

MODELOVÁNÍ POTENCIÁLNÍCH DOPADŮ ZPŮSOBENÝCH VÝSADBOU STROMŮ V ULICÍCH MĚST

Jan Geletič, Martin Bureš, Pavel Krč, Jaroslav Resler, Hynek Řezníček, Mária Kazmuková, Andrea Šipanová

Město v čase klimatické změny – jedna z neaktuálnějších a patrně nejsložitějších výzev, které musí místní samosprávy čelit. Ačkoli v poslední době vzniklo velké množství adaptačních strategií a klimatických plánů, mají mnohé společný výsledek; nejjednodušší a ekonomicky nejvýhodnější řešení představuje městská zeleň, především stromy. Zeleň ve veřejném prostoru je vnímána jako zásadní prvek tváře měst a její vlastnosti jsou veřejností automaticky přijímány jako pozitivní. Možné negativní vlivy zeleně v městském prostoru, mimo případné alergie, v úvahách urbanistů prakticky nejsou vůbec reflektovány. Ovlivnění prostředí stromy v ulicích měst, a to jak pozitivní, tak i negativní, ovšem představuje významný důsledek adaptačních politik, stejně jako s tím spojené náklady na péči. Pro posouzení potenciálního dopadu výsadby stromů na podmínky v rámci ulice mohou být použity nově vyvíjené a validované výsledky mikroklimatických modelů. Díky vysoké úrovni detailu mohou poskytnout nový pohled na procesy v uličním kaňonu a přinést novou perspektivu pro komplexní posouzení adaptačních opatření. Příspěvek si klade za cíl: I) vysvětlit a shrnout základní principy a rozdíly mezi modely; II) popsat přímé a nepřímé vazby mezi proměnnými a III) interpretovat nejnovější poznatky o pozitivních i negativních vlivech zeleně v uličním prostoru na příkladu dvou scénářů v Praze-Dejvicích.

Klíčová slova: klimatická změna, městská zeleň, tepelný ostrov, mikroklimatické modely

Úvod

Lidská činnost v oblasti sídel do značné míry ovlivňuje okolní klimatické podmínky. Moderní věda hovoří o tzn. klimatu měst, případně o městském klimatu. Významný faktor městského životního prostředí představují (bio)klimatické podmínky. Pravděpodobně nejznámějším a nejpodrobněji prostudovaným projevem klimatu města je tzv. efekt tepelného ostrova. Tepelný ostrov města je definován jako oblast zvýšené teploty vzduchu v přízemní a mezní vrstvě atmosféry (vrstva dosahující, dle meteorologických podmínek, výšky od desítek metrů až po více než dva kilometry, kde je proudění ovlivňováno zemským povrchem) nad městem anebo průmyslovou aglomerací ve srovnání s okolní krajinou [Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2022]. Projevy tepelného ostrova jsou v dnešní době navíc umocňovány projevem klimatické změny; společně s rokem 1998 patří období 2000–2021 v Evropě mezi nejteplejší roky v historii měření [Copernicus Climate Change Service, 2022], zároveň období 2015–2021 představuje sedm nejteplejších let v Evropě vůbec.

V důsledku klimatické změny obyvatelé měst čelí rizikům souvisejícím s rostoucím počtem horkých dnů a s růstem

pravděpodobnosti opakování (z hlediska délky i teploty) významných horkých vln [Gasparrini et al., 2017; Vicedo-Cabrera et al., 2021; IPCC, 2022]. Městská zástavba se navíc stále výrazněji rozšiřuje do okolní krajiny [Ouředníček et al., 2013], což ve spojení s vysokým podílem městského obyvatelstva rovněž přispívá ke zvýšení zranitelnosti populace.

K hodnocení zdravotního stavu obyvatel měst se v posledních letech začíná prosazovat komplexněji pojatý koncept tepelného komfortu, který zohledňuje nejen teplotu vzduchu a bioklimatické faktory (tepelné a sluneční záření, vlhkost vzduchu, proudění vzduchu), ale i fyziologické a psychologické faktory [Lehnert et al., 2021]. K vyjádření tepelného komfortu se v praxi používají tzv. biometeorologické indexy, které, obecně vzato, indikují míru tepelného zatížení člověka. UTCI, neboli *Universal Thermal Climate Index* (univerzální index tepelného komfortu), je jedním z celosvětově nejpoužívanějších indexů [Fiala et al., 2012] a jediný, který má „otevřený“ (tzn. jasně popsáný) vzorec pro výpočet. Druhý nejpoužívanější index představuje PET (fyziologicky ekvivalentní teplota) [Walter a Goestchel, 2018]. Jiným známým projevem klimatu měst je zhoršená kvalita ovzduší, velmi často spojovaná s intenzivní automobilovou dopravou. Zejména během období zimních smogových situací se začíná uvažovat o nejrůznějších opatřeních, jak snížit koncentrace znečišťujících látek v ovzduší; od zákazů vytápění tuhými palivami až po zákaz provozu automobilů v určitých zónách nebo omezení podle sudého či lichého čísla registrační značky [MHMP, 2022]. Obdobně závažné jsou letní epizody vysokých koncentrací přízemního ozonu, které se navíc často časově kryjí s epizodami veder.

