

## ویژگی‌های حرارتی فضاهای باز و نیمه باز در شرایط اقلیم شهر تهران

مینا ورد<sup>۱</sup>

محسن فیضی<sup>۲</sup>

مهدی خاک‌زند<sup>۳</sup>

مرتضی اوچاقلو<sup>۴</sup>

### چکیده

دوران معاصر ما به طور کامل تحت تاثیر مسائل مربوط به عوامل محیطی است. در سال‌های اخیر توجه به طراحی معماری جهت دستیابی به معماری پایدار و سازگار با محیط زیست از دغدغه‌های معماری، معماران و پژوهشگران این حوزه می‌باشد. معماری ایران در گذشته خود به طور کامل نسبت به محیط زیست خود مسئول بوده و آسایش حرارتی ساکنین خود را بدون لطمه زدن به طبیعت و محیط زیست خود تامین می‌کرده است. لذا توجه اکولوژیکی به معماری و شهرسازی امروز و کمبود پژوهشی مباحث اکولوژیکی در معماری ضرورت پژوهشی نوشته حاضر را تبیین می‌کند. در همین راستا در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار انویمت ۳٫۱ به شبیه‌سازی ساختار مختلف فضای باز در اقلیم تهران پرداخته است. در این پژوهش فضاهای نیمه بسته، فضاهای باز، فضاهای باز محصور، فضاهای کاملاً باز در قالب طراحی محیط یک مجتمع مسکونی و رفتارهای حرارتی این فضاها بررسی می‌شود. نتایج این پژوهش بیان می‌کند. کمترین میزان دمای هوا مربوط به فضای نیمه باز است. رفتار حرارتی فضای نیمه بسته بسیار شبیه فضای نیمه باز است ولی به علت جریان هوای راکدتر دمای هوای بیشتری نسبت به فضای نیمه باز تجربه می‌کند. فضای نیمه بسته به علت مجاورت کمتر با محیط اطراف خود عموماً از میزان رطوبت کمتری برخوردار هستند. رطوبت نسبی در فضاهای باز و نیمه باز بیشتر از دمای هوا متأثر از رطوبت مطلق آن فضا است. سرعت باد در محیط‌های باز محصور از میزان کمتری نسبت به سایر نقاط برخوردار است و بطور عکس سرعت باد در فضاهای کاملاً باز میزان بالاتری را برخوردار است. همگی میانگین دمای تابشی در فضاهای نیمه بسته به کمترین مقدار خود می‌رسد.

### واژگان کلیدی:

آسایش حرارتی، فضاهای باز، فضاهای نیمه‌باز، عوامل اقلیمی.

۱. کارشناسی ارشد معماری دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. minavard@yahoo.com

۲. استاد دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران. mfaizi@iust.ac.ir

۳. استادیار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران، (نویسنده مسئول). mkhazand@iust.ac.ir

۴. کارشناسی ارشد معماری دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. morteza.ojaqlu@gmail.com

## مقدمه

به شرایط اقلیمی و فرهنگی، معماری ما را متمایز و ماندگار کرده است. با نگاهی به بناهای بومی و سنتی دیده می‌شود که این بناها شرایط ناسازگار خارج را با صرف کمترین انرژی به فضای متعادل و مطلوب داخل تبدیل می‌کنند و این همان مفهوم معماری سنتی با توجه به اقلیم است که می‌تواند در حال حاضر و در آینده تکرار شود، بدون اینکه رنگ کهنه‌گی بر خود گیرد (حیدری، ۱۳۹۳). محیط‌های باز چه در شهرسازی و معماری سنتی و چه در شهرسازی و معماری مدرن به علت حضور مردم از اهمیت خاصی برخوردار هستند ولی علی‌رغم میزان اهمیت پژوهش کافی در راستای چگونگی شکل‌گیری این فضاها انجام نگرفته است و در مقام عمل اغلب الگوهای سنتی به ناقص و شکلی مورد استفاده قرار گرفته لذا در این پژوهش به نحوه رفتار حرارتی انواع فضاهای باز در غالب یک محیط مفروض در اقلیم تهران پرداخته می‌شود.

