

مطالعه موردی جزیره گرمایی تهران و شبیه‌سازی عددی آن

عباس رنجیرسعادت‌آبادی^{*}، مجید آزادی^{**}، عباسعلی علی‌اکبری‌بیدختی^{***} و سیدعلیرضا صادقی‌حسینی^{***}

^{*} سازمان هواشناسی کشور، تهران - صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۹۶۵
^{**} پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران - صندوق پستی ۴۶۱-۱۳۱۸۵
^{***} مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۸۲۷/۱، پذیرش مقاله: ۸۴۳/۱۰)

چکیده

در این مطالعه جزیره گرمایی تهران با استفاده از یک مدل منطقه‌ای محدود برای پیش‌بینی عددی وضع هوا، موسوم به مدل MMS شبیه‌سازی شده است. برای این منظور سه دامنه با تفکیک افقی ۹، ۲۷ و ۳ کیلومتر در نظر گرفته شد. مدل MMS برای ۲ روز مختلف، یکی در زمان استقرار توده هوای قاره‌ای قطبی (توده هوای سرد) و دیگری در زمان استقرار توده هوای قاره‌ای (توده هوای گرم) اجرا و خروجی‌های دامنه با درجه تفکیک زیاد یعنی ۳ کیلومتر، طی یک دوره پیش‌بینی ۲۴ ساعته بررسی شدند. پیش‌بینی‌های مدل با مقادیر دیدبانی شده سمت و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و دما در ارتفاع ۲ متری سطح زمین در ایستگاه‌های هواشناسی مهرآباد، اقدسیه و جیتگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که الگوی میدان باد و دمای پیش‌بینی شده با مقادیر متناظر دیدبانی شده در این ایستگاه‌ها از سازگاری قابل قبولی برخوردار است. بنابراین در صورت پیش‌بینی میدان‌های دما و باد، امکان پیش‌بینی آلودگی هوای تهران نیز می‌تواند فراهم شود. همچنین نتایج حاصله از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در زمان استقرار توده هوای سرد، جزیره گرمایی به خوبی در نیمه شمالی تهران تشکیل می‌شود و از شدت بیشتری نیز برخوردار است، در حالی که در زمان استقرار توده هوای گرم، امکان تشکیل و توسعه جزیره گرمایی در ساعات شب به خوبی فراهم نمی‌شود و در نتیجه جزیره گرمایی از شدت ضعیفی برخوردار است. همچنین تغییرات آهنگ‌های سرمایش در شب می‌تواند سبب ایجاد گردش‌های حرارتی شود، که این گردش‌ها از افزایش شدت جزیره گرمایی جلوگیری می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: جزیره گرمایی، شبیه‌سازی عددی، مدل MMS

۱ مقدمه

ذرات معلق و تلاطم و اغتشاش در اثر وجود ساختمان‌ها، سبب گرم‌تر شدن محیط‌های شهری نسبت به حومه می‌شود و جزیره‌های گرمایی را به وجود می‌آورد. ویژگی مهم و سیمای مشترک پدیده جزیره گرمایی عبارت از افزایش دمای هوا در محیط‌های شهری نسبت به حومه است (اکه، ۱۹۷۳). همچنین گرادیان‌های افقی دمایی شدیدی گاهی در مرزهای بین این جزیره‌ها و مناطق اطراف آنها ایجاد می‌شود. این گرادیان‌ها در اثر اختلاف بین کمیت‌هایی از قبیل ظرفیت گرمایی، سپیدایی، آهنگ‌های سرمایش و گرمایش و ناهمواری‌های سطح زمین بین مناطق شهری و اطراف آن به وجود می‌آیند. جزایر حرارتی برای برطرف کردن سکون آلودگی هوا در

در دهه‌های اخیر، شهرنشینی و رشد سریع صنعتی شدن سبب آزاد سازی انرژی گرمایی زیاد و افزایش آلودگی هوا در ترازهای پایین جو شده و در نتیجه تغییرات زیادی را در کمیت‌های هواشناسی لایه مرزی جو شهری ایجاد کرده است. اثرات محیط‌های شهری روی جو و لایه مرزی آن بیشتر به صورت جزیره‌های گرمایی ظاهر می‌شود و این جزیره‌ها معمولاً با سطح مجزایی که شار گرمایی بیشتری از محیط اطرافشان دارند، مشخص می‌شوند. بنابراین عواملی از قبیل منابع گرمایی اضافی حاصل از احتراق مواد سوختی، تغییر در ویژگی‌های سطح زمین (که سبب تغییر خواص گرمایی و مقدار تبخیر سطحی می‌شود)، تغییر بودجه تابشی به موجب آلاینده‌ها و

محدوده‌های مرکزی شهری مفید، ولی برای حومه شهرها که آلاینده‌ها به آن‌جا هدایت می‌شوند مضر است.

جدزلمن و همکاران (۲۰۰۳) جنبه‌های میان مقیاس جزیره گرمایی نیویورک را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بیشترین شدت جزیره گرمایی در شب و تحت شرایط استقرار مرکز توده هوای سرد همراه با آسمان صاف و وزش بادهای ملایم شمال‌غربی روی می‌دهد. لین و اسمیت (۱۹۸۶)، جانسون (۱۹۸۵)، اکه و ماکسول (۱۹۷۵)، لی (۱۹۷۹) و اکه و ایست (۱۹۷۱) جزیره گرمایی را از نظر دینامیکی مطالعه کردند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که آهنگ‌های سرمایش در سطح شهر و روستا حدود ۲ ساعت قبل از غروب منفی می‌شود در حالی که شدت جزیره گرمایی مثبت می‌شود و در حدود نیمه شب یا ۳ تا ۵ ساعت بعد از غروب به مقدار بیشینه می‌رسد. دیلیچ و تیلور (۱۹۷۰) با استفاده از مدلی دو بعدی، گردش‌های ناشی از جزیره گرمایی شهری را در شرایط نبود بادهای همدیدی بررسی کردند. کینوشی و یاشیتانی (۲۰۰۱) با استفاده از مدل منطقه‌ای میان‌مقیاس MMS، جزیره گرمایی توکیو را با امکان افزایش گرمای دست‌ساز بشر، پوشش گیاهی و سطح آب شبیه‌سازی کردند. مطالعات متعدد دیگری نیز از جمله، گودریچ (۱۹۸۵)، گودویچ و همکاران (۱۹۸۵)، بایک و چان (۱۹۹۷)، وایتمن و داران (۱۹۹۳)، کیم و بایک (۲۰۰۱)، اکه (۱۹۸۱ و ۱۹۸۲)، اکه و همکاران (۱۹۹۱)، ویکویچ و کینگ (۱۹۸۰)، و شفلر (۱۹۷۸) در این زمینه به انجام رسیده است.

در ایران هم برخی کارهای تحقیقاتی و مشاهداتی در این زمینه صورت گرفته است، از آن جمله می‌توان به اندازه‌گیری‌های مرادزاده (۱۳۷۸) در کلان شهر تهران اشاره کرد. نتایج حاصل از تحلیل این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که جزیره گرمایی تهران در مقایسه با توکیو به دلیل این که در سطح شهر تهران مناطقی با حداکثر و

حداقل دما وجود دارد از ساختار پیچیده‌تری برخوردار است.

در مطالعه حاضر سعی شده است که جزیره گرمایی و اثرات آن روی جو شهری به کمک مدل منطقه‌ای میان مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا موسوم به MMS برای دو حالت موردی بررسی و شبیه‌سازی شود. بنابراین در دو حالت متفاوت از نظر استقرار نوع توده هوا (مورد اول در زمان استقرار توده هوای سرد و حالت دوم در زمان استقرار توده هوای گرم) مدل اجرا می‌شود و میدان‌های باد، دما و آهنگ‌های سرمایش و گرمایش در کلان شهر تهران و حومه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