Oba zmíněné problémy či specifika klimatu města, nadměrné teplo a zhoršená kvalita ovzduší, jsou charakteristické svou vysokou časoprostorovou variabilitou. Ta je, kromě vlivu reliéfu, mezklimatu a makroklimatu, dána zejména specifickými radiačními a tepelnými vlastnostmi povrchů a městské vegetace [Geletič et al., 2021]. Radiační a tepelné vlastnosti povrchů ovlivňují nejen teplotní podmínky města, jak lze snadno předpokládat, ale i proudění vzduchu v ulicích [Resler et al., 2021]. Projevuje se přitom i vliv velmi malých částí povrchu ulic či budov v mikroklimatickém měřítku, rozměrem typicky v jednotkách či desítkách metrů.

Ve své podstatě se jedná o extrémně složitý systém vzájemných vazeb, které je nezbytné řešit pomocí komplexních

numerických modelů. Složitost vazeb v měřítku ulice je vhodné ilustrovat na jednom z nejpobulárnějších opatření ke zmírnění negativních dopadů klimatické změny, kterou představuje tzv. zelená infrastruktura – zejména výsadba vzrostlé zeleně.

Metodika

Pro získání relevantních a komplexních informací ve složitém městském prostředí je nezbytné modelovat všechny procesy související s městským mikroklimatem ve velké úrovni detailu, ideálně v prostorových měřících v řádech nízkých jednotek metrů. Pro detailní simulace na úrovni ulic se v současnosti používají tzv. výpočtové modely dynamiky tekutin (z angl. *Computational Fluid Dynamics* – CFD). Ty se dále dělí podle principu použitého pro výpočet turbulentního proudění na dvě nejpoužívanější metody: 1) RANS (Reynoldsovsky-průměrované Navier-Stokesovy rovnice; z anglického *Reynolds Averaged Navier-Stokes*); 2) LES (simulace velkých vírů; z anglického *Large-Eddy Simulation*). Pro úplnost lze uvést, že existuje i třetí metoda DES (simulace vzdálených vírů; z ang. *Detached Eddy Simulation*), což je výpočetně extrémně náročná kombinace obou předchozích metod. Mezi modely typu RANS patří například modely MUKLIMO_3, ENVI-met nebo SOLENE-microclimat, mezi LES patří zejména modely PALM nebo uDALES [Geletič et al., 2021]. Pro následující text je velmi důležité vysvětlit rozdíl mezi oběma metodami; metoda RANS využívá statistického přístupu a simuluje pouze střední hodnoty veličin s tím, že turbulence je kompletně parametrizována. Tento přístup navržený Reynoldsem využívá podobnosti turbulentního a chaotického molekulárního přenosu hybnosti. Problém je, že tento přístup je nepřesný a výsledky jsou silně závislé na přesnosti parametrizace turbulentního proudění. LES metody vycházejí z poznání, že hybnost, hmotu, energii a další veličiny v přízemní vrstvě atmosféry zásadně ovlivňují tzv. velké víry. Jde o prostorově a časově závislé útvary, proto je můžeme s pomocí dostatečně husté pravidelné trojrozměrné sítě explicitně modelovat a násled-

ně předvídat jejich chování. Na rozdíl od RANS se turbulentní víry modelují přímo, avšak jen pokud jsou dostatečně velké. Pod určitou hranici velikosti (odpovídajících rozlišení modelu) se víry s pomocí filtrace turbulentního pole odstraní a jejich vliv se modeluje tzv. subgridovými modely. Rozdíly mezi RANS a LES mají dva nejvýznamnější důsledky: 1) RANS modely mají velmi omezené schopnosti simulovat detaily turbulence v městských prostorách a 2) kvůli průměrování se RANS nehodí pro detailní a komplexní simulace. Modely LES naopak vyžadují jemnou síť a relativně krátký časový krok výpočtu, z čehož vyplývá, že jsou náročné na výpočetní výkon. Simulace obvykle probíhají na superpočítačích nebo rozsáhlých výpočetních clusterech schopných zpracovat takto rozsáhlé úlohy. Pro účel studie byl použitý LES model PALM; podrobněji např. [Maronga et al., 2020] nebo [Resler et al., 2021].

Vedle proudění musí mikroklimatický model přesně simulovat energetické procesy, které se odehrávají v městské mezní vrstvě atmosféry. Jde např. o interakce slunečního světelného a tepelného záření s povrchy ulic, s domy a se stromy, o akumulaci a uvolňování tepla zdi budov i dalšími materiály a o energetickou bilanci budov [Krč et al., 2021]. Význam implementace energetických procesů v městském prostředí názorně analyzuje [Salim et al., 2022]. PALM, který se stal prvním modelem metody velkých vírů se schopností detailního zachycení energetických procesů v městském prostředí [Maronga et al., 2020], v současné době představuje pravděpodobně nejkomplexnější městský mikroklimatický model [Geletič et al., 2021].

