

Kombinace indexů stability pro předpovědi bouřek

Combinations of stability indices for thunderstorm forecasts

Martin Motl, David Rýva

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

Large amount of both historical and modern indices calculated from radio-sounding data was developed for the storm prediction. In this work we processed 75 storm indices and other parameters, which could potentially be connected with the storm development. First part of the article is devoted to the effectivity of particular indices with special emphasis on the comparison of various modifications of the convective available potential energy (CAPE). Afterwards there were examined possibilities of the use of various combinations of indices and other parameters, and benefits of these combinations for the thunderstorm forecast. The forecast of the afternoon storms based on midday soundings is analysed in detail, as for this time point, a combination of indices has apparently the biggest benefit.

KLÍČOVÁ SLOVA: sondáž – aerologie – indexy stability – bouřky – předpověď

KEYWORDS: upper air sounding – aerology – stability indices – thunderstorm – forecast

1. Úvod

Sondážní aerologická měření slouží již dlouhá desetiletí jako nepostradatelný nástroj při předpovědi nebezpečných meteorologických jevů, ale i jako vstupní data pro numerické předpovědní modely, kde představují nenahraditelný zdroj informací o stavu vyšších vrstev atmosféry až do výšek přes 30 km. Jednou z nejdůležitějších oblastí předpovědi, ve které mají sondážní měření své nezastupitelné místo, je předpověď konvektivních bouří a s nimi spojených bouřek. Ty představují výrazné nebezpečí nejen pro lidskou činnost na povrchu, ale zejména pro leteckou a lodní dopravu kdekoli ve světě se vyskytnou.

V dnešní době mají zpracování a vyhodnocení naměřených dat na starosti počítače, ale ještě v polovině minulého století tomu tak zdaleka nebylo. Výpočet všech potřebných fyzikálních veličin z naměřených dat tak nebyl operativně možný a přistupovalo se ke zjednodušením v podobě různých indexů stability (např. Táborský 1966; Táborský 1970; Strachota 1966; Forchtgott 1971). Jejich používání pak bylo podloženo spíše statisticky hodnocenými výsledky jejich úspěšnosti než čistě

fyzikální podstatou, která ale byla dobře známá už v dobách, kdy sondážní měření byla teprve v počátcích (např. Chromov 1937; Byers, Braham 1949). To samo o sobě mohl být značný problém, protože tehdy zpracovávané verifikační řady měření byly často velmi krátké, a tak zatížené velkou statistickou chybou. Není tedy až takovým překvapením, že některé starší metody nebo následné snahy o jejich zlepšení, jež na základě dřívějších studií vycházely velmi dobře, vykazují dnes při vyhodnocení na dlouhé řadě pozorování výrazně horší úspěšnost (Táborský 1970; Rýva, Motl 2020).

V současnosti je tedy dávána přednost výpočtu fyzikálně relevantních veličin spíše než zjednodušujících indexů počítaných jen z několika vybraných hladin. I tak jsme ale v předchozí práci (Rýva, Motl 2020) chtěli ověřit to, o kolik lépe si fyzikální veličiny povedou oproti těmto indexům. Výsledky této práce prokázaly, že i některé ze starších metod vykazují velmi dobrou úspěšnost jednoduché předpovědi, zda bude či nebude v okolí sondážní stanice bouřka. Jde především o ty metody, které mají fyzikální základ. Mezi nimi vyniká zejména čtyřvrstevová metoda (Förchtgott 1971). Ta v našem hodnocení vykazovala velmi dobré výsledky, a to zejména při předpovědi z půlnoční sondáže na odpolední a večerní hodiny. Dalším důvodem, proč se zabýváme zjednodušenými indexy, je i snaha o nalezení indexu, který by bylo možné použít na vyhodnocení vhodnosti prostředí pro vznik bouřek i na archivních datech z poloviny minulého století. Ty mají značně omezené vertikální rozlišení – k dispozici jsou jen význačné hladiny, zatímco moderní měření mají vertikální rozlišení cca 6 m. Počítání takových veličin, jako je CAPE (konvektivní dostupná potenciální energie) (např. Chromov 1937, Markovskí, Richardson 2010, Sulan et. al 2004), by ze starších dat mohlo dávat výrazně odlišné hodnoty, než byla realita, a takto spočtené hodnoty by nebyly vhodné pro srovnávání s hodnotami spočtenými na datech s vysokým rozlišením. Jelikož pro CAPE existuje vícero variant jejího výpočtu, jedním z cílů práce byla identifikace, která z těchto variant je pro předpověď bouřek na našem území nejlépe využitelná.

V této práci se tedy zaměříme na to, jestli je možné kombinací různých indexů a parametrů dosáhnout výraznějšího zlepšení úspěšnosti předpovědi bouřek na současných operativních datech, ale i na to, zda mezi úspěšnými kombinacemi jsou i takové, které lze použít zpětně na vyhodnocení historických dat. Rovněž nás zajímalo, jak si stojí indexy, které nepoužívají informace o stavu bezprostředně při povrchu – jelikož by mohly pomoci účinně předpovídat bouřky ze sestupových radiosondážních dat (data měřená při pádu sondy zpět na zem). Tato data často nejsou k dispozici až k povrchu, ale v teplé polovině roku dosahují v 93 % případů alespoň hladiny 850 hPa. Pro vyhodnocení úspěšnosti jsme použili stejnou metodiku jako v minulé práci a rozšířili jsme studované období. Hodnoceno je tedy období teplých půlroků (duben–září) let 2004 až 2022, ze kterých máme kompletní data ze sítě detekce blesků a sondážní měření ze stanic ve stávajících lokacích.

2. Zahrnuté indexy a veličiny

Ve vyhodnocení jsme se zaměřili na indexy a veličiny počítané ze sondážních měření stanic Praha-Libuš a Prostějov. Spočítané hodnoty lze rozdělit do několika skupin podle jejich podstaty.

i) První skupinou jsou jednoduché indexy stability používané zejména v době před masivním rozšířením počítačů, protože jejich výpočet je jednoduchý a operativně proveditelný i bez výpočetní techniky. Jejich výpočet je realizovaný na základě jednoduchých součtů a rozdílů teplot a rosných bodů ve dvou nebo třech význačných hladinách. Takto je počítán například klasický *K index (KI)*, (George 1960):

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

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

Obdobně je počítán i *Total Totals index (TT)*, (Miller 1972):

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d_{850}} - T_{500}). \quad (2)$$

ii) Ve druhém případě je výpočet složitější a je nutné počítat adiabatický výstup z určité zvolené hladiny (zemský povrch, nebo hladina 850 hPa) do hladiny 500 hPa a zde jen porovnat výslednou teplotu s teplotou okolního vzduchu v této hladině. Takto se počítá například *Faustův index (FI)*, (např. Strachota 1966), jenž byl v Česku hojně využíván ve druhé polovině minulého století:

$$FI = T_f - T_{500}, \quad (3)$$

T_f je teplota, jež se odečítala původně z tabulky, ale aktuálně následovným způsobem. Jde o teplotu dosaženou adiabatickým výstupem částice z hladiny 850 hPa do hladiny 500 hPa s tou modifikací, že jako počáteční deficit rosného bodu není použit deficit v 850 hPa, ale průměrný deficit v hladinách 850, 700 a 500 hPa.