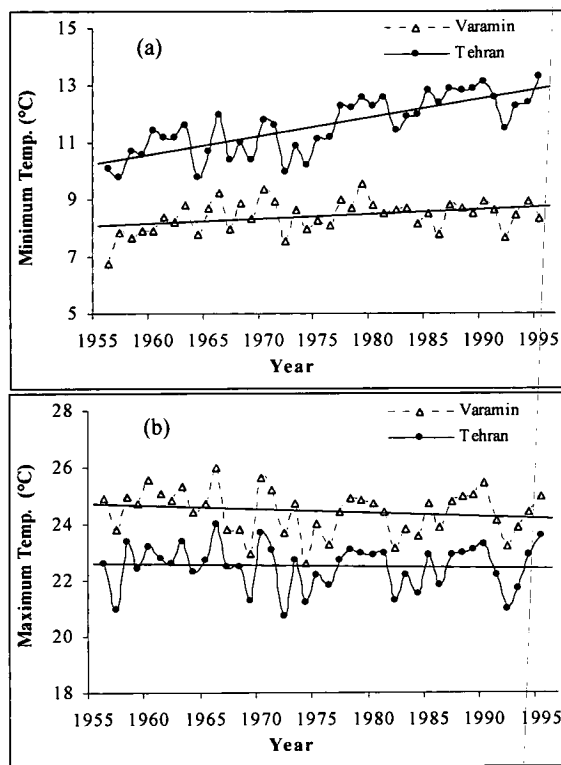
۲ تغییرات دمایی تهران

دما در مقایسه با سایر میدان‌های هواشناختی بیشترین تغییرات را در اثر توسعه شهری از خود نشان می‌دهد. میزان افزایش دمای سطحی در محیط‌های شهری به عوامل متعددی از جمله شرایط وضع هوا، عرض جغرافیایی، زمان، توپوگرافی، پایداری، باد، آلودگی هوا، جمعیت، منابع گرمای مصنوعی و ساخته دست بشر، ارتفاع ساختمان‌ها، هندسه خیابان‌ها و شرایط تخلیه هوای شهر بستگی دارد. هر یک از عوامل یادشده به نحوی جزیره گرمایی و در نتیجه روند افزایش دما را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مثلاً اثرات توپوگرافی تغییرات میدان‌های دمایی را در شهرها به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و مطالعه آنها را مشکل می‌سازد (لندزبرگ، ۱۹۸۱).

گرم‌تر بودن هوا در محیط‌های شهری نسبت به اطراف به جزیره گرمایی شهری معروف است و اختلاف دمای بین شهرها و مناطق حومه آنها، با شدت جزیره گرمایی متناسب است. اولین بار لندزبرگ (۱۹۵۰) ارتباط شدت جزیره گرمایی شهری را به عناصر هواشناسی، نظیر ابرناکی، باد، دما و رطوبت با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه بررسی کرد و بعد از او جزیره گرمایی

هر دو ایستگاه اختلاف چندانی ندارند. به علت وجود تلاطم، رشد لایه همرفتی شهری و در نتیجه افزایش عمق لایه آمیخته جزیره گرمایی طی ساعات‌های روز شدت کمی دارد، ولی در شب به دلیل کاهش عمق لایه آمیخته، پایداری ایستایی بیشتر جو و آلودگی هوا، شدت جزیره گرمایی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. روند افزایشی دمای کمینه تهران نسبت به ورامین، نمایانگر آزاد شدن انرژی گرمایی بیشتر در تهران نسبت به ورامین است. بنابراین اثرات جزیره گرمایی تهران با وجود این که دائماً تحت تأثیر بادهای کوه به دشت قرار دارد و با این جریانات نیز تعدیل می‌شود، از شدت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

شهری در اغلب شهرهای جهان با استفاده از سری‌های زمانی رکودهای دما و روند آنها، بررسی شد. در این گونه مطالعات، اغلب تغییرات طولانی مدت دما مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مثال اگر دو ایستگاه مهرآباد (در حکم یک ایستگاه درون شهری) و ورامین (در حکم ایستگاه خارج از شهر) به دلیل داشتن سابقه ثبت نگاشت‌های طولانی مدت نسبت به سایر ایستگاه‌های موجود را در نظر بگیریم، مقایسه بین روند سری‌های زمانی دمای دو ایستگاه می‌تواند نمایانگر میزان اثرات شهری روی دما باشد. همان گونه که از شکل ۱ می‌توان دید، این مقایسه بیانگر افزایش قابل ملاحظه دمای کمینه تهران نسبت به ورامین است، در صورتی که روندهای دمای بیشینه در



شکل ۱. سری‌های زمانی میانگین سالانه دماهای کمینه (a) و (b) بیشینه تهران و ورامین طی دوره ۱۹۵۶ الی ۱۹۹۵.

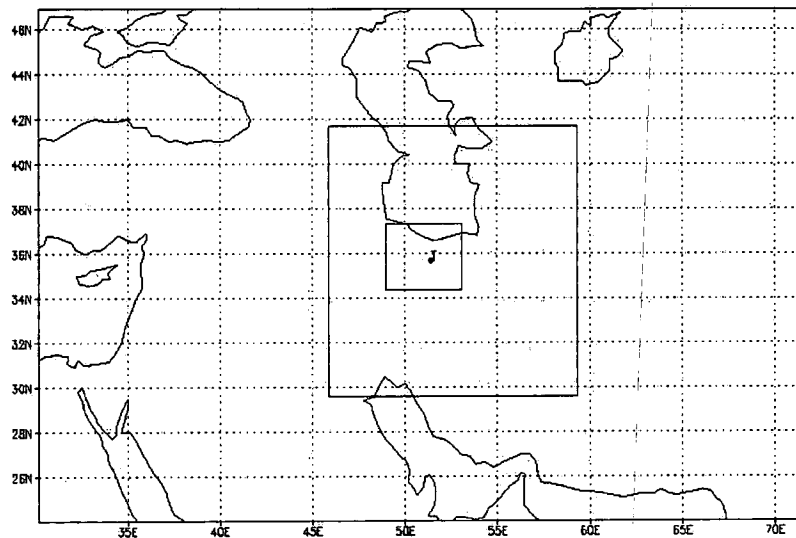
۳ اجرای مدل MM5

سیستم مدل‌سازی MM5 (MM5 modeling system) شامل برنامه‌های TERRAIN برای درونیابی توپوگرافی و کاربری اراضی به شبکه مدل، درونیابی افقی متغیرهای اصلی هواشناسی به شبکه مدل، REGRID برای درونیابی درونیابی داده‌ها در راستای قائم، مدل INTERPF برای درونیابی داده‌ها در راستای قائم، مدل میان مدل مقیاس MM5 و برخی برنامه‌های دیگر است که در پس‌پردازش خروجی مدل، برای تهیه نقشه‌های مورد نظر به کار می‌روند. این مدل دارای دینامیک غیر هیدروستاتیک و مختصه "سیگما" در امتداد قائم است و برای شبیه‌سازی پدیده‌های جوی خرد تا میان‌مقیاس طراحی شده است. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل امکان انتخاب فیزیک مناسب از سوی کاربر با توجه به نوع پدیده مورد مطالعه است. برای توضیحات بیشتر می‌توان به مراجع مختلف و از جمله به دوتیبا و همکاران (۲۰۰۱) رجوع کرد.

برای مطالعه جزیره گرمایی تهران، طول و عرض

جغرافیایی نقطه مرکزی دامنه بزرگ در مدل، به ترتیب ۵۱ درجه شرقی و ۳۶ درجه شمالی، تعداد بیشینه دامنه‌ها برابر با سه، تعداد نقاط شبکه‌ای دامنه بزرگ در جهت X و Y به ترتیب ۱۲۳ و ۹۱، دامنه میانی ۱۴۸ و ۱۴۸ و دامنه کوچک ۱۱۲ و ۱۱۲ و اندازه گام شبکه‌ای برای هر یک از دامنه‌ها به ترتیب ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر در نظر گرفته شده است. شکل ۲ محدوده این سه دامنه را نشان می‌دهد.

از آن‌جا که نوع طرح‌واره‌های به کار رفته در بخش فیزیک مدل، نقش اساسی در میزان دقت پیش‌بینی‌ها یا شبیه‌سازی پدیده‌های مورد نظر دارد، بایستی طرح‌واره‌های مربوط به پارامترسازی فرایندهای فیزیکی و به‌ویژه طرح‌واره‌های فرایندهای لایه مرزی و همرفت با دقت و مطالعه قبلی انتخاب کرد. در این مطالعه بر اساس نتایج مطالعات آزادی و همکاران (۱۳۸۲) از طرح‌واره‌های MRF و BETS-MILLER به ترتیب برای پارامتری سازی فرایندهای لایه مرزی و همرفت استفاده شده است.



شکل ۲. محدوده سه دامنه‌ای انتخابی برای اجرای مدل MM5.

۴ بحث و بررسی نتایج

در صورت استقرار توده هوای پایدار شرایط مناسبی برای تشکیل جزیره‌های گرمایی فراهم می‌شود. لذا برای پنج مورد متفاوت دارای شرایط پایدار، مدل اجرا شد و به دلیل تشابه نتایج و اجتناب از طولانی شدن مقاله در این جا فقط نتایج دو مورد ارائه می‌شود. مورد اول مربوط به روز ۳۰ آوریل ۲۰۰۳ است که توده هوای سرد و مورد دوم مربوط به روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳ که توده هوای گرم روی منطقه حاکم بوده است. بنابراین مطالعه جزیره گرمایی تهران در دو حالت موردی متفاوت و بر اساس نتایج پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته مدل MMS صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به فواصل زمانی سه ساعت تحلیل شده است.