Pro ověření, že model poskytuje správné výsledky, je nutné výsledky simulace porovnat s měřeními. Standardní meteorologická měření nemají dostatečné časoprostorové rozlišení k ověřování městského modelu s takto jemným rozlišením, navíc jsou často lokalizovaná mimo městskou zástavbu. Proto se organizují speciální měřicí kampaně navržené unikátně pro účely validace. Jedna z nich se konala v létě a na podzim roku 2018 v Praze-Dejvicích [Resler et al., 2021], další kampaň aktuálně probíhá v oblasti ulic Legerova a Sokolská (Pra-

ha). Obdobné kampaně proběhly např. v Berlíně či Hamburku. Bez relevantní validace výsledků mohou být výsledky modelu značně zavádějící, případně mohou poskytovat nesmyslné výsledky. Pokud jsou výsledky simulace validovány a model je kalibrován, je snadné použít data jako podklady pro scénáře; například pro simulaci různých variant výsadby nových stromů, změny barev a typů povrchů apod.

Díky detailnímu radiačnímu modulu je možné simulovat všechny podstatné procesy v uličním kaňonu; například množství odraženého záření od stěn budov, záření pohlčené stěnami budov nebo korunami stromů, energetické vlastnosti povrchu ulice (vliv barev a materiálů na energetickou bilanci povrchu) apod. Detailní znalost radiačních procesů je nezbytná i pro správnou simulaci turbulentního proudění. Hlavní složka je sice dána regionálními meteorologickými podmínkami, ale tvar, drsnost a ostatní vlastnosti uličního kaňonu, zejména stromy a budovy, proudění významně modifikují stejně jako tepelné toky z těchto objektů [Resler et al., 2017].

Efekt vlivu stromů je popsán na příkladu okolí Vítězného náměstí v pražských Dejvicích, jelikož se jedná o velmi podrobně zvalidovanou doménu; podrobný popis výsledků je uveden v [Resler et al., 2021]. V rámci modelové studie bylo na území navrženo vysazení více než 500 vzrostlých listnatých nebo jehličnatých stromů (obr. 01a). Pro hodnocení vlivu výsadby byla využita horká vlna v roce 2019 (23.–26. července), přesněji se jednalo o nejteplejší den roku 2019 (25. července). Zvolená epizoda poskytuje informaci o maximálním vlivu vegetace v uličním kaňonu během typické vlny veder, kdy se očekává největší přínos stromů. Oba scénáře byly porovnány se základní simulací, která reflektuje současný stav výsadby. Vítězného náměstí v Dejvicích je tvořeno dvěma hlavními ulicemi: východozápadně orientovaná ulice Československé armády / Evropská a severojižně orientovaná ulice Jugoslávských partyzánů / Svatovítská. Širší okolí je známé jak intenzivní dopravou, tak plánovanými developerskými projekty. Zároveň se vlivem přítom-

ných vysokých škol a kancelářských budov v okolí pohybuje značné množství lidí.