Faustův index je ale v podstatě jen modifikací *Showalterova indexu (SI)*, (Showalter 1947):

$$SI = T_{500} - T_{850 \rightarrow 500}, \quad (4)$$

kde $T_{850 \rightarrow 500}$ je teplota vzduchové částice adiabaticky vystoupané z hladiny 850 hPa do 500 hPa.

Mnohem známější a používanější i v současné době je však *Lifted index (LI)*, (Galway 1956):

$$LI = T_{500} - T_{BLV \rightarrow 500}, \quad (5)$$

kde $T_{BLV \rightarrow 500}$ je teplota vzduchové částice adiabaticky vystoupané ze zvolené počáteční hladiny do hladiny 500 hPa.

Oproti předešlé práci počítáme více modifikací Lifted indexu podle toho, jaká hladina je zvolena pro počátek výstupu vzduchové částice.

V případě počátku výstupu již od zemského povrchu hovoříme v angličtině o tzv. *Surface based (SB)* modifikaci. Ta ale nereprezentuje dobře skutečnost, že konvektivního výstupu se neúčastní jen vzduchová hmota od zemského povrchu, ale i přiléhající vrstvy nad ní.

Tuto skutečnost zohledňuje modifikace označovaná jako *Mixed layer (ML)*, kdy jsou nejprve spočteny teplota a rosný bod získané vertikální promícháním („mixováním“) vrstvy o zvolené vertikální mocnosti při povrchu. Následně počítáme s výstupem takto získané fiktivní vzduchové částice. V našem případě počítáme s mocností vrstvy 50 hPa od zemského povrchu.

Pro zohlednění vyvýšené lability, kdy vrstva vzduchu při zemském povrchu je ovlivněna noční teplotní inverzí, nebo dalšími vlivy, je vhodnější počítat s výstupem z hladiny s maximální hodnotou ekvivalentní potenciální teploty ve spodních 300 hPa od povrchu. Tuto modifikaci označujeme jako *Most unstable (MU)*.

Pro alespoň hrubý odhad labilizace vzduchové hmoty v důsledku denního chodu teploty počítáme na základě sondáže odhad předpokládané maximální teploty vzduchu při povrchu s tím, že je zohledněno i mísení vzduchu v rámci mezní vrstvy v důsledku mělké konvekce. Jde o stejnou metodiku, jako užívá americké Centrum pro předpovědi bouří (Storm Prediction Center 2023), kdy odhad maximální denní teploty vychází z teploty v hladině 850 hPa, odkud je počítána nenasyčená adiabata dolů k povrchu a zohledňuje se i přízemní superadiabatická vrstva přičtením 2 °C. Rosný bod vychází z promíchání vrstvy spodních 100 hPa při povrchu. Tuto modifikaci označujeme jako *Surface maximum (SM)*.

Poslední použitou modifikací je *Effective layer mixed (ELM)*, počítaná průměrováním teploty a vlhkosti v tzv. *efektivní vrstvě*, kterou popisujeme dále, protože je definována na základě energie *CAPE*.

Posledním indexem z této skupiny, o kterém se zmíníme podrobněji, je *Thompsonův index (TI)*, jenž je jednoduchým rozdílem *K indexu* a *MU Lifted indexu*, tedy:

$$TI = KI - MU LI. \quad (6)$$

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

iii) Třetí skupinou jsou různé modifikace *CAPE*, tedy dostupné potenciální energie pro rozvoj konvekce, jejíž výpočet je integrálem vztaku působícího na částici vzduchu stoupající z výchozí hladiny:

$$CAPE = \int_{LFC}^{EQL} g(z) \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz. \quad (7)$$

T je zde teplota vzduchové částice stoupající z počáteční hladiny a T_e je teplota okolí částice vždy v dané hladině, LFC je hladina volné konvekce a EQL představuje hladinu nulového vztaku. Teploty v tomto vzorci jsou, na rozdíl od předchozích, zadávány výhradně v Kelvinech.

Počítané modifikace *CAPE* jsou stejné jako u *Lifted indexu* a odlišují se tedy jen počáteční hladinou adiabatického výstupu vzduchové částice.

K výpočtu *CAPE* byla dále přidána i hodnota *CINH* (často též jen *CIN*), jež vyjadřuje energii nutnou na překonání zádržné stabilnější vrstvy, která brání rozvoji konvekce (např. Colby 1983):

$$CINH = \int_{BLV}^{LFC} g(z) \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz. \quad (8)$$

T je opět teplota vzduchové částice stoupající z počáteční hladiny a T_e je teplota okolí částice vždy v dané hladině, kdy BLV je počáteční hladina výstupu a LFC je hladina volné konvekce. Teploty v tomto vzorci jsou stejné jako u $CAPE$ v Kelvinech. Výpočet $CINH$ lze najít i ve variantě s mínusem před vzorcem, a výsledné hodnoty jsou pak kladné, ač jde o energii, jež je nutno do systému dodat.

U všech výše zmíněných modifikací výstupu je počítána právě $CAPE$ a $CINH$, ale i Lifted index, výška kondenzační hladiny (LCL), hladiny volné konvekce (LFC) a hladiny nulového vztlačení (EQL). Stejně tak jsou u všech modifikací počítány hodnoty $CAPE_f$, tedy $CAPE$ se započtením vlivu skupenského tepla tuhnutí (Yaodong et al. 2004), které je obvykle ve výpočtech nasycené adiabaty ignorováno.

Samostatnou variantou $CAPE$ je $ICAPE$, jež je počítána jako dvojná integrace energie v celé efektivní vrstvě:

$$ICAPE = \int_{ELB}^{ELT} \int_{LFC}^{EQL} g(z) \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz \rho_{air}(h) dh. \quad (9)$$

ELB je základna efektivní vrstvy a ELT horní hranice efektivní vrstvy. Za efektivní vrstvu označujeme takový vertikální rozsah atmosféry, kdy z libovolné výšky (v rámci této vrstvy) započatý výstup vykazuje vždy nenulovou hodnotu $CAPE$. Teploty v tomto vzorci jsou opět v Kelvinech. Tato veličina představuje celkovou dostupnou energii na jednotku plochy, jakou může konvekce teoreticky mít k dispozici.

Tyto prediktory jsou dnes výrazně upřednostňovány před jednoduchými indexy, protože jde o fyzikálně relevantní veličiny, a nikoli jen zjednodušené indexy ve vybrané pevně stanovené hladině.

iv) Čtvrtou skupinu tvoří prediktory vyjadřující vertikální změny větru, které jsou důležité hlavně pro charakter a organizaci vzniklé konvekce (např. Doswell, Bosart 2001; Markovski, Richardson 2010). U těchto indexů nelze předpokládat, že by samy o sobě dokázaly úspěšně predikovat vývoj konvektivních bouří a s nimi spojených bouřek. Důvodem jejich zařazení do této práce bylo ověření, zda v kombinaci s indexy stability nebo s $CAPE$ dokáží tyto veličiny zlepšit úspěšnost prosté předpovědi výskytu bouřky.