الف - میدان افقی دما

نتایج پیش‌بینی‌های بیست و چهار ساعته میدان‌های افقی دما در ارتفاع دو متر از سطح زمین، مربوط به روز ۳۰ آوریل ۲۰۰۳ و دامنه با درجه تفکیک بالا (دامنه ۳) در شکل ۳ نشان داده شده است. در همه شکل‌ها، ساعت بر حسب زمان گرینویچ (GMT)، حرف M معرف ایستگاه هواشناسی مهرآباد، حرف A معرف ایستگاه هواشناسی اقدسیه و حرف C معرف ایستگاه هواشناسی چیتگر است. خطوط آبی نیز کاربری زمین را مطابق جدول ۱ و اعداد قرمز رنگ، مقادیر دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ به‌طور نمونه برخی از ویژگی‌های اراضی کاربری مورد استفاده در مدل، مانند سپیدایی، رطوبت، گسیلندگی، طول ناهمواری و لختی حرارتی نشان داده شده است. به دلیل در دسترس نبودن مقادیر واقعی این کمیت‌ها، از مقادیر متوسط اقلیمی آنها استفاده شده است. بنابراین به کاربردن این مقادیر اقلیمی به جای مقادیر واقعی مقداری خطا در پیش‌بینی‌های مدل ایجاد می‌کند. شایان ذکر است که

توضیحات تفصیلی مربوط به جدول ۱ در مرجع مربوط به دوتهیا و همکاران (۲۰۰۱) موجود است.

مقایسه دماهای پیش‌بینی شده با دماهای دیدبانی شده در ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، بیانگر سازگاری قابل قبول آنها است. در ساعت ۰۶۰۰ پربندهای دما روی نواحی مرکزی شهر تهران بسته شده است، که مهم‌ترین دلیل آن پوشش آسفالت سطح شهر است. در اوایل روز به سبب جذب زیاد انرژی خورشید توسط آسفالت، به‌ویژه در شهرهایی که ارتفاع ساختمان‌ها نسبت به پهنای آنها (مقیاس دید آسمان) کوچک است (برای توضیحات بیشتر به اوکه، ۱۹۸۲ رجوع شود) جزیره گرمایی ایجاد می‌شود، که به تدریج با افزایش عمق لایه آمیخته و یا وزش باد شدت آن کاهش می‌یابد. بنابراین در ساعت ۱۲۰۰ به دلیل وزش باد، تلاطم و اختلاط و افزایش عمق لایه آمیخته جو، اثری از جزیره گرمایی دیده نمی‌شود.

در ساعت ۱۸۰۰ زیانه هوای گرم در نواحی شمال‌شرق و شمال‌غرب و ریزش هوای سرد ناشی از جریانات کوه به دشت تا نواحی مرکزی شهر دیده می‌شود. در ساعت ۲۱۰۰ جزیره گرمایی کاملاً شکل گرفته و در نیمه شمالی شهر واقع شده است و گردان‌های شدید دما که در حقیقت بیانگر شدت جزیره گرمایی نیز هستند در نواحی مرزی دیده می‌شوند.

در ساعت ۱۸۰۰ دمای دیدبانی شده در ایستگاه‌های مهرآباد و اقدسیه بر خلاف تفاوت ارتفاعی حدود ۳۶۰ متر بین آنها، برابر است و در ساعت ۲۱۰۰ دمای دیدبانی شده در ایستگاه مهرآباد کمتر از اقدسیه است. از جمله دلایل اصلی این امر، وارونگی دما و استقرار هوای نسبتاً گرم در ارتفاعات بالاتر و روی تپه‌ها نسبت به ارتفاعات پایین و دره‌ها است. زیرا که در شب‌های سرد، ارتفاع لایه وارونگی به شدت کاهش می‌یابد.

جدول ۱. طبقه‌بندی کاربری زمین و مقادیر اقلیمی به‌کار برده برای برخی از کمیت‌ها به‌جای مقادیر واقعی آنها که به هنگام اجرای مدل استفاده شده‌اند (دوتیبا و همکاران، ۲۰۰۱).

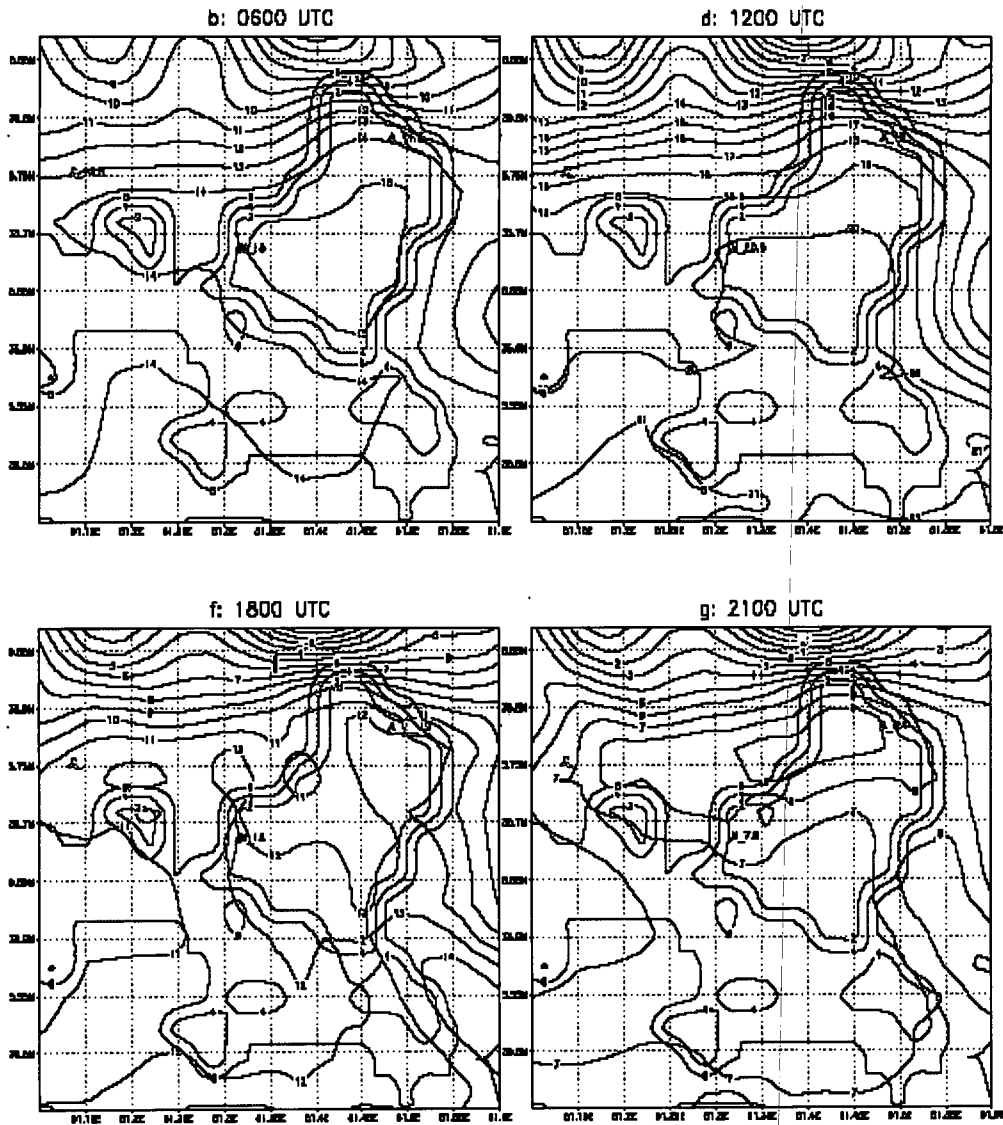
اعداد	توصیف پوشش گیاهی	سپیدایی		رطوبت قابل دسترس (%)		گسیندگی (% at 9 mm)		طول ناهمواری‌ها (cm)		لغتی حرارتی $\text{cal cm}^{-2} \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
		زمنستان	تابستان	زمنستان	تابستان	زمنستان	تابستان	زمنستان	تابستان	
۱	شهر	۱۸	۱۸	۱۰	۱۰	۸۸	۸۸	۵۰	۵۰	۰/۰۳
۲	مراغه محصولات دیمی	۲۳	۱۷	۳۰	۶۰	۹۲	۹۲	۵	۱۵	۰/۰۴
۳	مراغه محصولات کشاورزی	۲۳	۱۸	۵۰	۵۰	۹۲	۹۲	۵	۱۵	۰/۰۴
۴	مراغه محصولات دیمی و کشاورزی	۲۳	۱۸	۲۵	۵۰	۹۲	۹۲	۵	۱۵	۰/۰۴

آهنگ سرمایه‌های بیشتر مناطق روستایی نسبت به شهری، حضور جریان‌های شمال غربی (شکل ۶) سبب کاهش بیشتر دما در آن مناطق شده و در نتیجه تضاد حرارتی شدیدی بین شهر و حومه به‌وجود آمده است. در ساعات‌های شب (۱۸۰۰ و ۲۱۰۰) جزیره گرمایی مشخصی مانند مورد اول در روی شهر تشکیل نشده و فقط در نواحی غربی مهرآباد، پرنده‌های دما روی مناطق کوچکی بسته شده است. دلیل اصلی آن استقرار ستون هوای گرم نسبی روی منطقه و در نتیجه افزایش عمق لایه آمیخته نسبت به حالت قبل است.