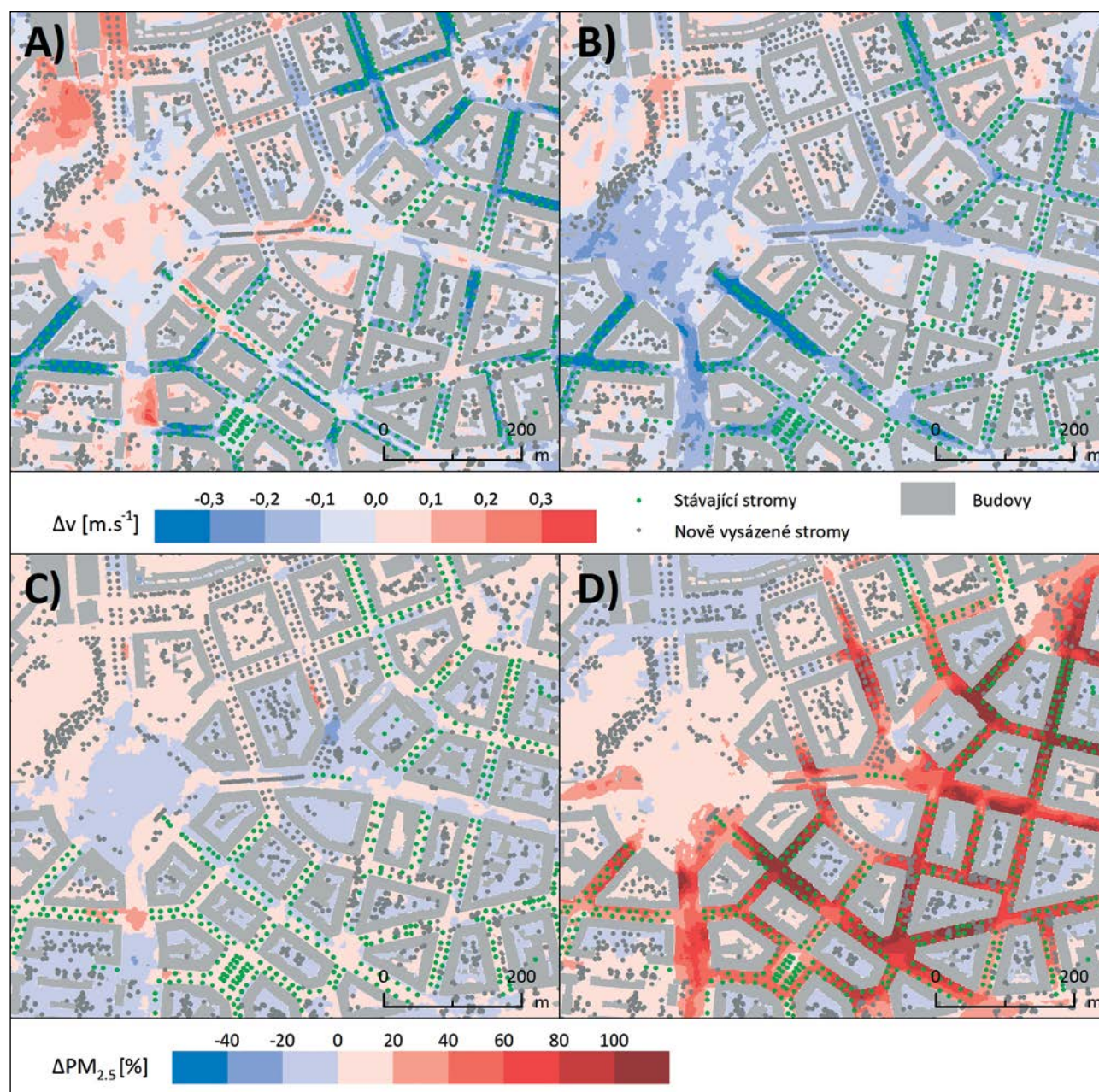
Výsledky

Stromy ovlivňují prostor ulice svou základní funkcí – zastíňují povrch a transpirují. To vede ke změnám energetické bilance povrchů a souvisejícím změnám „teplot“. Nicméně větve stromů zároveň přispívají ke změnám proudění vzduchu, převážně jeho zpomalení. Díky použití LES modelu je možné relevantně

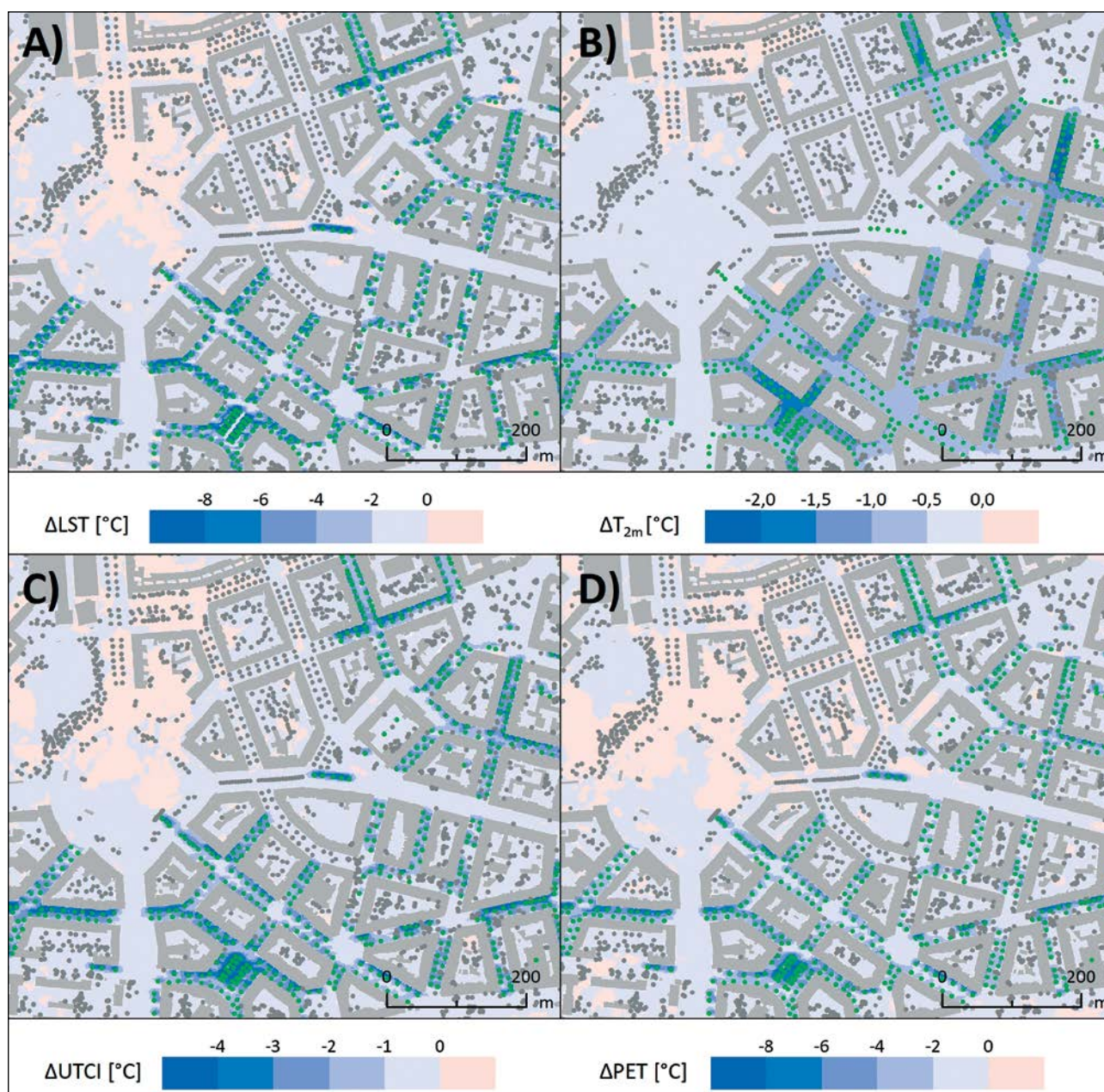
vyhodnotit vliv proudění, které představuje nejvýznamnější faktor pro šíření znečištění ovzduší v uličním kaňonu (mimo samotné producenty znečišťujících látek). V první části budou popsány důsledky změn energetické bilance a jejich vliv na proudění, které nejsou všeobecně známé. Ve druhé části bude popsán vliv na stromů „teploty“.