Jde v první řadě o velikosti vektorových rozdílů větru (Markovski, Richardson 2010) (slangově sice hovoříme o „stříhu větru“, ač ten bychom dostali až po vydělení této hodnoty vertikální mocností rozdílů hladin v metrech) mezi zemí (vítr v 10 m nad povrchem) a danou výškou nad povrchem. Standardně se počítají hodnoty pro 1, 3, 6 a doplňkově někdy i 8 km nad povrchem. Pro stejné výšky jsme počítali i délky hodografu (Huntrieser et al. 1997). Posledním parametrem z této skupiny je BRN shear (Markovski, Richardson 2010), který je velikostí vektorového rozdílu hustotou vážených průměrů větru v celé sledované vrstvě a ve spodních 500 metrech. Hodnoty této veličiny jsou počítány pro mocnosti vrstvy 3 a 6 km.

v) Závěrečnou skupinou jsou ostatní veličiny, jakými jsou například hodnoty potenciální srážkové vody (vodní páry) v atmosféře, ale i další vlhkostní parametry jako směšovací poměr v přízemním kilometru, relativní vlhkosti nízkých a středních vrstev troposféry nebo hodnoty lapse rates, tedy velikostí vertikálního teplotního gradientu mezi vybranými hladinami vztahujícími se hlavně k nízkým a středním vrstvám troposféry.

vi) Samostatně je pak zahrnuta čtveřice pomocných indexů čtyřvrstvé metody (Förchtgott 1971) a jejich výsledné vyhod-

nocení v podobě indexu N . Do přehledu jsme zahrnuli i vlastní výpočet indexu N , dále označovaný N^* , který není určený složitým tabulkovým určováním s mnohonásobnými podmínkami a výjimkami (Förchtgott 1975), ale přímým výpočtem. Cílem zavedení indexu N^* byl také přechod od diskrétních hodnot ke spojitým, které mohou pomoci nalézt přesnější prahové hodnoty.

Zpracování sondážních měření touto metodou je obecně složitější než u jednoduchých indexů typu Lifted index, Showalterova indexu apod., a proto autor pro jeho realizaci v době před příchodem osobních počítačů vytvořil vlastní speciální typ logaritmického pravítka. Výpočet probíhá tak, že nejprve se z teploty v hladině 850 hPa a teploty rosného bodu u povrchu vypočte tzv. opravená teplota (Förchtgott 1975) v hladině 850 hPa, z té je následně počítán nasycené adiabatický výstup postupně do hladin 700, 500, 400 a 300 hPa. Rozdílem takto vypočtených teplot a teplot okolního vzduchu v těchto hladinách jsou získány 4 hodnoty indexů i_1, i_2, i_3 a i_4 . Pomocí rozhodovací tabulky (Förchtgott 1971) s prahovými hodnotami těchto indexů je pak přiřazen výsledný index N v rozmezí 0 až 9, který indikuje maximální očekávanou intenzitu konvekce, popř. i sílu bouřek, kdy 0 značí situaci bez přeháněk a 9 velmi silné bouřky.

Analýzou tabulkového schématu byl definován výpočet indexu N^* , přičemž byla snaha zachovat principy, dle nichž je index N určován. Naopak pro účely určování prahových hodnot nebylo potřeba zachovat mezi indexy N a N^* linearitu a obor hodnot. Nová spojitá varianta je počítána dle vzorce:

$$N^* = \sum_{j=1}^4 \max(-2; \min(2; i_j)). \quad (10)$$

Tedy součet 4 pomocných Förchtgottových indexů, pokud jsou jejich hodnoty v intervalu $(-2; 2)$. Pokud se nacházejí mimo tento interval, do výpočtu vstupuje nejbližší krajní hodnota tohoto intervalu. Obor hodnot indexu N^* je $\langle -8; 8 \rangle$.

3. Data a metody vyhodnocení

Výše popsané indexy jsme spočítali shodně jako v předešlé práci, tedy pro celé období teplých půlroků (duben–září), ale tentokrát rozšířené na roky 2004 až 2022. Výpočet byl provedený zvláště pro Prahu-Libuš i pro Prostějov a odděleně se počítalo i hodnocení pro různé časové termíny balónového měření a intervaly výskytu bouřky.

Jako vstupní data jsme použili soubory s plným počtem měřených hladin od povrchu po hladinu, kde došlo k prasknutí balónu, ale reálně jsme využili data pouze do hladiny 100 hPa. Pro stejné období jsme zpracovali i data z TDOA (time difference of arrival) sítě detekce blesků CELDN a následně LINET. V těchto datech je k dispozici lokalizace, přesný čas výskytu výboje, ale i informace o polaritě a typu výboje (mezioblačný vs. výboj mezi oblakem a zemí). Souřadnice místa výboje byly přepočteny do gnómonické 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 nejlépe koresponduje s pozorováními z profesionálních meteorologických stanic. Pro každé sondážní měření 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

S ohledem na četnost sondáží, vzdálenosti sondážních stanic aj. jsme zvolili jako reprezentativní okolí stanice do 150 km. V této práci jsme se zabývali schopností predikce bouřek na následujících 12 h, tj. sondáž 00:00 UTC byla použita jako reprezentativní pro čas 00:00–11:59 UTC (dále pouze 00) a sondáž z 12:00 UTC pro čas 12:00–23:59 UTC (dále 12). 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 (dále 00v12). Oproti předešlé práci jsme nově přidali i sondážní měření z 06:00 UTC, která je využívána hlavně leteckými meteorology, a zjišťovali jsme schopnost těchto měření předpovědět bouřky odpoledne nebo večer, tj. v intervalu 12:00–23:59 UTC (dále 06v12). Měření v čase 06:00 UTC je standardně prováděno pouze na stanici Praha-Libuš, pro Prostějov tedy nebylo vyhodnocováno. 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 v daném časovém rozmezí.

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 $TS_{perc} \geq 30 \%$. To odpovídá situacím, kdy se na daném území bouřky vyskytovaly alespoň ojediněle, respektive alespoň místy.

Celkově tak bylo sledováno 14 kategorií podle termínu sondážního měření, stanice, času, kdy byl sledován výskyt bouřek, a minimálního prostorového rozsahu pokrytí bouřkami. Tyto kategorie a jejich další značení v článku shrnuje tab. 1.

3.2 Skill score

Zaměřili jsme se na hledání prahových hodnot jednotlivých indexů takových, aby nejlépe odpovídaly situaci, kdy hodnota indexu větší nebo rovna prahové hodnotě předpovídá vznik bouřky a hodnota pod prahovou hodnotou předpovídá, že bouřková činnost nevznikne.

Tab. 1 Zkoumané kategorie měření, termínu předpovědi a rozsahu bouřek a jejich značení v článku.