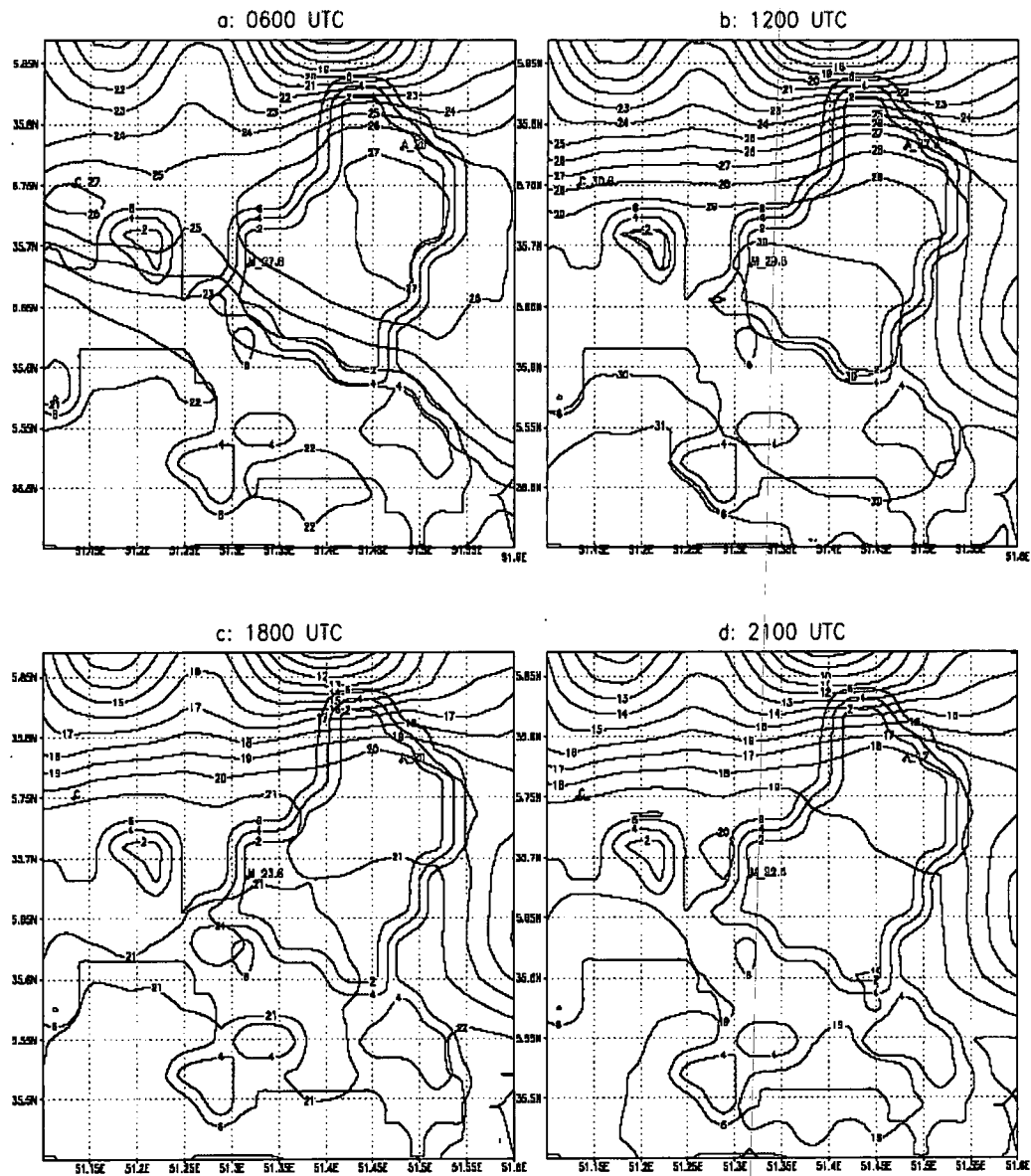
از مقایسه میدان دمایی دو مورد فوق نتیجه می‌شود که در طول روز با توجه به جذب انرژی خورشید توسط سطح آسفالت، گاهی پرنده‌های دمای زیاد، در صورت کم بودن سرعت باد می‌تواند روی شهر، به‌ویژه نواحی مرکزی آن قرار گیرد. اما در شب (۱۸۰۰ و ۲۱۰۰)، بسته به نوع توده‌های هوا، پایداری ایستایی و عمق لایه آمیخته شهری، چگونگی شکل‌گیری جزیره گرمایی و شدت آن متفاوت است و در زمان استقرار توده هوای سرد (مورد اول) جزیره گرمایی سریع‌تر ایجاد می‌شود و از شدت بیشتری نیز برخوردار است. نتایج حاصله با مطالعات جدزلمن و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد.

در ساعت ۰۶:۰۰ مورد دوم (روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳) پرنده‌های دما مانند مورد اول روی شهر بسته شده و جزیره گرمایی را از محیط اطرافش متمایز ساخته است (شکل ۴). به‌طور کلی میدان‌های دما طی ساعات‌های روز (۰۶:۰۰ و ۱۲:۰۰) تقریباً مشابه مورد اول (روز ۳۰ آوریل ۲۰۰۳) است. اما به دلیل گرم‌تر بودن هوا و در نتیجه جذب بیشتر انرژی تابشی توسط سطح پوشیده شده از آسفالت و همچنین کم بودن سرعت باد نسبت به مورد اول، زبانه هوای گرم گسترش بیشتری پیدا می‌کند و در ساعت ۱۲:۰۰ هنوز جزیره گرمایی ضعیفی مشاهده می‌شود.

یکی از ویژگی‌های جزیره گرمایی وجود گرادیان‌های افقی دما بین مناطق شهری و حومه است، که اغلب در اثر تفاوت آهنگ‌های سرمایه‌های گرمایی و وجود می‌آید. خروجی‌های مدل میان‌مقیاس MMS این گرادیان‌های دمایی را روی تهران به خوبی نشان می‌دهد. نمونه‌ای از این گرادیان‌ها روی تهران در شکل ۴ مربوط به ساعت ۰۶:۰۰ روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳ نشان داده شده است. در این ساعت بیشینه دماها روی شهر قرار گرفته و گرادیان‌های افقی شدید دما بین شهر تهران و مناطق جنوب‌غربی و غربی شهر ایجاد شده است. علاوه بر



شکل ۳. میدان دما برحسب درجه سلسیوس در ارتفاع ۲ متری سطح زمین به فواصل زمانی ۶ ساعته روز ۳۰ آوریل ۲۰۰۳. به طوری که خطوط سیاه، پریندهای دما و خطوط آبی کاربری زمین مطابق جدول ۱ است.



شکل ۴. میدان دما برحسب درجه سلسیوس در ارتفاع ۲ متری سطح زمین به فواصل زمانی ۶ ساعته روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳، به طوری که خطوط سیاه، پریندهای دما و خطوط آبی کاربری زمین مطابق جدول ۱ است.

ب- میدان افقی باد

باد یکی از مهم‌ترین کمیت‌هایی است که در ایجاد و یا از بین بردن جزیره گرمایی نقش اساسی را ایفا می‌کند. در صورت کم بودن سرعت باد، شرایط برای گسترش و ایجاد جزیره گرمایی فراهم می‌شود. به طوری که اگر سرعت باد در شهرها از یک سرعت باد آستانه (U_c) بیشتر شود امکان توسعه و تکامل جزیره گرمایی میسر نخواهد بود. سرعت باد آستانه از رابطه زیر به دست می‌آید (لندزبرگ، ۱۹۸۱):

$$U_c = 3.4 \log p - 11.6 \quad (1)$$

p جمعیت شهر است. اگر جمعیت تهران را حدود ۱۰ میلیون در نظر بگیریم، سرعت باد آستانه‌ای که لازم است از تشکیل و تکامل جزیره گرمایی تهران جلوگیری کند، تقریباً باید حدود ۹ متر بر ثانیه باشد. بنابراین در اغلب زمان‌ها انتظار می‌رود شرایط لازم برای تشکیل جزیره گرمایی در تهران فراهم باشد.