V částech uličního kaňonu, kde jsou po obou stranách budovy, obvykle vzniká vír podobný konvektivní buňce. V letním období se u jižně orientovaných – osluněných – stěn přehřívá povrch ulice

a zdí, podél kterých začne teplý vzduch stoupat vzhůru. Naopak na zastíněné straně ulice často dochází k sestupnému pohybu vzduchu, a tím k tvorbě víru v ulici. Pokud nad úroveň střech fouká silnější vítr, ten také zásadně ovlivňuje tvorbu víru v uličním kaňonu a tyto dva jevy spolu mohou „soupeřit“, nebo se naopak vzájemně posílit. Vzniklé víry jsou často výrazně ovlivněny stromy nebo vlastnostmi fasád, takže výsledný vír nemusí být jen jeden. Takto vzniklý vír přitom hraje klíčovou roli při transportu oxidů dusíku (NO , NO_2) a prachových částic ($\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10}), např. z dopravy.



Obr. 01: Změna průměrné rychlosti větru ve výšce 10 m díky výsadbě listnatých stromů (stávající výsadba jsou šedé body, nová výsadba je zeleně) v Dejvicích mezi 9–10 h (a) a 21–22 h (b) včetně vlivu na průměrné hodinové relativní koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ (c, d). Výsledky se vztahují ke dni 25. 7. 2019, nejteplejšímu dni roku 2019.



Obr. 02: Průměrné denní difference povrchové teploty (LST; a), teploty vzduchu (b) a biometeorologických indexů UTCI (c) a PET (d) pro scénář reflektující výsadbu nových listnatých stromů. Výsledky se vztahují ke dni 25. 7. 2019, nejteplejšímu dni roku 2019.

Pokud vír v ulici funguje „správně“, pomáhá zlepšovat kvalitu ovzduší; přenáší totiž znečišťující látky ven z uličního kaňonu nad střechy domů. Stromy svými korunami proudění zpomalují. Zachycují sice část znečištění na svých listech, vedle toho ale kvůli snížení proudění přispívají k hromadění dopravních emisí v uličním kaňonu. Jsou-li stromy blízko u sebe, jejich koruna vytvoří „zelenou pokličku“, což vede k významnému zvýšení koncentrací znečišťujících látek. Pokud bychom například zmíněnou ulici Evropská osadili hustou stromovou alejí, v případě

PM_{2,5} by se průměrná relativní denní koncentrace zvýšila o více než 30 % (+32,2%). Roli by samozřejmě hrál i způsob výsadby; jedna řada stromů uprostřed ulice (+7,5 %) má jiný efekt než dvě řady po jejích stranách (+18,6 %). Stejný efekt je patrný i v hustě zastavěných oblastech okolo Vítězného náměstí, kde vliv stromů nemusí být na první pohled zřejmý (obr. 01a, b). Je nutné vzít v úvahu, že efekt se v čase a prostoru mění – významně negativnější bude v časech intenzivní dopravy (ranní a odpolední špička; viz obr. 01c, d) nebo v období krátce po západu slunce.