Table 1. The examined categories of measurement, forecast horizon and extent of thunderstorms and their labelling in the article.

Stanice	Termín sondáže	Termín předpovědi výskytu bouřek	Minimální prostorový rozsah bouřek	Značení v článku
Praha	00:00 UTC	00:00–11:59 UTC	5 %	Prg_00_05
			30 %	Prg_00_30
	12:00–23:59 UTC	5 %	Prg_00v12_05	
		30 %	Prg_00v12_30	
	06:00 UTC	12:00–23:59 UTC	5 %	Prg_06v12_05
			30 %	Prg_06v12_30
12:00 UTC	12:00–23:59 UTC	5 %	Prg_12_05	
		30 %	Prg_12_30	
Prostějov	00:00 UTC	00:00–11:59 UTC	5 %	Pro_00_05
			30 %	Pro_00_30
	12:00–23:59 UTC	5 %	Pro_00v12_05	
		30 %	Pro_00v12_30	
	12:00 UTC	12:00–23:59 UTC	5 %	Pro_12_05
			30 %	Pro_12_30

Pro vyhodnocení schopnosti předpovědní metody předpovídat daný jev se zpravidla vychází z kontingenční tabulky (Zacharov 2004):

Předpověď	Skutečnost	
	ano	ne
ano	zásah (a)	falešný alarm (b)
ne	chyba (c)	správné vyloučení (d)

Cílem předpovědní metody je pak minimalizace položek b, c . Na základě hodnot a, b, c, d lze vyčíslit kvalitu předpovědní metody, přičemž způsobů vyčíslení je mnoho a každý z nich popisuje trochu jiné vlastnosti předpovědní metody.

Základními parametry vlastností předpovědi jsou:

Pravděpodobnost detekce (Probability of detection, POD), která vyjadřuje podíl výskytu jevu, který se předpovědi podařilo zachytit:

$$POD = \frac{a}{(a+c)} \quad (11)$$

Pravděpodobnost falešné detekce (Probability of false detection, POFD) zachycující naopak podíl falešných alarmů z celkového množství situací, kdy jev nenastal:

$$POFD = \frac{b}{(b+d)} \quad (12)$$

Samy o sobě jednotlivě tyto parametry k vyhodnocení kvality předpovědi nestačí. Pro dokonalou předpověď platí $POD = 1$, to ale bude platit také v případě, že jev budeme předpovídat vždy. Naopak $POFD$ v ideální předpovědi bude $POFD = 0$, což ale platí i v situaci, kdy jev nebudeme předpovídat nikdy. Proto byla historicky odvozena různá skill score, ale pro účely tohoto vyhodnocení jsme použili True skill statistic (TSS):

$$TSS = POD - POFD = \frac{ad-bc}{(a+c)(b+d)} \quad (13)$$

TSS na rozdíl od jiných nepracuje s přímým srovnáním s náhodnou předpovědí a vychází z jednoduchého předpokladu, že ideální předpověď má mít co nejvyšší POD a co nejnižší $POFD$. Další důležitou vlastností TSS je, že parametry b a c nejsou záměnné. To znamená, že chyby a falešné alarmy nemají stejnou váhu, ale tato váha závisí na relativní četnosti jevu. Čím vzácnější jev je, tím lepší je předpověď (dle TSS), která jev zachytí, a to i za cenu nárůstu falešných alarmů. TSS nabývá hodnot od -1 do 1 , přičemž dokonalá předpověď má $TSS = 1$.

Vzhledem k charakteristice bouřkové činnosti jako nebezpečného jevu jsme pro další vyhodnocení vybrali právě TSS, které při nízké četnosti jevu klade větší důraz na to, aby jev před-

povědi neunikl. Maximální TSS (TSS_{max}) a tomu odpovídající prahovou hodnotu indexů jsme hledali zvlášť pro obě stanice, jelikož lokální podmínky mohou ovlivňovat jak efektivitu indexu pro předpověď bouřek, tak samotnou optimální prahovou hodnotu pro tuto předpověď. Řešeny byly zvlášť dvě výše zmíněné četnosti bouřek a čtyři výše zmíněné možnosti časové reprezentativnosti sondáží – celkem tedy bylo pro každý index stability získáno 14 prahových hodnot a tomu odpovídajících TSS_{max} .

3.3 Kombinace indexů

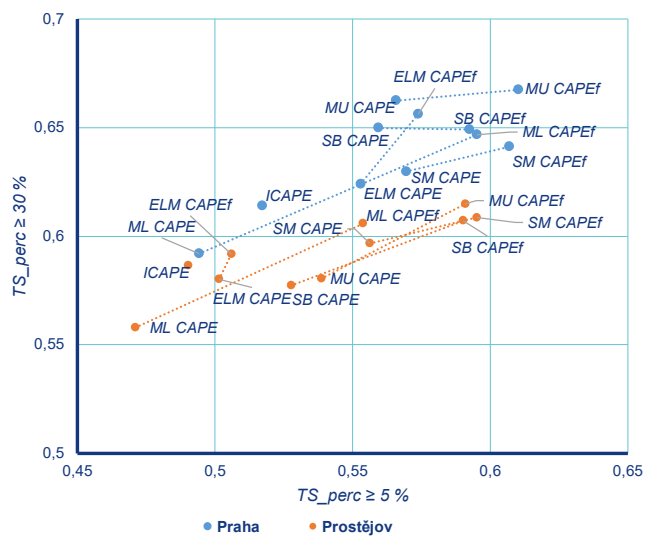
Pro kombinace indexů byly použity tři varianty výpočtu. První byla varianta logického operátoru AND, tedy předpoklad překročení prahových hodnot obou analyzovaných indexů

současně. Druhou variantou byl logický operátor OR, tedy bylo vyžadováno překročení prahové hodnoty alespoň 1 ze sledovaných indexů. Třetí pak byla lineární kombinace obou indexů, která vytvořila novou proměnnou Y podle vzorce:

$$Y = VAR1 + A \cdot VAR2, \tag{14}$$

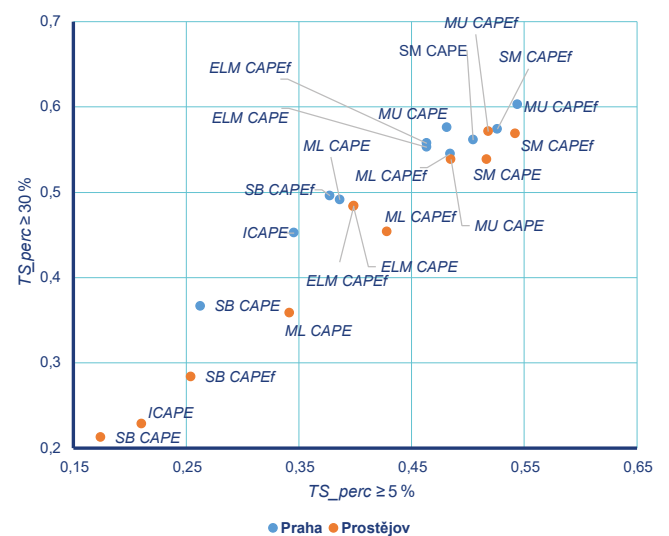
kde $VAR1$, $VAR2$ jsou jednotlivé původní indexy, A pak určuje optimální poměr těchto indexů.