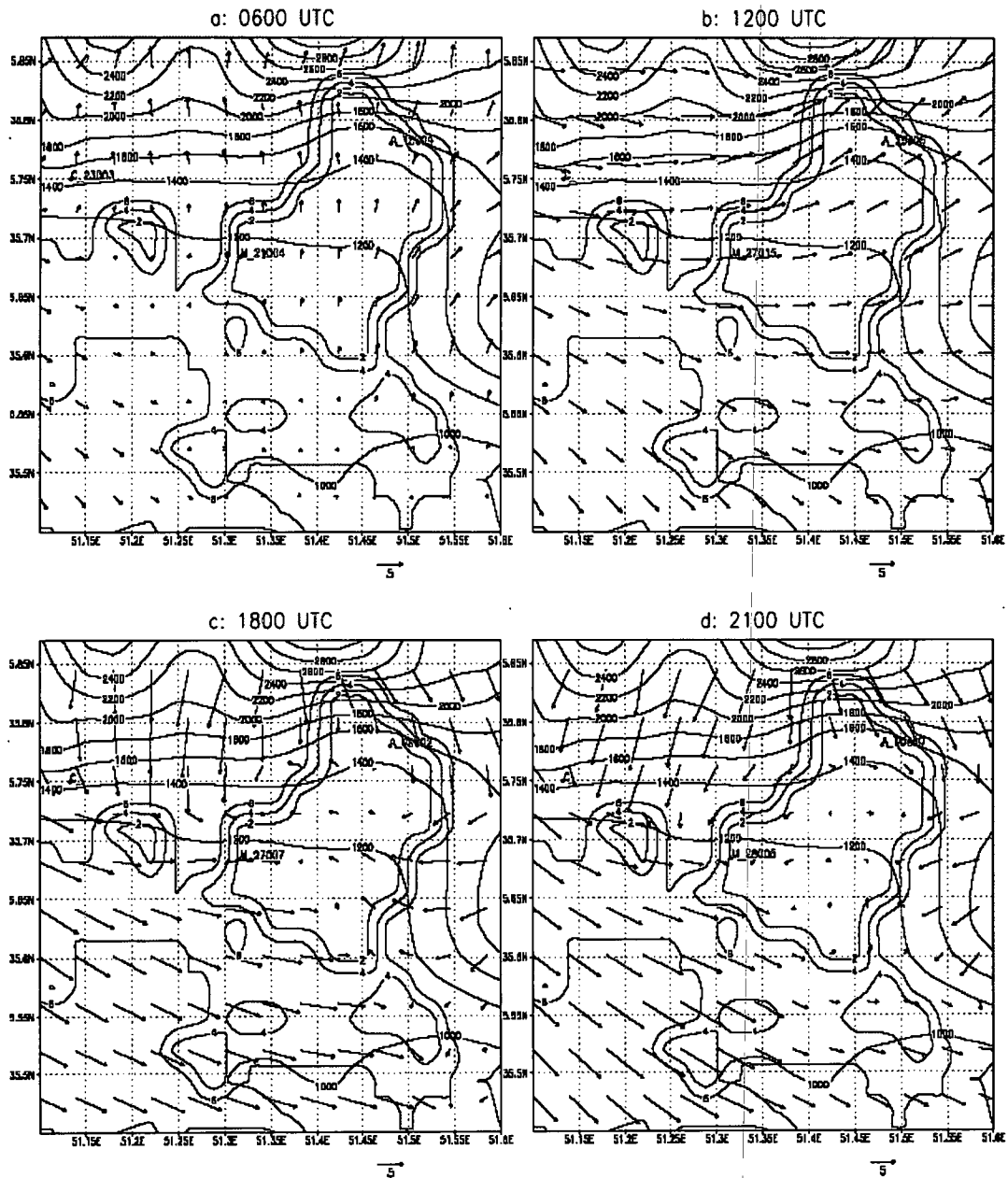
میدان‌های باد منطقه شهری و محدوده اطراف آن در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین که در ساعت‌های متفاوت با مدل MM5 شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این شکل‌ها علاوه بر بردارهای باد، پربندهای ارتفاع ناهمواری‌های زمین از سطح دریا به فواصل ۲۰۰ متر (خطوط پر) و خطوط کاربری زمین (خطوط آبی رنگ) نیز نشان داده شده است. در ساعت ۰۶۰۰ مورد اول (۳۰ آوریل ۲۰۰۳) جریانات جنوبی (دشت به کوه) در نواحی مجاور به دامنه‌های البرز و سطح شهر گسترده شده‌اند و فقط در مناطق جنوب‌غربی و فواصل نسبتاً دور از شهر، جریانات شمال‌غربی دیده می‌شوند (شکل ۵). جریانات غربی در ساعت ۱۲۰۰ در کل منطقه حاکم شده و در ساعت ۱۸۰۰ بادهای کوه به دشت نواحی شمال و شرق تهران را تحت تأثیر قرار داده است. در این ساعت جریانات شمال‌غربی همچنان در

نواحی جنوب‌غرب و با شدت بیشتر ادامه دارند ولی بادهای در سطح شهر ضعیف شده‌اند. در ساعت ۲۱۰۰ میدان باد نسبت به سه ساعت قبل، روی مرکز شهر ضعیف شده و الگوی کلی باد در نقاط دیگر تغییر چندانی نکرده است.

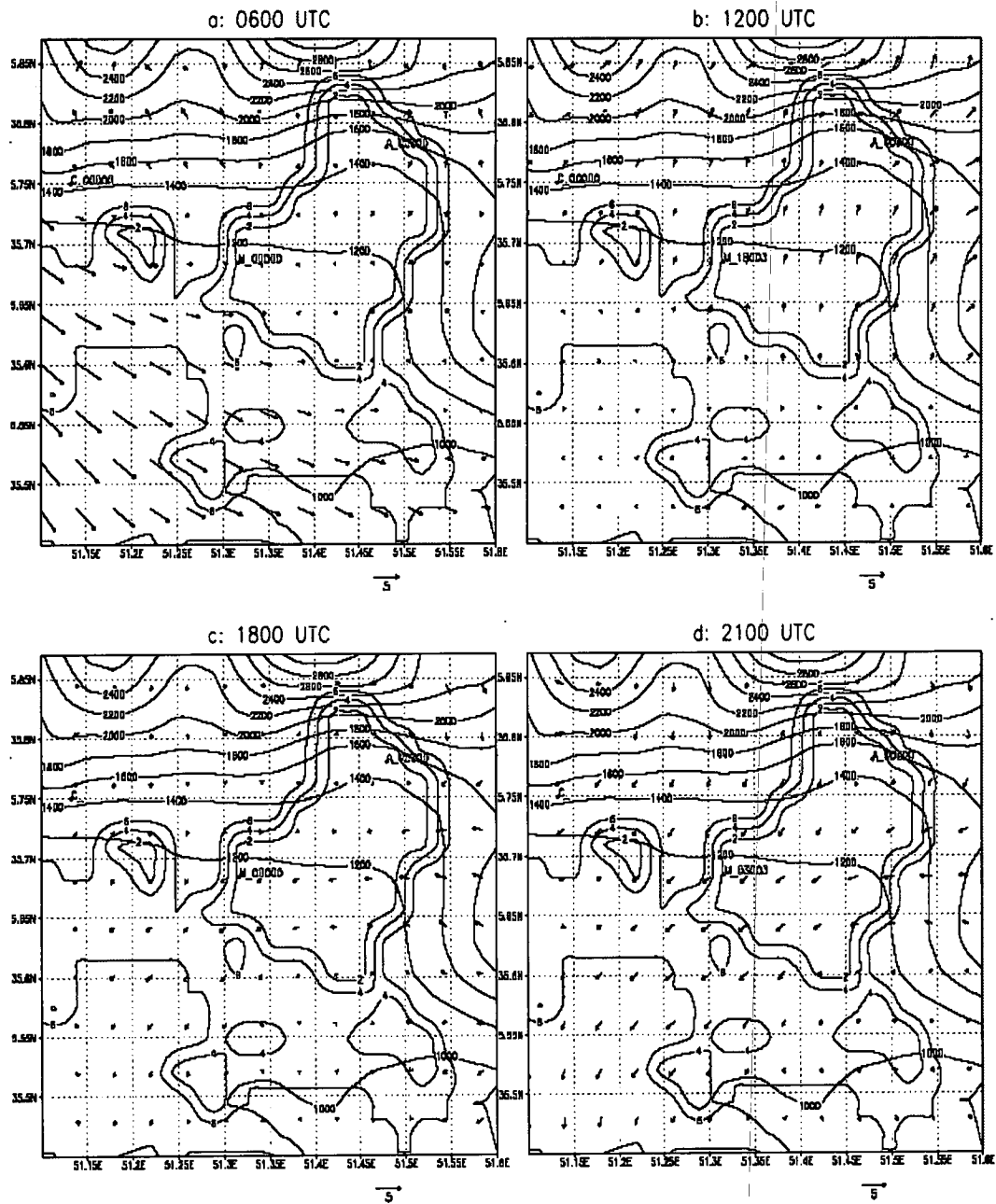
میدان باد ساعت ۰۶۰۰ مورد دوم (روز ۱۱ اکتبر) از نظر الگوی کلی مانند مورد اول (روز ۳۰ آوریل) است، با این تفاوت که بادهای دشت به کوه نسبت به مورد اول ضعیف‌تر، ولی بادهای شمال‌غربی در نواحی جنوب‌غربی شهر، ضمن این که از سرعت بیشتری برخوردارند، نسبت به مورد اول محدود و وسیع‌تری را نیز تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۶). در ساعت ۱۲۰۰ در نواحی جنوب شهر تهران جریانات آرام بوده‌اند و فقط در نواحی نزدیک به کوهستان بادهای دشت به کوه جریان دارند. در ساعت‌های شب (۱۸۰۰ و ۲۱۰۰) جهت جریانات شمالی می‌شود و در سطح شهر بادهای ضعیف و ملایمی در بعضی نقاط به چشم می‌خورد. بنابراین نتیجه می‌شود که در هر دو مورد، بادهای کوه به دشت (و یا دشت به کوه) که به خوبی با مدل شبیه‌سازی شده‌اند، جزیره گرمایی تهران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین با توجه به پیش‌بینی‌های قابل قبول میدان‌های باد و دما در سطح تهران، امکان پیش‌بینی آلودگی هوا نیز می‌تواند فراهم شود. نتایج نشان می‌دهد که سرعت باد در نقاط شهری به علت وجود ساختمان‌ها و موانع موجود کاهش یافته است (که با مطالعات کلایک و همکاران، ۲۰۰۲ نیز مطابقت دارد)، در نتیجه با کاهش سرعت باد، شرایط مناسب‌تری برای ایجاد جزیره گرمایی فراهم می‌شود.

