i v případě modelových dat.

Podařilo se vytvořit algoritmus, který na základě vstupních dat rozsahu bouřek a vypočtených hodnot indexu vytvoří funkci, která pro danou hodnotu indexu vyjadřuje odpovídající pravděpodobnost vzniku bouřek. Výskyt alespoň ojedinělých bouřek dokáží nejúspěšnější indexy stability v mnoha případech určit s až 90 % jistotou.

I pro pravděpodobnostní předpověď byla potvrzena použitelnost indexů vypočtených z dat modelu ALADIN. V případě modelu i sondáže je znatelná horší předpověď pomocí *EQLH* než pomocí *CAPEf* či *LI*. Thompsonova modifikace *LI* a dále její doplnění o *LR8060* tuto předpověď opět vylepšují.

Na základě získaných výsledků bude aerologické oddělení ČHMÚ směřovat k výpočtu a zveřejňování indexů stability počítaných z modelových dat, jak to v současnosti dělá u měřených sondážích a k výpočtu pravděpodobnosti vzniku bouřek na základě profilových měření a předpovědí.

Literatura:

- BROŽKOVÁ, R., 2019. Nová provozní konfigurace modelu Aladin ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, roč. **72**, č. 2, s. 129–136. ISSN 0026-1173.
- BYERS, H. R., BRAHAM, R. R., 1949. The Thunderstorm – Report of the Thunderstorm Project, United States Department of Commerce, Weather Bureau.
- DOSWELL, C. A., III, EVANS, J. S., 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. *Atmospheric Research*, Vol. **67–68**, s. 117–133, Dostupné z: doi:10.1016/S0169-8095(03)00047-4.
- FÖRCHTGOTT, J., 1971. Předpověď bouřek čtyřvrstvou metodou za rok 1970, *Meteorologické zprávy*, roč. **24**, č. 3–4, s. 84–87.
- FÖRCHTGOTT, J., 1975. Předpověď bouřek – čtyřvrstvá metoda: Návod k použití [originální strojopis autora].
- CHROMOV, S. P., 1937. Úvod do synoptického rozboru počasí, Praha: Vojenský ústav vědecký, s. 109–114.
- GALWAY, J. G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. **37**, s. 528–529.
- GEORGE, J. J., 1960. Weather Forecasting for Aeronautics. Academic Press. 673 s.
- MARKOVSKI, P., RICHARDSON, Y., 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes, Royal Meteorological Society, Wiley-Blackwell, ISBN 978-0-470-74213-6.
- MOTL, M., RÝVA, D., 2023. Kombinace indexů stability pro předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. **76**, č. 6, s. 178–186. ISSN 0026-1173.
- PŮČÍK, T., GROENEMEIJER, P., RÝVA, D., KOLÁŘ, M., 2015. Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*, Vol. **143**, s. 4805–4821. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0104.1>.
- RÝVA, D., 2020. Nové zpracování a vizualizace dat z aerologických balónových sondážích. *Meteorologické zprávy*, roč. **73**, č. 5, s. 152–154. ISSN 0026-1173.
- RÝVA, D., MOTL, M., 2020. Ověření vybraných indexů stability pro předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. **73**, č. 6, s. 167–172. ISSN 0026-1173.
- STRACHOTA, J., 1966. Ověření několika metod pro předpověď bouřek v letním pololetí 1965. *Meteorologické zprávy*, roč. **19**, č. 3–4, s. 105–110. ISSN 0026-1173.
- SULAN, J., 2004. Výpočet konvekční dostupné potenciální energie CAPE a možnosti jeho využití v provozu ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 3, s. 61–68. ISSN 0026-1173.
- TÁBORSKÝ, Z., 1966. Porovnání některých metod předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. **19**, č. 6, s. 164–171.
- STULL, R., 2015. Meteorology for scientists and engineers. Sundog Publishing, 940 s.
- YADONG, L., JIANWEN, L., SHOUTING, G., 2004. Assessment of several moist adiabatic processes associated with convective energy calculation. *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. **21**, s. 941–950.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Antonín Bučánek, Ph.D., RNDr. Petr Pešice, Ph.D.