## پیشینه تحقیق

مشخصات فیزیکی و کالبدی بناها و تاثیر آن در میزان و حدود آسایش حرارتی در اقلیم‌های متفاوت در بسیاری از پژوهش‌ها و مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج آن میزان تکرار این پژوهش‌ها بیانگر قابل تعمیم بودن این داده‌ها می‌باشد (Berkovic et al., 2012; Ghaffarianhoseini et al., 2015; Taleghani et al., 2014; Fahmy & Sharples, 2009).

عواملی چون:

- جهت‌گیری
- میزان ارتفاع
- میزان بازتابش مصالح
- میزان فضای سبز

عامل مشترک بررسی ویژگی کالبدی بناها با توجه به دستیابی به حدود آسایش حرارتی در فضا هستند. جهت‌گیری در راستای جذب کمترین تابش در اقلیم‌های

در حال حاضر توجه به نیازهای اساسی شهروندان در محیط‌های شهری و توجه به برطرف نمودن مشکلات و معضلات اقلیمی به منظور کاهش نارضایتی و افزایش سطح سلامت در محیط‌های باز شهری از جمله مسائلی است که اخیراً مورد توجه، برنامه‌ریزان و طراحان شهری و معماری قرار گرفته است و همچنین استفاده از راهکارهای غیر فعال در مسائل طراحی معماری، همواره جزو مهم‌ترین مسایل به شمار می‌رود. تعامل صحیح کالبد معماری با محیط پیرامون آن توجه به الزامات این تعامل جهت دستیابی بالا ترین سطح آسایش حرارتی چه در فضاهای بیرون و باز ساختمان‌ها و چه در فضاهای داخلی از حوزه‌های پر از پرسش معماری در حوزه طراحی اقلیمی و پایدار است. چگونگی طراحی ساختمان‌ها به عنوان یکی از شاخص‌ترین عنصر شهری، تاثیر بسزایی بر تغییرات محیط زیست و میزان مصرف منابع زیرزمینی موجود خواهد داشت. سالهاست که محققین در حوزه‌ی اقلیم‌شناسی، معماری به مطالعه رابطه انسان با محیط و عوامل مؤثر بر آن می‌پردازند. انسان و محیط تاثیرات متقابلی بر یکدیگر دارند که اساس این پژوهش‌ها را بنیان نهاده است. توجه به این روابط، سعی در روشن ساختن چگونگی آن و اثرگذاری‌های متقابل بنا و محیط بر یکدیگر، و تاثیر این دو بر احساس انسانی مورد پژوهش، پژوهشگران این عرضه از دوران باستان با به امروز بوده است. گذشتگان هوشیار ما، در اقلیم‌های متفاوت روش‌های متفاوتی برای تطابق معماری با اقلیم برای رسیدن به آسایش حرارتی و در نتیجه صرفه‌جویی مصرف انرژی به کار می‌بستند. در ایران، توجه خاص به استفاده‌ی صحیح و مؤثر از انرژی تجدید پذیر با روش‌های بسیار ساده و به کارگیری تکنیک‌های سنتی و بومی با توجه

درصدهای مختلف فضای سبز مطابق موارد زیر پرداخته‌اند.