ج- آهنگ تغییرات دما

آهنگ سرمایش زیادتر مناطق روستایی نسبت به مناطق شهری سبب کاهش بیشتر دما در نواحی روستایی می‌شود. به طور کلی میزان تغییرات آهنگ دما به نوع و جنس خاک، پوشش گیاهی، میزان رطوبت هوا و ابرناکی



شکل ۵. میدان باد برحسب متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین به فواصل زمانی ۶ ساعته، روز ۳۰ آوریل ۲۰۰۳، به طوری که خطوط سیاه، پرندهای دما و خطوط آبی کاربری زمین مطابق جدول ۱ است.



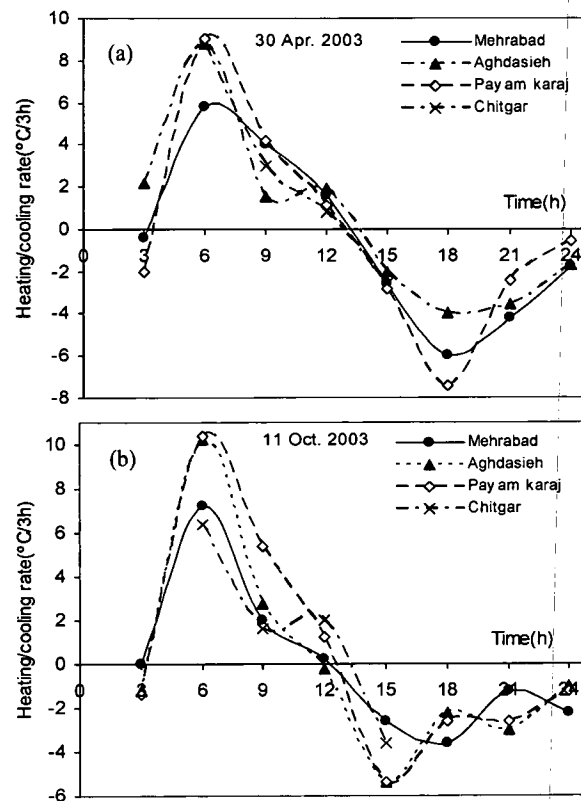
شکل ۶. میدان باد برحسب متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین به فواصل زمانی ۶ ساعته، روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳، به طوری که خطوط سیاه، پرندهای دما و خطوط آبی کاربری زمین مطابق جدول ۱ است.

دیدبانی‌های همدیدی) کامل ولی داده‌های یک ساعته (گزارش‌های متار) به‌طور کامل به‌ویژه در روز ۳۰ آوریل موجود نیستند. آهنگ تغییرات دمای روز ۳۰ آوریل، از ساعت ۰۰۰۰ تا ۰۳۰۰ در اقدسیه مثبت، در مهرآباد تقریباً صفر و در پیام کرج منفی است (شکل ۷-ا).

بیشترین آهنگ گرمایش در همه ایستگاه‌ها از ساعت ۰۳۰۰ تا ۰۶۰۰ روی داده و در سه ساعت بعد، آهنگ گرمایش کاهش یافته است و کم‌ترین مقدار گرمایش $(1.5^{\circ}\text{C}3\text{h}^{-1})$ در اقدسیه مشاهده می‌شود. روند کاهشی آهنگ دما از ساعت ۰۹۰۰ تا ۱۲۰۰ در همه ایستگاه‌ها به‌جز اقدسیه ادامه داشته است و از آن پس تا ساعت ۱۸۰۰، روند سرمایش با آهنگ‌های متفاوت ادامه می‌یابد.

بستگی دارد اما در محیط‌های شهری علاوه بر موارد فوق به میزان آلودگی هوا، منابع گرمایی در شهر و گردش‌های حرارتی ناشی از جزیره گرمایی نیز وابسته است. شایان ذکر است که می‌توان برای توضیحات بیشتر در خصوص گردش‌های حرارتی به مراجع مختلف از جمله الیاسون و هولمر (۱۹۹۰) و یا ویکویچ و همکاران (۱۹۸۰) مراجعه کرد.

آهنگ‌های گرمایش و سرمایش دما در ایستگاه‌های مهرآباد، اقدسیه، پیام کرج و چیتگر برحسب درجه سلسیوس در هر ۳ ساعت $(^{\circ}\text{C}3\text{h}^{-1})$ در شکل ۷ نشان داده شده است. داده‌های ایستگاه چیتگر فقط به‌صورت روزانه بوده است و در سایر ایستگاه‌ها داده‌های ۳ ساعته



شکل ۷. آهنگ گرمایش و سرمایش ایستگاه‌های مهرآباد، اقدسیه، چیتگر و پیام کرج در هر سه ساعت در دو روز مورد مطالعه.

از جهت باد منطقه‌ای است. اما با توجه به توپوگرافی پیچیده تهران احتمالاً در حالت‌هایی که ارتفاع لایه وارونه کاهش زیادی یابد، این گردش‌ها نمی‌توانند به‌طور کامل توسعه یابند که این مطلب نیاز به مطالعه بیشتری دارد. در حالت دوم، افزایش ارتفاع لایه وارونگی دما، امکان ایجاد گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی را بهتر فراهم می‌نماید. وجود چنین جریاناتی همراه با آهنگ‌های سرمایش مختلف شهر-روستای سه فاز مختلف (برای توضیحات بیشتر به یوجسون و هولمر، ۱۹۹۹ مراجعه شود) ایجاد می‌شود. همچنین نحوه تغییرات آهنگ‌های سرمایش مورد دوم (شکل ۷-ب) کاملاً با مدل ارائه شده از سوی یوجسون و هولمر (۱۹۹۹) مطابقت دارد.