Pro všechny tři varianty byly vyhledány optimální prahové hodnoty pro maximalizaci TSS – v případě logických operátorů tedy dvě prahové hodnoty pro dva indexy, v případě lineární kombinace optimální poměr příspěvků jednotlivých indexů a prahová hodnota pro nově vzniklou proměnnou. Ve všech



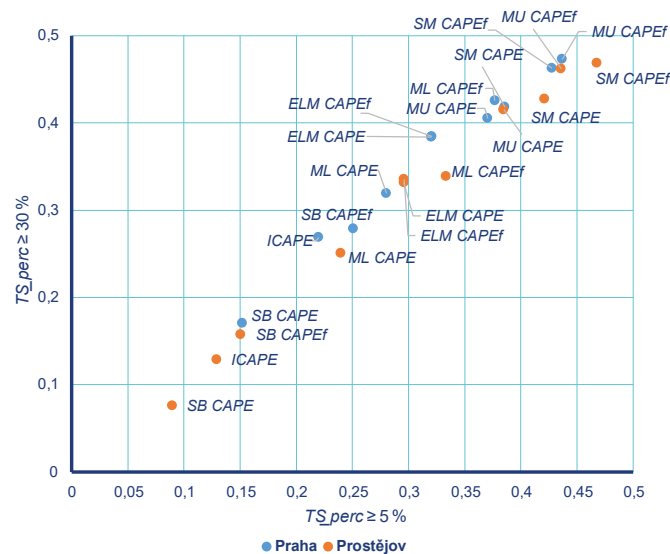
Obr. 1 TSS_{max} pro předpověď odpoledních bouřek z různých variant CAPE v termínu 12:00 UTC.

Fig. 1. TSS_{max} for the prediction of afternoon thunderstorms from different CAPE variants in 12:00 UTC term.



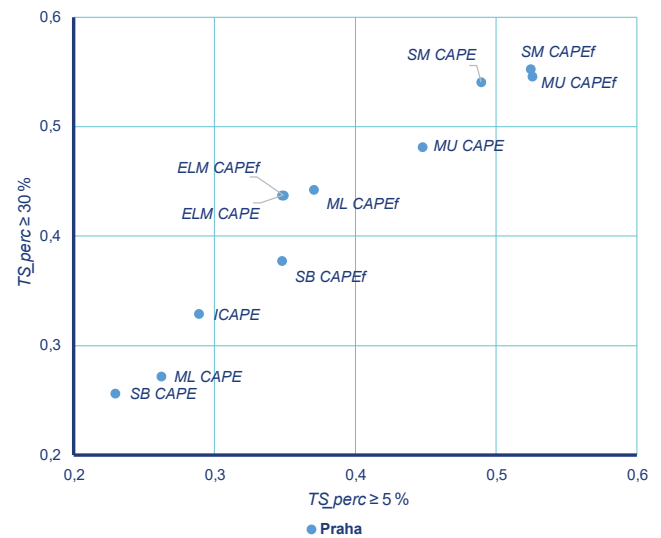
Obr. 2 TSS_{max} pro předpověď dopoledních bouřek z různých variant CAPE v termínu 00:00 UTC.

Fig. 2. TSS_{max} for the prediction of morning thunderstorms from different CAPE variants in 00:00 UTC term.



Obr. 3 TSS_{max} pro předpověď odpoledních bouřek z různých variant CAPE v termínu 00:00 UTC.

Fig. 3. TSS_{max} for the prediction of afternoon thunderstorms from different CAPE variants in 00:00 UTC term.



Obr. 4 TSS_{max} pro předpověď odpoledních bouřek z různých variant CAPE v termínu 06:00 UTC.

Fig. 4. TSS_{max} for the prediction of afternoon thunderstorms from different CAPE variants in 06:00 UTC term.

třech variantách je nalezené TSS_{max} vždy vyšší nebo rovno TSS_{max} získaným pro samostatné indexy, proto bylo potřeba počítat s tím, že zlepšení samotného TSS_{max} nemusí být vždy relevantní, ale může být náhodnou odchylkou. Pro určení relevance zlepšení byla stanovena hladina 90 % jistoty, že kombinace indexů určuje pravděpodobnost vzniku bouřek lépe než indexy samostatné. Interval vypočtených hodnot TSS_{max} , v němž nebylo možno s jistotou více než 90 % vyloučit, že daná kombinace indexů určuje pravděpodobnost vzniku bouřek nejlépe, je dále nazýván „pásmo relevance“. Pro sledovaných 75 parametrů existuje celkem 2 775 jejich dvojkombinací, přičemž jen menšina z nich dává statisticky relevantní a fyzikálně smysluplné výsledky. Článek se proto bude věnovat jen těm nejzajímavějším výstupům ze získaného souboru dat.

4. Výsledky a diskuze

Při zpracování TSS_{max} jednotlivých indexů se i přes zavedení mnoha dalších variant $CAPE$ a s ní spojených veličin potvrdily výsledky práce (Rýva, Motl 2020), kdy ve většině sledovaných variant dopadl nejlépe některý z Förichtgottových indexů. V tab. 2 je seznam TSS_{max} s odhadem chyby, nejúspěšnější index a seznam těch, u kterých nelze alespoň s 90 % jistotou vyloučit, že jsou nejlepší.

Kromě poledních sondáží vychází vždy nejlépe buď i_2 nebo N^* . Tyto dva indexy jako jediné nelze s jistotou vyloučit jako nejlepší ani v jedné ze 14 sledovaných kategorií.

Napočítáno bylo mj. celkem 11 variant $CAPE$. Z obr. 1 je patrné, že varianta indexu se započtením skupenského tepla tuhnutí vychází vždy lépe než bez něj (pro lepší orientaci jsou příslušné dvojice bez započtení skupenského tepla tuhnutí a s jeho započtením spojeny přerušovanou čarou). Obdobně situace vypadá i pro zbylých deset sledovaných kategorií (00, 00v12, 06v12), kdy varianty se započtením skupenského tepla tuhnutí dopadají bez výjimky lépe.

Dále lze vyzorovat, že nejlépe vychází varianty $MU CAPE_f$ a $SM CAPE_f$, nicméně pro polední termín jsou varianty $SB CAPE_f$ a $ML CAPE_f$ téměř srovnatelné. V ostatních sledovaných kategoriích 00 (obr. 2), 00v12 (obr. 3) i 06v12 (obr. 4) je už ztráta $ML CAPE_f$ a zejména $SB CAPE_f$ značná. $MU CAPE_f$ má mírně vyšší hodnoty pro pražské radiosondáže a $SM CAPE_f$ pro prostějovské, nicméně tyto rozdíly jsou pod hladinou 90% jistoty významnosti.