Podstatnou roli hrají i vlastnosti stromů; výška a šířka stromu, tvar koruny nebo hustota jejího olistění. Například průměrný denní relativní nárůst koncentrací PM_{2,5} činí „pouze“ +2,1 % (listnaté), respektive +1,8 % (jehličnaté). Je nutné dodat, že se jedná o průměry za celou oblast. Uvážíme-li ale pouze lokality v místech výsadby stromů, činí průměrný denní nárůst více než +13,5 %. Vliv stromů je patrný i ve větších vzdálenostech od jejich kmenu (nárůst průměru v kruhu o poloměru 10 m je dokonce 15,8 %). Stále jde ale o průměry; vezmeme-li v úvahu maximální hodnoty

v místech výsadby, tak interval nárůstu průměrných hodinových koncentrací je mezi 56,9–372,6 % u listnatých a mezi 55,3–290,6 % u jehličnatých (tzn. průměrné hodinové maximální koncentrace mohou být o polovinu až trojnásobek vyšší). Lze konstatovat, že při analýze vlivu výsadby vegetace je nutné uvažovat širší okolí výsadby. Nicméně oblast nesmí být příliš velká, jinak může dojít nevhodnou interpretací ke zkrácení výsledků. Dodejme ještě, že se jedná o extrémní případ výsadby (množství nově vysazených stromů pro modelovou simulaci v dané oblasti není reálné z různých důvodů vysadit) ukazující, jaké jsou trendy chování systému.

Vliv stromů na „teplotu“ je vhodné analyzovat z širšího hlediska. Základem pro analýzu je uvědomění si rozdílů mezi povrchovou teplotou, teplotou vzduchu a pocitovou teplotou; podrobněji viz [Geletič et al., 2020]. Stromy svými korunami stíní povrch ulice, čímž významně snižují povrchovou teplotu. Průměrné denní snížení povrchové teploty přímo pod korunami činí 17,2 °C u listnatých a 17,4 °C u jehličnatých stromů (pozn.: hodnoty pro jehličnaté stromy dále budou v závorkách). Maximální rozdíly povrchové teploty jsou kolem poledne, přičemž mohou dosáhnout až 33,1 (32,2) °C. Nicméně vliv korun stromu je – díky stínu – vázán čistě na jeho nejbližší okolí; průměrné denní snížení povrchové teploty v okruhu 10 m od kmene stromu činí „pouze“ 3,6 (3,1) °C. Průměrné snížení povrchové teploty za celou sledovanou oblast je pro oba typy stromů prakticky shodné, 0,2 °C (obr. 02a).

Povrchová teplota pochopitelně souvisí s teplotou vzduchu, i když jejich vztah není triviální. Správně fungující vegetace navíc dále snižuje teplotu vzduchu prostřednictvím odpařování vody – evapotranspirace. Výsadba stromů by mohla v některých místech pod stromy skutečně snížit teplotu vzduchu až o více než 5 °C. Takováto změna je ale, podobně jako maxima v případě povrchové teploty, opravdu výjimečná. Musí být splněna ideální kombinace vlivů několika faktorů, jako jsou např. barvy zdi a povrchů, odrazy od oken, stín koruny atd. Pokles teploty vzduchu je zpravidla mírný, v rámci studie se průměrná denní teplota vzduchu

přímo pod stromy v průměru snížila o 1,1 (0,9) °C, v okolí o 10 m poloměru o 0,8 (0,7) °C a o 0,2 (0,1) °C v rámci celé domény (viz obr. 02a). Průměrné denní snížení teploty vzduchu je na obr. 02b. Potenciální vliv stromů na snížení teploty vzduchu v celé doméně je sice velmi malý, přesto pozorovatelný.

Teplota vzduchu společně se střední radiační teplotou představuje jednu ze vstupních veličin pro výpočet biometeorologických indexů UTCI a PET. Významnou roli představuje, podobně jako u povrchové teploty, množství dopadajícího záření na povrch ulice, přesněji na člověka jdoucího po ulici. Výsadba stromů může vést ke snížení UTCI přímo pod stromem až o 15,1 °C (maximum se neliší), denní průměrné snížení činí pro oba typy stromů 2,8 °C. Pro okolí o poloměru 10 m od stromu se UTCI snižuje o 2,2 (1,9) °C a v celé oblasti o 0,4 (0,3) °C (obr. 02c). Podobné výsledky vykazuje index PET; maximální snížení sice dosahuje 29,3 (29,9) °C, ale průměrné denní snížení přímo pod stromy činí 4,6 (4,5) °C. V 10m okolí stromu je průměrné denní snížení 3,5 (2,9) °C a průměry za celou doménu jsou stejné, 0,2 °C (obr. 02d). Snížení UTCI i PET je vázáno na daný strom a jeho nejbližší okolí.