بررسی تغییرات ساعتی آهنگ دما جزئیات بیشتری را می‌تواند نشان دهد. با توجه به کامل‌تر بودن داده‌های روز ۱۱ اکتبر، تغییرات آهنگ دمای ایستگاه‌های مهرآباد، اقدسیه و پیام کرج در این روز بررسی شدند (شکل ۸-ا). این تغییرات به هنگام روز در همه ایستگاه‌ها روند یکسانی را نشان می‌دهد ولی به هنگام شب در اکثر ساعات متفاوت هستند. مثلاً از ساعت ۰۰۰۰ تا ۰۱۰۰ در اقدسیه گرمایش ($+1^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) و در عین حال در مهرآباد سرمایش ($-0.4^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) رخ داده است. از ساعت ۰۱۰۰ تا ۰۲۰۰ سرمایش نسبتاً شدید ($-2^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) در اقدسیه روی داده ولی در مهرآباد گرمایش ($+0.4^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) مشاهده شده است. آهنگ سرمایش در ساعت‌های ۱۶۰۰ و ۱۷۰۰ به ترتیب، به مقدار $-1.2^{\circ}\text{Ch}^{-1}$ و -1°Ch^{-1} در ایستگاه‌های مهرآباد و اقدسیه یکسان است، ولی با آهنگ سرمایش دما در ایستگاه پیام کرج که مقادیر آن طی ساعت‌های ۱۶۰۰ و ۱۷۰۰ به ترتیب $-0.6^{\circ}\text{Ch}^{-1}$ و -2°Ch^{-1} است، تفاوت دارد. در ساعت ۱۶۰۰ مقدار آهنگ سرمایش پیام کرج نصف دو ایستگاه دیگر است، که یکی از دلایل اصلی آن ایجاد وارونگی دما در مناطق روستایی بعد از غروب آفتاب است. این وارونگی در مقایسه با وارونگی‌های

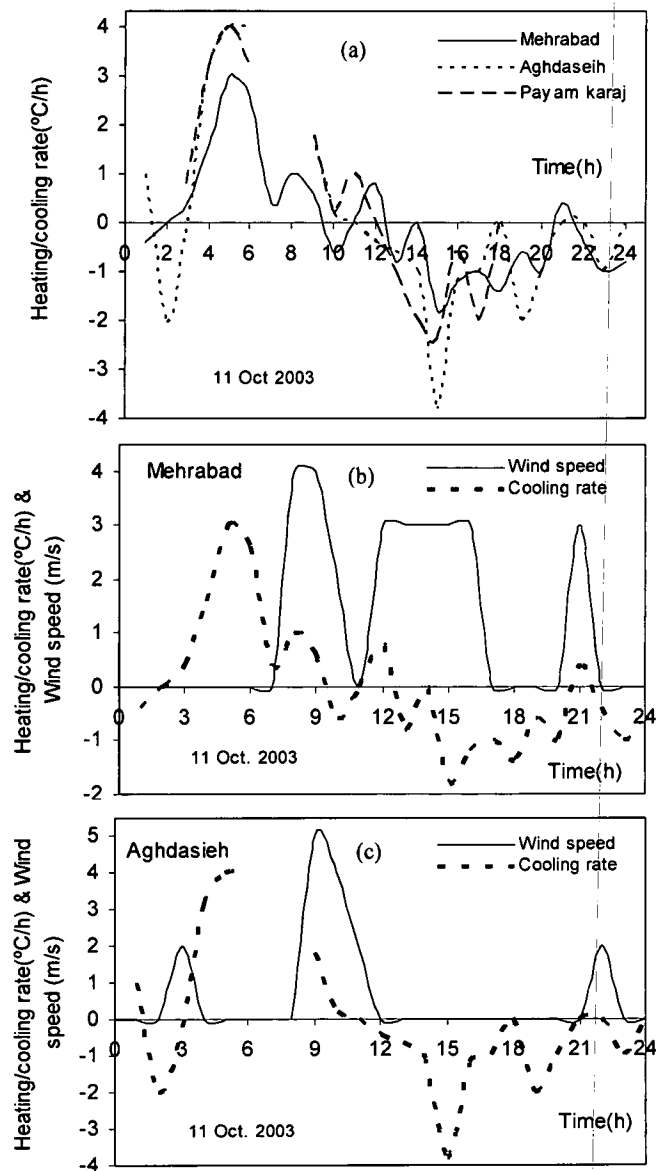
بیشترین آهنگ سرمایش در همه ایستگاه‌ها روی داده به‌طوری که بیشینه و کمینه این مقادیر به ترتیب در پیام کرج ($-7.4^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) و اقدسیه ($-4^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) رخ داده است. بنابراین شرایط مناسبی می‌تواند برای بیشینه شدت جزیره گرمایی فراهم شود. از ساعت ۱۸۰۰ تا ۲۴۰۰ آهنگ سرمایش کاهش می‌یابد و روند کاهشی در ایستگاه‌های مهرآباد و اقدسیه تقریباً یکنواخت است. آهنگ تغییرات دما برای مورد دوم (شکل ۷-ب) تا ساعت ۱۲۰۰ تقریباً مانند مورد اول است، اما در بعد از ظهر و اوایل شب (از ساعت ۱۲۰۰ به بعد) که زمان آغاز آهنگ‌های سرمایش است، نحوه تغییرات در ایستگاه‌های مختلف، متفاوت است. برای مثال آهنگ‌های سرمایش در ایستگاه‌های اقدسیه و پیام کرج بین ساعت‌های ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ به بیشینه مقدار خود ($-5.4^{\circ}\text{C3h}^{-1}$ در هر دو ایستگاه) رسیده، ولی در مهرآباد بیشترین مقدار ($-3.6^{\circ}\text{C3h}^{-1}$) بین ساعات ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ رخ داده است. از ساعت ۱۵۰۰ به بعد روند تغییرات در ایستگاه‌های اقدسیه و پیام کرج تقریباً یکسان و برعکس روند تغییرات مهرآباد است.

از مقایسه این دو مورد نتیجه می‌شود که در طول روز آهنگ‌های گرمایش و سرمایش تقریباً یکسان ولی در شب این آهنگ‌ها در نقاط شهری و حومه متفاوت بوده است که دلیل اصلی آن، آزاد شدن انرژی گرمایی و آلودگی هوا در مناطق شهری است. گاهی استقرار توده هوای سرد و در نتیجه کاهش ارتفاع لایه وارونگی دما می‌تواند سبب گرم‌تر شدن هوا روی تپه‌ها و ارتفاعات نسبت به دره‌ها و نواحی پست شود (مانند مورد اول که دمای اقدسیه گرم‌تر از مهرآباد است). در این صورت با کاهش ارتفاع لایه وارونگی دما، گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی نیز محدود می‌شود. الیاسون و هولمر (۱۹۹۰) با مطالعه گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی شهر گوتبرگ سوئد نشان دادند که عمق لایه این گردش‌ها با سقف لایه وارونگی دما محدود شده و اغلب آنها مستقل

ساعات موجود نبوده است) در ساعت‌های ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ صفر است. ساعت ۱۱۰۰ (محلی ۱۴۳۰) تقریباً آغاز تبدیل روند گرمایش به سرمایش بوده و لذا در زمان تغییر فاز، آهنگ تغییرات دما صفر شده است. فرارفت هوای گرم کویری (با باد جنوب شرقی (۱۵۰ درجه)، با سرعت 3 ms^{-1}) در ساعت‌های ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰ سبب شده که در

شهری، شدیدتر است و به سرعت بعد از غروب آفتاب نیز تشکیل می‌شود ولی نسبت به نقاط درون شهر ارتفاع کم‌تری دارد (لندزبرگ ۱۹۸۱).

تغییرات آهنگ دما در مهرآباد در ساعت‌های ۰۲۰۰، ۱۱۰۰، ۱۴۰۰، در اقدسیه در ساعت‌های ۱۱۰۰، ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۲۰۰، ۲۴۰۰ و در پیام کرج (داده‌ها در همه



شکل ۸. آهنگ گرمایش و سرمایش ایستگاه‌های مهرآباد، اقدسیه و پیام کرج در هر ساعت، (b) سرعت باد و آهنگ‌های گرمایش و سرمایش ایستگاه مهرآباد و (c) اقدسیه، در روز ۱۱ اکتبر ۲۰۰۳.