4.1 Kombinace indexů

Jednou z hlavních motivací realizace analýzy kombinací indexů bylo získání informace o vlivu $CINH$ na úspěšnost příslušného indexu $CAPE$. Paradoxně zrovna tato kombinace k žádnému výraznějšímu zlepšení nevedla. V tab. 3 jsou jako příklad uvedeny pravděpodobnosti vzniku bouřek pro Prahu, sondáž z 12 hodin při různých hodnotách $SB CAPE$ a $SB CINH$. Hodnota $234 J \cdot kg^{-1}$ byla pro $SB CAPE$ zvolena, jelikož vyšla pro tento prediktor jako prahová při jeho samostatném použití. $-22 J \cdot kg^{-1}$ je pak medián nenulových hodnot $CINH$. Z tabulky podle očekávání vyplývá minimální pravděpodobnost bouřek při nulové $SB CINH$ a nízké $SB CAPE$. Velmi překvapivé je ovšem zvýšení pravděpodobnosti na 10 % při stále nízké $SB CAPE$, ale nenulové (ať už nízké nebo vysoké) $CINH$. V situacích s vysokou $SB CAPE$ je pravděpodobnost bouřek srovnatelná pro všechny intervaly hodnot $CINH$.

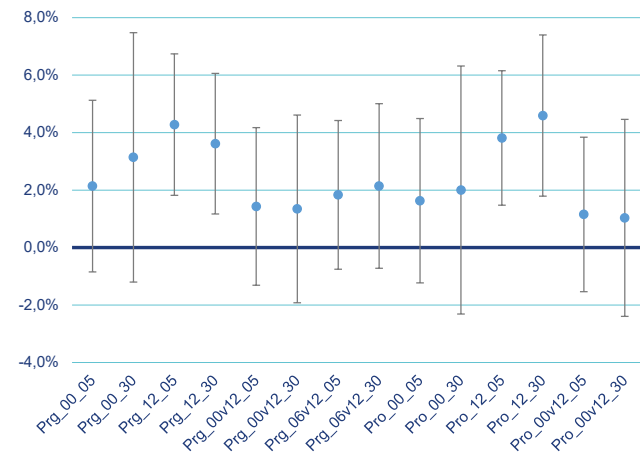
Tab. 2 Maximální TSS a seznam indexů, u nichž nelze s alespoň 90% jistotou vyloučit, že jsou pro danou kategorii předpovědi nejlépsi. Table 2. Maximal TSS and list of indices for which it cannot be ruled out with at least 90% certainty that they are the best for the given category of prediction.

	Nejlépsi index	TSS_{max}	Förichtgott				LI			EQL			CAPEf			CAPE			TI	SI
			i_2	i_3	i_4	N^*	MU	ML	SB	SM	ELM	MU	ML	SB	SM	ELM	MU	SM		
00	5 %	N^*	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	30 %	N^*	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	5 %	SI	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
12	30 %	MU LI	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	5 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
00v12	30 %	N^*	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	5 %	N^*	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
06v12	30 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	5 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
00	30 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	5 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	30 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Pro 12	5 %	SMEQL	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	30 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
00v12	5 %	i_2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	30 %	N^*	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

Tab. 3 Pravděpodobnost vzniku bouřek ($TS_{perc} \geq 30\%$) podle hodnot $SB\ CAPE$ a $SB\ CINH$ ze sondáže Praha 12:00 UTC.

Table 3. Probability of thunderstorms ($TS_{perc} \geq 30\%$) according to $SB\ CAPE$ and $SB\ CINH$ values from the Prague 12:00 UTC sounding.

$p(TS_{perc} \geq 30\%)$		$SB\ CAPE$		
		0	< 234	≥ 234
$SB\ CINH$	0	1,8 %	2,9 %	47,9 %
	(0; -22)	-	10,3 %	52,0 %
	≤ -22	-	11,9 %	52,5 %



Obr. 5 Zvýšení nejvyšší dosažené TSS_{max} zavedením dvojkombinace indexů místo jediného a interval 90% jistoty (pásmo relevance) pro sledované kategorie.

Fig. 5. Increase of the highest achieved TSS_{max} by introducing a double combination of indices instead of a single one and a 90% confidence interval (relevance band) for the examined categories.

Tab. 4. Maximální dosažené TSS pro jednotlivé kategorie termínu měření a předpovědi.

Table 4. Maximal TSS achieved for the categories of measurement term and prediction term.

	Termín sondáže a bouřek	Hranice TS_{perc}	TSS_{max}	POD	POFD	Samostatné indexy v pásmu relevance	Počet dalších dvojkombinací v pásmu relevance
Praha	00	5 %	57,3 %	79,6 %	22,3 %	$N, N^*, MU\ CAPEf$	211
		30 %	63,7 %	83,8 %	20,2 %	$i_4', N^*, MU\ CAPEf$	300
	12	5 %	65,8 %	80,2 %	14,4 %	-	41
		30 %	70,4 %	91,6 %	21,2 %	-	71
	00v12	5 %	48,3 %	79,6 %	31,3 %	i_2, i_3, N^*	95
		30 %	51,9 %	80,4 %	28,6 %	i_2, i_3, i_4', N, N^*	48
	06v12	5 %	58,4 %	81,6 %	23,2 %	i_2, N, N^*	10
		30 %	61,0 %	87,2 %	26,1 %	i_2, N^*	76
Prostějov	00	5 %	57,9 %	81,3 %	23,4 %	i_2, N^*	151
		30 %	60,4 %	84,5 %	24,0 %	$i_2, i_4', N, N^*, MU\ CAPEf, SM\ CAPEf, MU\ EQL$	171
	12	5 %	64,6 %	87,7 %	23,1 %	-	87
		30 %	68,6 %	86,2 %	17,6 %	-	25
	00v12	5 %	50,4 %	80,3 %	29,9 %	i_2, N, N^*	115
		30 %	50,3 %	75,6 %	25,3 %	$i_2, i_3, i_4', N, N^*, SM\ EQL$	135

Konkrétní jednotlivé situace, kdy byla vysoká $SB\ CINH$, nízká $SB\ CAPE$, a přesto výrazná bouřková činnost, lze poměrně dobře vysvětlit. Obvykle se jednalo o případy, kdy bouřky vznikaly ve večerních hodinách ze vzduchové hmoty, kterou polední sondáž ještě nemohla zachytit. Proč však tyto situace nastávají častěji při nenulové $SB\ CINH$ při polední sondáži než při nulové, bude předmětem dalšího výzkumu.

Některé jiné kombinace indexů ovšem byly úspěšnější. Na obr. 5 je vyjádřeno zlepšení maximálního TSS pro všech 14 sledovaných kategorií. Více než 90% míru jistoty, že je kombinace dvou indexů efektivnější než použití jediného, máme pouze ve všech 4 kategoriích předpovědi odpoledních bouřek z polední sondáže. Poměrně vysoké se zdá i zlepšení pro Prahu v termínu 00:00 UTC a $TS_{perc} \geq 30\%$, ale zde je zároveň vzhledem k nízké četnosti rozsáhlých dopoledních bouřek zvýšený i interval nejistoty.