- (۱) ۱۰۰ درصد زمین پوشیده از چمن طبیعی
- (۲) پوشش ۲۰ درصدی
- (۳) پوشش ۴۰ درصدی
- (۴) پوشش ۶۰ درصدی

در این مطالعات به جنبه‌های مختلف فضای سبز و تاثیر آن مورد بررسی قرار گرفته است. نقش تبخیری و جذب دمای محیط منجر به کاهش دمای در شاخص‌های دمایی متفاوتی مانند PET گشته است (Wong et al., 2008; Chen & Ng, 2013; Yang et al., 2007; Emmanuel et al., 2013). فضای سبز و ایجاد فضای سایه و جلوگیری از نفوذ تابش مستقیم به سطوح عمودی و افقی منجر به کاهش دمای سطوح و همچنین میانگین دمای تابشی می‌شود (Gál, 2014; Asawa et al., 2016; Tan et al., 2016; Li et al., 2008). اخیراً موضوع روانی و تاثیر ذهنی فضای سبز مورد بررسی قرار گرفته و اشاره شده است علاوه بر تاثیرات محیطی فضای سبز و درختان در کاهش دمای هوا و دمای تابشی محیط، وضعیت ذهنی و احساس حرارتی ناشی از حضور فضای سبز و درختان موجب ارتقاء وضعیت و رضایت حرارتی افراد محیط می‌شود (Peng & Jim, 2013; Wang et al., 2008; Spangenberg et al., 2015). مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی بناها در مطالعات اشاره شده را می‌شود به اقلیم‌های متناظر تعمیم داد.

در این پژوهش با توجه به مطالب اشاره به سایر مشخصه‌های فیزیکی محیط و ساختار شکلی آنها مطابق موارد ذیل پرداخته می‌شود که تاکنون کمتر به این موضوع پرداخته شده است.

- فضاهای نیمه بسته
- فضاهای نیمه باز

گرم و مرطوب و خشک (Ghaffarianhoseini et al., 2015) و حیاط مرکزی در اقلیم‌های معتدل (Taleghani et al., 2014). توصیه گشته‌اند. افزایش ارتفاع و تاثیر آن در افزایش میزان دمای شبانه در بسیاری از مطالعات برای اقلیم‌های مختلف گزارش شده است به جهت جذب میزان بیشتر باز تابش غیر مستقیم در فضاهای باز عمیق این فضاهای با کاهش میزان تابش معکوس در شب مواجه شده بیشتر میزان بازتابش از مصالح بوسیله خود محیط این فضاها جذب شده موجب افزایش دمای سطوح شده و در کنار این موضع فضاهای باز عمیق از میزان تهویه کمتری برخوردار است و همه این موارد موجب افزایش دمای هوا و همچنین افزایش میزان میانگین دمای تابشی در محیط‌ها می‌شود (Wang et al., 2015; Lindberg et al., 2015; Ghaffarianhoseini et al., 2015; Almhafdy et al., 2008). مصالح با میزان باز تابش بالا موجب جذب بیشتر این تابش‌ها چه بصورت مستقیم و چه غیر مستقیم بوسیله عوامل محیط باز و انسان‌ها حاضر در محیط‌ها می‌شود لذا در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده ۳ مقدار میزان باز تابش مطابق موارد ذیل تحت عنوان آلبدو<sup>۱</sup> بررسی شده‌اند:

- (۱) ۰,۳ مانند آجر و بتن
- (۲) ۰,۵۵ مانند سنگ مرمر
- (۳) ۰,۹ مانند سطوح براق

در این مطالعات میزان آلبدو ۰,۳۳ به عنوان مناسب‌ترین مصالح برای اقلیم‌های گرم و مرطوب، گرم و خشک و معتدل عنوان شده است (Salata et al., 2015; Huttner, 2012; Ambrosini et al., 2014; Shahidan et al., 2012). نقش فضای سبز و تاثیر آن در بهبود شرایط دمایی و اقلیمی فضای باز در مطالعات متعددی بیان شده‌اند و اخیراً در پژوهش‌های بسیاری به شبیه‌سازی میزان