۱۰ متری ایستگاه‌های سطح شهر، بیانگر سازگاری قابل قبولی بین آنها است. در نتیجه به کمک این مدل می‌توان میدان‌های باد و دمای تهران را پیش‌بینی و پدیده جزیره گرمایی را شبیه‌سازی کرد. با پیش‌بینی میدان‌های باد و دما در سطح تهران، امکان پیش‌بینی آلودگی هوا نیز می‌تواند فراهم شود. میدان‌های باد ارتفاع ده متری سطح زمین، بادهای کوه به دشت و دشت به کوه را در ساعت‌های مختلف، کند شدن جریانات به هنگام ورود به منطقه شهری به ویژه طی ساعت‌های شب را نشان می‌دهد که با کاهش سرعت باد در نقاط شهری شرایط مناسبی برای ایجاد جزیره گرمایی فراهم می‌شود. به هنگام استقرار توده هوای سرد در مقایسه با توده هوای گرم، جزیره گرمایی سریع‌تر ایجاد می‌شود و گرادیان‌های شدید دمایی در نقاط مرزی شهر و حومه نیز شکل می‌گیرد. همچنین به هنگام استقرار توده هوای سرد روی منطقه، ممکن است هوا در ارتفاعات بالاتر و روی تپه‌ها به دلیل وارونگی‌های دمایی شدید گرم‌تر از مناطق کم ارتفاع‌تر باشد.

آهنگ سرمایش و گرمایش نقش مهمی در نحوه شکل‌گیری و شدت جزیره گرمایی دارد. آزاد شدن گرمای ذخیره شده و گرمای دست‌ساز بشر (آنتروپوژنیک) در سطح شهر و در نتیجه کاهش آهنگ سرمایش در شب، سرآغاز ایجاد گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی است. بنابراین زمانی که آهنگ تغییرات دما به جای سیر نزولی، افزایش می‌یابد گردش‌های حرارتی ایجاد می‌شوند. این گردش‌ها زمینه را برای سرمایش بعدی فراهم می‌کند و از تقویت بیشتر شدت جزیره گرمایی جلوگیری می‌نمایند. در نتیجه هنگامی که یکی از آنها (آهنگ‌های سرمایش یا گردش‌های حرارتی) تغییر کند دیگری برای حفظ تعادل باید آنرا جبران کند. بنابراین، گردش‌های حرارتی یکی از مهم‌ترین عواملی است که سبب می‌شوند جزیره گرمایی به هنگام استقرار توده هوای گرم از شدت کم‌تری برخوردار شود.

ساعت ۱۴۰۰ آهنگ تغییرات دما پس از سرمایشی که در ساعت ۱۳۰۰ داشته، مجدداً به صفر برسد (شکل ۸-۸b). سمت و سرعت باد مهرآباد از ساعت ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ ثابت (۱۵۰ درجه، 3 ms^{-1})، و در ساعت ۱۶۰۰ فقط جهت آن شمال‌شرقی (۳۰ درجه) شده و سرعت آن ثابت مانده است.

به این دلیل که در مدت زمان نسبتاً کوتاه (۱/۵ ساعت) بعد از غروب آفتاب امکان رسیدن بادهای کوه به دشت به مهرآباد ضعیف است، به احتمال قوی چنین جریان‌هایی ناشی از گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی است. این گردش‌ها با تشدید اختلاط و آمیختگی و تضعیف موقتی پایداری ایستایی از بیشتر شدن شدت جزیره گرمایی در اوایل شب جلوگیری می‌کنند.

روند سرمایش از ساعت ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ در مهرآباد ادامه داشته ولی از ساعت ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ گرمایشی به مقدار $+0.4^\circ\text{Ch}^{-1}$ این روند را تغییر داده است. این در حالی است که باد طی چهار ساعت گذشته کاملاً آرام بوده، ولی در ساعت ۲۱۰۰ باد شمال‌غربی و با سرعت ۳ متر بر ثانیه گزارش شده است. در اقدسیه نیز روند سرمایش کاهش یافته و تغییرات آهنگ دما در ساعت‌های ۲۱۰۰ و ۲۲۰۰ به صفر رسیده و همچنین پس از آرام بودن باد به مدت ده ساعت، در ساعت ۲۲۰۰ باد شمالی با سرعت ۲ متر بر ثانیه گزارش شده است (شکل ۸-۸c). بنابراین نتیجه می‌شود که کاهش آهنگ سرمایش (و یا افزایش آهنگ گرمایش) در شب توأم با گردش‌های حرارتی جزیره گرمایی است و هنگامی که یکی از آنها تغییر کند دیگری برای حفظ تعادل باید آنرا جبران کند که این موضوع با نتایجی که یوجنسون و هولمر (۱۹۹۹) به دست آوردند همخوانی دارد.

۵ نتیجه‌گیری

مقایسه پیش‌بینی‌های مدل MM5 با مقادیر اندازه‌گیری شده دما در ارتفاع دو متری و سمت و سرعت باد ارتفاع

- vegetation cover and water surface: Proceeding of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics.
- Klaic, Z. B., Nitis, T., Kos, I., and Moussiopoulou, N., 2002, Modification of the local winds due to hypothetical urbanization of the Zagreb surroundings: *Meteor. Atmos. Phys.*, **79**, 1 - 12.
- Landsberg, H. E., 1950, Comfortable living depends on microclimate: *Weatherwise*, **3**, 7-10.
- Landsberg, H. E., 1981, *The urban climate*: Academic Press, 288 pp.
- Lee, D. O., 1979, Contrasts in warming and cooling rates at an urban and a rural site: *Weather*, **43**, 102 - 109.
- Lin, Y. L., and Smith, R. B., 1986, Transient dynamics of airflow near a local heat source. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 40-9.
- Oke, T. R., 1973, City size and the urban heat island: *Atmos. Environ.*, **7**, 769-779.
- Oke, T. R., 1981, Canyon geometry and the nocturnal urban heat island, Comparison of scale model and field observation: *J. Climatol.*, **1**, 237-254.
- Oke, T. R., 1982, The energetic basis of the urban heat island: *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24.
- Oke, T. R., and East, C., 1971, The urban boundary layer in Montreal: *Bound. Layer Meteor.*, **1**, 411-437.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Stefan, D. S., and Watson, I. D., 1991, Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2, Diagnosis of causation: *Boundary layer Meteor.*, **56**, 340-358.
- Oke, T. R., and Maxwell, G. B., 1975, The urban dynamics in Montreal and Vancouver: *Atmos. Environ.*, **2**, 446-456.
- Sheffler, J. H., 1978, Detection of centripetal heat-island circulations from tower data in St. Louis: *Boundary layer Meteor.*, **15**, 229-242.
- Vukovich, F. M., and King, W., 1980, A theoretical study of the St. Louis heat island, Comparisons between observation data and simulation results on the urban heat island circulation: *J. Appl. Meteor.*, **19**, 761-770.
- Whiteman, C. D., and Daran, J. C., 1993, The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley: *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1669-1682.
- Yague, C., Zurita, E., and Martinez, A., 1991, Statistical analysis of the Madrid heat island: *Atmos. Environ.*, **25B**, 327-332.
- منابع
- آزادی، م.، رضازاده، پ.، میرزائی، ا. و وکیلی، غ.، ۱۳۸۲، پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه‌ای پارامتری سازی‌های فیزیکی، ارائه شده در هشتمین کنفرانس دینامیک شارها.
- مرادزاده، م.، ۱۳۷۸، شبیه‌سازی فیزیکی جزیره گرمایی و الگوی دمای تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Baik, J. J., and Chun, H. Y., 1997, A dynamical model for urban heat islands: *Bound. Layer Meteor.*, **83**, 463-477.
- Delage, Y., and Taylor, P. A., 1970, Numerical studies of heat island air relations: *Bound. Layer Meteor.*, **1**, 201-226.
- Dudhia, J., Gill, D., Guo, y., and Manning, K., 2001, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users Guide: MMS Modeling System Version 3.
- Eliasson, I., and Holmer, B., 1990, Urban heat island circulation in Goteborg, Sweden: *Theor. Appl. Climatol.*, **42**, 187 - 196.
- Eugensson, M. H., and Holmer, B., 1999, Advection caused by urban heat island circulation as a regulation factor on the nocturnal urban heat island: *Int. J. Climatol.*, **19**, 975-988.
- Gedzelman S. D., Austin, S., Cermake, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., and Robinson, D. A., 2003, Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City, *Theor. Appl. Climatol.*, **75**, 29- 42.
- Godowitch, J. M., Ching, J. K. S., and Clarke, J. F., 1985, Evaluation of the nocturnal inversion layer at an urban and nonurban location: *J. Climatol. Appl. Meteor.*, **24**, 791 - 804.
- Godreich, Y., 1985, The structure of the ground - level heat island in a center business district: *J. Appl. Meteor.*, **24**, 1237-1244.
- Johnson, D. B., 1985, Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham, UK: *J. Climatol.*, **5**, 221-225.
- Kim, Y. H., and Baik, J. J., 2001, Maximum urban heat island intensity in Seoul: *J. Appl. Meteor.*, **43**, 651-659.
- Kinouchi, T., and Yoshitani, J., 2001, Simulation of urban heat island in Tokyo with future possible increases of anthropogenic heat,