Lze tedy konstatovat, že při použití sondáže v 00:00 či 06:00 UTC pro předpověď odpoledních bouřek a též při použití sondáže 00:00 UTC pro předpověď dopoledních bouřek se jako nejvhodnější jeví Förrchtgottovy indexy, přičemž se příliš nezlepší přidáváním dalších parametrů. Další indexy zaznamenaly signifikantní zlepšení i pro předpověď odpoledních bouřek ze sondáže 06:00 UTC, ale ani po tomto zlepšení nebyly prokazatelně lepší než samostatné indexy Förrchtgottovy.

Přehled maximálních dosažených TSS pro jednotlivé kategorie je v tab. 4. Z tabulky je dobře patrné postupné zvyšování možnosti předpovědi odpoledních bouřek, blíží-li se termínem měření ke sledovanému období – TSS_{max} se zvyšuje od cca 50 % o půlnoci až k hodnotě 70 % pro $TS_{perc} \geq 30\%$ v poledním termínu. V tabulce jsou pro každou kategorii uvedeny samostatné indexy, u kterých nelze s jistotou více než 90 % říct, že by byly samostatně horší než použití libovolné

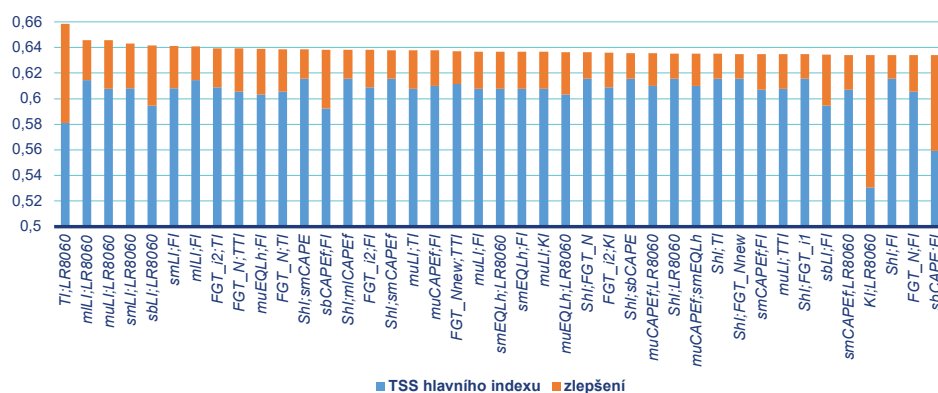
z kombinací indexů. Totéž přirozeně nelze říct o kombinacích těchto indexů s kterýmkoli dalším parametrem. Počet dvojkombinací, neobsahujících výše zmíněné indexy, a přesto se stále vyskytujících v pásmu relevance, se pohyboval řádově v desítkách až stovkách.

Vzhledem k tomu, že signifikantní zlepšení přineslo použití dvou indexů pro předpověď odpoledních bouřek pouze ze sondáží ve 12:00 UTC, zaměřili jsme se dále na tyto situace. Z veličin nezmíněných mezi nejlepšími samostatnými indexy se ve dvojkombinacích v popředí opakovaně objevovaly FI , vertikální gradient teploty mezi hladinami 800 a 600 hPa ($LR8060$) a KI . Pro lepší představu velikosti zlepšení je porovnání nejlepších dvojkombinací se samostatnými indexy zobrazeno v tab. 5. Lze zní například vyčíst, že při situaci s vůbec nejvyšším TSS_{max} (Praha, 30 %) bylo použitím dvou

Tab. 5. Srovnání využití samostatného indexu s použitím kombinace dvou pro předpověď odpoledních bouřek ze sondáže ve 12:00 UTC.

Table 5. Comparison of using a single index versus using a combination of the two for the prediction of afternoon thunderstorms from the 12:00 UTC sounding.

12:00 UTC	Hranice TS_perc	Použité indexy	Vzorec	TSS _{max}	POD	POFD	a – zásah	b – false alarm	c – chyba	d – správné vyloučení
Praha	5 %	1	$ShI \leq 3,3$	61,6 %	82,6 %	21,1 %	1 014	467	213	1 749
		2	$9,7 \cdot LR8060 + TI \geq 81$	65,8 %	80,2 %	14,4 %	984	318	243	1 898
	30 %	1	$MU LI \leq -0,6$	66,8 %	84,7 %	17,9 %	532	505	96	2 310
		2	$7,5 \cdot LR8060 + TI \geq 70$	70,4 %	91,6 %	21,2 %	575	596	53	2 219
Prostějov	5 %	1	$SM EQL \geq 3,9$	60,8 %	86,8 %	26,1 %	1 099	570	167	1 618
		2	$70 \cdot FI + SM CAPE_f \geq -256$	64,4 %	85,6 %	21,3 %	1 110	506	156	1 682
	30 %	1	$i_2 \geq 0,1$	64,0 %	90,3 %	26,3 %	570	742	61	2 081
		2	$8,4 \cdot LR8060 + TI \geq 76$	68,6 %	86,2 %	17,6 %	544	496	87	2 327



Obr. 6 Zlepšení TSS_{max} použitím druhého indexu při předpovědi alespoň ojedinělých bouřek z polední sondáže.

Fig. 6. TSS_{max} improvement using the second index for predicting of at least isolated thunderstorms from the midday sounding.

Tab. 6 Počty kombinací v pásmu relevance a četnost nejlepších vedlejších indexů.

Table 6. The number of combinations in the relevance band and the frequency of the best secondary indices.

	Hranice TS_perc	Kombinací	Hlavních indexů	Výskyt vedlejších indexů		
				LR8060	FI	jiný
Praha	5 %	41	16	7	5	4
	30 %	71	22	18	2	2
Prostějov	5 %	87	16	7	6	3
	30 %	25	13	1	8	4

indexů správně detekováno o 43 více bouřkových situací z celkových 628, ale zároveň se zvýšil počet falešných alarmů o 91 při 2 815 situacích bez bouřek.

Ve čtyřech sledovaných kategoriích (Praha/Prostějov, 5%/30% bouřek) se v pásmu relevance vyskytovalo 25 až 87 kombinací indexů. V kombinaci byl vždy určen jako hlavní ten index, který měl samostatně pro danou situaci vyšší TSS_{max}, index s nižší hodnotou TSS_{max} byl označen jako vedlejší.

Na obr. 6 je jako příklad znázorněno maximální TSS všech 41 kombinací v pásmu relevance pro kategorii Praha, 5%, jako TSS_{max} hlavního indexu a „přidaná hodnota“ získaná použitím indexu vedlejšího. Zde si nejlépe vedl TI index v kombi-

naci s LR8060, další čtyři místa zaujímají různé varianty LI opět spolu s LR8060. Jelikož i v TI indexu figurujícím v neúspěšnější kombinaci je Lifted index zahrnut (viz vzorec (6)), lze říci, že na všech pěti předních místech se vyskytuje kombinace LR8060 a LI.