Závěr

Srovnávací studie mezi základní simulací a scénáři s výsadbou vzrostlých stromů si klade za cíl popsat „maximální“ reálný vliv stromů v uličním kaňonu za současných klimatických podmínek. Hustá výsadba stromů může vést ke snížení pocitové teploty až o 15 °C, pokles povrchové teploty může dosáhnout i několika desítek stupňů. Obě charakteristiky jsou přímo ovlivněny množstvím dopadajícího slunečního záření, takže nejvýraznější efekt je vázán striktně na okolí nově vysazených stromů. Projev se významně liší od teploty vzduchu, jejíž pokles je řádově nižší, pohybuje se okolo 1 °C. Snížení teploty vzduchu má ale efekt i na širší okolí výsadby, lze tedy hovořit o místním ochlazujícím efektu stromů. Na rozdíl od pozitivního vlivu na „teploty“ mohou mít stromy negativní vliv na znečištění ovzduší; v extrémních případech může dojít – v místním měřítku – k významnému nárůstu kon-

centrací znečišťujících látek. Nárůst je pochopitelně závislý na intenzitě dopravy v místech plánované výsadby, stejně jako na množství, umístění a vlastnostech vysazené zeleně. V neposlední řadě je nezbytné zmínit, že analyzované výsledky představují potenciálně maximální účinky, které se budou v průběhu roku významně měnit.

Složitost a různorodost městského prostředí neumožňuje poskytnout obecné návody, jako například kdy, kam a jaké stromy vysazovat, přesněji řečeno podobná doporučení budou mít vždy jen velmi omezenou platnost. Studie potvrzuje, že mikroklimatické modely mohou představovat významný nástroj pro moderní a komplexní městské plánování. Díky pokročilým možnostem parametrizace modelu je možné uvažovat velké množství proměnných, které lze v městských prostorách očekávat (např. simulaci efektů stromů v průběhu jejich růstu, volbu různých parametrů koruny stromů, jejich výšky, množství listů, dostupné vláhy atd.). Zároveň je nezbytné již od samotného počátku úvah o využití mikroměřítkových modelů mít na paměti, zda-li je model schopen poskytnout relevantní informace a umí-li vůbec danou problematiku řešit (viz rozdíly mezi RANS a LES přístupem, zejména v případě analýz vlivu stromů na proudění). Ideálně by měla být každá studie validována, ale tento požadavek klade další finanční nároky na účelové měřicí kampaně. Minimálním požadavkem ze strany zadavatele by tedy měla být aspoň validace modelu v obdobných podmínkách ve městě, kde je studie zamýšlena. Validace z jiných měst totiž nemusí reflektovat specifika daného charakteru městského prostoru a lokálních klimatických podmínek.

Využití modelovacích nástrojů, které se soustředí zejména na fyzikální a chemické procesy spojené s funkcí stromů v ulicích měst, ovšem přináší i určitá omezení. Na reálnou funkci stromu má nejdůležitější vliv jeho nejbližší okolí, kdy například výsadba jednoho stromu v aleji nebo hustě osazené ulici nemusí znamenat významnou změnu. Podobný efekt může mít výsadba stromu poblíž vysokých budov, kdy je ulice zpravidla již zastíněna okolními budovami a vliv stromu je omezený pouze na dobu, kdy

na něj dopadají sluneční paprsky. Příkladem maximálního efektu může být nová výsadba stromů v otevřených prostranstvích. V neposlední řadě je nutné zvážit všechny další faktory, které jsou unikátní pro každou lokalitu, jako je intenzita dopravy, prostor pro prosperitu stromu (prostor pro kořenový systém a růst) nebo podmínky pro optimální plnění funkcí (zejména dostupnost vláhy).

Závěrem lze konstatovat, že stromy mají ve městech nezastupitelnou roli a jsou důležité při městském plánování. Při plánování konkrétní výsadby v dané lokalitě je ovšem vhodné zvážit jejich množství, druh, umístění i podmínky tak, aby byly optimalizovány pozitivní efekty a minimalizovány dopady negativní.

Použité zdroje:

Copernicus Climate Change Service [on-line]. Shinfield, Reading, United Kingdom | Bologna, Italy: Copernicus Climate Change Service, 2022 [cit. 28. 4. 2022]. Dostupné z: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>.

Magistrát HMP [on-line]. Praha: Magistrát hlavního města Prahy, 2022, verze b9bf8160 [cit. 2. 5. 2022]. Dostupné z: <https://bezpecnost.praha.eu/clanky/smogova-situace/>.

FIALA, D., HAVENITH, G., BRÖDE, P. et al. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. In: *International Journal of Biometeorology*. 2012, roč. LVI, s. 429–441. ISSN 0020-7128.