Vždy bylo sledováno, který vedlejší index byl pro hlavní index nejpřínosnější, souhrn je v Tab. 6. Jako neúčinnější vedlejší indexy se jednoznačně prosadily LR8060 a FI, naopak se neprosadil žádný z indexů popisujících stav větru. Při bližším pohledu na kombinace je patrné, že LR8060 obvykle lépe doplňuje různé varianty LI a EQL, zatímco FI se jeví jako vhodný doplněk pro CAPE. Kombinace LR8060, TI ve třech ze čtyř sledovaných situací vyšla nejlépe, ve čtvrtém případě se ztrátou 0,3% na nejlepší kombinaci indexů. Tuto kombinaci lze tedy považovat za neúspěšnější z hlediska předpovědi odpoledních bouřek z polední sondáže, kdy TSS_{max} dosáhla v průměru hodnoty 67,2%.

Z kombinací indexů, které nepracují s údaji pod hladinou 850 hPa, si nejlépe vedl KI index s LR8060. Pro polední termín ztrácel na kombinaci TI s LR8060 v průměru 2,9%, a v budoucnu by tak tato kombinace mohla upřesnit předpověď odpoledních bouřek na základě sestupových dat z polední sondáže.

5. Závěr

Potvrdily se výsledky předchozí práce, které naznačovaly, že pro předpověď bouřek s delším časovým odstupem od měření jsou parametry vytvořené v 70. letech minulého století

J. Förchtgottem vhodnější než ostatní indexy, a to včetně těch nejmodernějších. Za úspěšné lze považovat zavedení spojitého indexu N^* , vycházejícího z Förchtgottovy čtyřvrstvé metody, který byl v 5 ze 14 sledovaných kombinací času a místa měření sondáže a bouřek nejuspěšnější.

Bylo zjištěno, že započtení latentního tepla tuhnutí při výpočtu CAPE má na předpověď vzniku bouřek prokazatelně pozitivní vliv. Ze zkoumaných variant CAPE je na našem území nejvhodnější využití $MU\ CAPE_f$ a $SM\ CAPE_f$.

Zavedení kombinací indexů nemělo pro předpověď bouřek tak pozitivní vliv, jak autoři očekávali, a ze získaných výsledků ho nelze považovat za statisticky významný s výjimkou předpovědi na odpoledne z polední sondáže. Velmi překvapivé je zjištění, že zohledněním $CINH$ při vyhodnocení CAPE nejen že nedochází ke zlepšení předpovědi, ale pravděpodobnost bouřek při nenulové $CINH$ je dokonce vyšší než bez ní. V budoucnu by bylo vhodné se na vysvětlení tohoto jevu zaměřit blíže, například vyhodnocením odpovídajících synoptických situací.

Pro předpověď odpoledních bouřek lze považovat za neefektivnější lineární kombinaci Thompsonova indexu s gradientem teploty mezi hladinami 800 a 600 hPa. Jako doplňkové indexy, které vylepšují schopnost předpovědi těch nejuspěšnějších, se opakovaně projevovaly právě $LR8060$ a také Faustův index. Ten byl v minulé práci hodnocen jako poněkud zastaralý a zaostávající za těmi moderními. Potvrdilo se, že jeho efektivita samostatně na ty nejlepší nestačí, ale zjevně obsahuje informace, které mohou modernější indexy posunout dále kupředu.

S rostoucí kvalitou dat ze sestupových sondáží bude vhodné se zabývat možnostmi předpovědi bouřek i z těchto dat. Jelikož sestupová data často nedosahují až k povrchu, lze využít stávající indexy, které povrchové informace nevyužívají (nejlépe se v tomto směru jeví kombinace KI a $LR8060$). Bylo by vhodné se též zaměřit na možnosti modifikace dalších úspěšných indexů (např. $CAPE_f$) tak, aby vyžadovaly informace až od hladiny 850 hPa výše.

Naopak pro historické analýzy sondážních měření se jeví jako velmi dobré Förchtgottovy indexy, které nevyžadují vysoké rozlišení sondáže. Nicméně se budeme zabývat i efektivitou použití dalších indexů (LI , $CAPE_f$, EQL) a jejich modifikací při zpracování dat s horším rozlišením.

Literatura:

- BYERS, H. R., BRAHAM, R. R., 1949. The Thunderstorm – Report of the Thunderstorm Project, United States Department of Commerce, Weather Bureau.
- COLBY, F. P., 1984. Convective Inhibition as a Predictor of Convection during AVE-SESAME II. *Monthly Weather Review*, Vol. 112, č. 11. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112%3C2239:CIAAPO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112%3C2239:CIAAPO%3E2.0.CO;2).
- DOSWELL, C. A., BOSART, L. F., 2001. Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. In: *Severe Convective Storms: A Meteorological Monographs*. Oklahoma: American Meteorological Society. ISBN 1-878220-41-1.
- 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 strojepis autora].
- HUNTRIESER, H. H., SCHIESSER, H. H., SCHMID, W., WALDVOGEL, W., 1997. Comparison of Traditional and Newly Developed Thunderstorm Indices for Switzerland. *Weather and Forecasting*, Vol. 12, č. 1, s. 108–125. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0108:COTAND>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0108:COTAND>2.0.CO;2).
- 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*, s. 528–529. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-37.10.528>.
- GEORGE, J. J., 1960. Weather Forecasting for Aeronautics. Waltham: Academic Press, 673 s.
- MARKOVSKI, P., RICHARDSON, Y., 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. *Advancing weather and climate science*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2010. ISBN 978-0-470-74213-6.
- MILLER, R. C., 1972. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 190 s.
- ŘÝVA, D., MOTL, M., 2020. Ověření vybraných indexů stability pro předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. 73, č. 6, s. 167–172.
- SHOWALTER, A. K., 1953. A Stability Index for Thunderstorms Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 34, č. 6, s. 250–252.
- STRACHOTA, J., 1966. Ověření několika metod pro předpověď bouřek v letním pololetí 1965, *Meteorologické zprávy*, roč. 19, č. 3–4, s. 105–110.
- SULAN, J., PEŠICE, P., STAŠA, P., 2004. Výpočet konvekční dostupné potenciální energie CAPE a možnosti jeho využití v provozu ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. 57, č. 3, s. 61–68.
- TÁBORSKÝ, Z., 1966. Porovnání některých metod předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. 19, č. 6, s. 164–171.
- TÁBORSKÝ, Z., 1970. Příspěvek k Faustově metodě pro předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. 23, č. 1, s. 2–7.
- YAODONG, 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. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02915596>.
- ZACHAROV, P., 2004. Diagnostické a prognostické prekurzory konvekce [Diplomová práce]. Praha: Matematicko fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, KMOP, 61 s.
- THOMPSON, R., HART, J., 2023. SPC Experimental Sounding Analysis System [online]. Storm Prediction Center [citováno 24.11.2023]. Dostupné z: <https://www.spc.noaa.gov/exper/soundings/help/index.html>.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Petr Zacharov, Ph.D., RNDr. Petr Pešice, Ph.D.