GASPARRINI, A., GUO, Y., SERA, F. et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. In: *The Lancet*

Planetary Health. 2017, roč. IX, č. 1, s. 360–367. ISSN 2542-5196.

GELETIČ, J., LEHNERT, M., RESLER, J. et al. Teplota ve městě: přehled používaných termínů a jejich rozdíly. In: *Urbanismus a územní rozvoj*. 2020, roč. XXIII, č. 4, s. 17–21. ISSN 1212-0855.

GELETIČ, J., LEHNERT, M., KRČ, P. et al. High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic. In: *Atmosphere*. 2021, roč. XII, č. 2, s. 175. ISSN 2073-4433.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2022.

KRČ, P., RESLER, J., SÜHRING, M. et al. Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0. In: *Geoscientific Model Development*. 2021, roč. XIV, č. 5, s. 3095–3120. ISSN 1991-9603.

LEHNERT, M., BRABEC, M., JUREK, M. et al. The role of blue and green infrastructure in thermal sensation in public urban areas: A case study of summer days in four Czech cities. In: *Sustainable Cities and Society*. 2021, č. 66, 102683. ISSN 2210-6707.

MARONGA, B., BANZHAF, S., BURMEISTER, C. et al. Overview of the PALM model system 6.0. In: *Geoscientific Model Development*. 2020, roč. XIII, č. 3, s. 1335–1372. ISSN 1991-9603.

Meteorologický slovník výkladový a terminologický [on-line]. Praha: Česká meteorologická společnost, 2022 [cit. 28. 4. 2022]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>.

OUŘEDNÍČEK, M., ŠPAČKOVÁ, P., NOVÁK, J. et al. *Sub Urbs: krajina, sídla a lidé*. 1. vyd. Praha: Academia, 2013. 200 s. ISBN 978-80-200-2226-4.

RESLER, J., KRČ, P., BELDA, M. et al. PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. In: *Geoscientific Model Development*. 2017, roč. X, č. 10, s. 3635–3659. ISSN 1991-9603.

RESLER, J., EBEN, K., GELETIČ, J. et al. Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic. In: *Geoscientific Model Development*. 2021, roč. XIV, č. 8, s. 4797–4842. ISSN 1991-9603.

SALIM, H. M., SCHUBERT, S., RESLER, J. et al. Importance of radiative transfer processes in urban climate models: a study based on the PALM 6.0 model system. In: *Geoscientific Model Development*. 2022, roč. XV, č. 1, s. 145–171. ISSN 1991-9603.

VICEDO-CABRERA, A. M., SCOVRONICK, N., SERA, F. et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. In: *Nature Climate Change*. 2021, roč. XI, s. 492–500. ISSN 1758-6798.

WALTHER, E., GOESTCHEL, Q. The P.E.T. comfort index: Questioning the model. In: *Building and Environment*. 2018, č. 137, s. 1–10. ISSN 0360-1323.

Mgr. Jan Geletič, Ph.D.

✉ geletic@cs.cas.cz

Ing. Martin Bureš

✉ buresm@cs.cas.cz

Mgr. Pavel Krč, Ph.D.

✉ krc@cs.cas.cz

RNDr. Jaroslav Resler, Ph.D.

✉ resler@cs.cas.cz

Mgr. Hynek Řezníček

✉ reznicek@cs.cas.cz

Oddělení složitých systémů

Ústav informatiky Akademie věd ČR

Ing. Mária Kazmuková

✉ maria.kazmukova@praha.eu

Odbor ochrany prostředí

Ing. Andrea Šipanová

✉ andrea.sipanova@praha.eu

Oddělení ochrany ovzduší

Magistrát hlavního města Prahy

ENGLISH ABSTRACT

Modeling of the potential impacts caused by newly planted trees in street canyons, by Jan Geletič, Martin Bureš, Pavel Krč, Jaroslav Resler, Hynek Řezníček, Mária Kazmuková and Andrea Šipanová

Cities in times of climate change – one of the most current and probably the most complex challenges that local governments have to face. Although a large number of adaptation strategies and climate plans have emerged recently, many have a common outcome; the simplest and most economically advantageous solution is urban greenery, especially trees. Urban greenery in public space is perceived as an essential element of cities and its impacts are automatically accepted by the public as positive. The negative effects of greenery in the urban environments, apart from possible allergies, practically are not reflected or considered by urban planners at all. However, the environmental impact of trees in city streets, both positive and negative, represents a significant consequence of adaptation policies, as well as their cost-benefit ratio. The results of newly developed and validated microclimate models can be used to assess the potential impact of tree planting on pedestrian level. Due to the high level of detail, they can provide a new insight into the processes in the street canyon and bring a new perspective for a comprehensive assessment of adaptation measures. The paper aims to: I) explain and summarize the basic principles and differences between the models; II) describe the direct and indirect links between the variables and III) interpret the latest knowledge about the positive and negative effects of greenery in the street space on the example of two scenarios in Prague-Dejvice.