- فضاهای باز محصور

- فضاهای کاملاً باز

دسته‌بندی فضاهای باز از نظر رفتارهای آنان موضوعی است بعد از چالش‌های حرارتی شهرها مطرح گردید و در مطالعات گوناگونی به بررسی پاسخ‌دهی محیط‌های شهری از نظر حرارتی پرداختند (Ahmed, 2003; Nikolopoulou & Steemers, 2003; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006; Cheng & NG, 2006). میزان آسایش حرارتی در محیط‌های نیمه بسته اطراف فضاهای سبز و محیط‌های مجاور فضاهای نیمه باز در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ مورد مطالعه میدانی قرار گرفت و نتایج آن بیانگر کاهش دمای ۶٫۵ کلونی در فضای باز و فضاهای سبز مجاور فضاهای شهری کاهش ۱ تا ۱٫۵ کلونی در ساعات روز نسبت به محیط اطراف خود دارند (Tsiros & Hoffman, 2014).

## روش‌های ارزیابی آسایش حرارتی در فضای نیمه باز

### ۱- روش ارزیابی ایستا<sup>۱</sup>

برای ارزیابی آسایش حرارتی فضای نیمه باز دو اصل عمده وجود دارد: ارزیابی ایستا و ارزیابی نایستا و فعال. حالت اول به بررسی قرارگیری انسان در برابر محیط پیرامونی خود و تبادل حرارتی با آن است، بنابراین معادلات عددی تعادل انرژی برای کنترل میزان تنظیم حرارتی استفاده می‌شود. در این روش مشکلاتی در خصوص رفتارهای حرارتی انسان وجود دارد (Chen & NG, 2012). بسیاری شاخص‌های حرارتی رایج در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص حرارتی  $PMV^2$  بوسیله فانگر<sup>۳</sup> معرفی شد و این شاخص حرارتی به پیش‌بینی پاسخ حرارتی انسان در قالب دسته‌بندی

هفت‌گانه می‌پردازد. این شاخص بوسیله شاخص حرارتی شاخص حرارتی PPD<sup>۴</sup> مورد بسط و تفسیر قرار گرفت که در آن به درصد نارضایتی حرارتی افراد بوسیله شاخص PMV می‌پردازد هرچند این دو شاخص یاد شده اساساً برای فضای داخل طراحی و لحاظ شده است و این شاخص‌ها برای فضای باز و نیمه باز مناسب نیست (Chen et al., 2011; Thorsson et al., 2004). دمای معادل فیزیولوژیکی PET<sup>۵</sup> (Mayer & Hoppe, 1987) شاخص حرارتی رایجی برای ارزیابی شرایط حرارتی افراد در روش ایستا و پایدار برای فضاهای باز و نیمه باز است. در فضاهای باز و نیمه باز برای بررسی تاثیر تابش‌های مستقیم و غیر مستقیم بر انسان از شاخص PET استفاده می‌شود که معتبرترین شاخص حرارتی برای فضاهای باز و نیمه باز است. در تعریف PET به برهم کنش عوامل اقلیمی و تعادل و تبادل حرارتی بدن انسان با عوامل محیطی توجه می‌شود و ارزیابی نهایی آنها اساس دمای پوست انسان در شرایط محیطی باز انجام می‌شود (Hoppe, 1999). بکارگیری شاخص حرارتی PET دارای مزیت‌های نسبت به سایر شاخص‌های حرارتی هست، اولاً تاثیرات تمامی عوامل اقلیمی بوسیله پاسخ‌های آن قابل مقایسه و ارزیابی است (Hoppe, 1999) ثانیاً در شاخص حرارتی PET از واحدهای آشنا مانند سلسیوس است (Gulyas et al., 2006). سوم استفاده از شاخص حرارتی توسط افراد غیر متخصص است (Lin et al., 2010). مزیت چهارم محاسبه آسان و راحت آن بوسیله نرم‌افزارهای رایگان مانند ریمن<sup>۶</sup> است (Matzarakis et al., 2007).

1. Steady-state method
2. Predicted mean vote
3. Fanger
4. Predicted Percentage Dissatisfied
5. Physiological Equivalent Temperature
6. Rayman

## ۲- روش ارزیابی غیر ایستا<sup>۱</sup>

به حالت عکس، مدل "دو گره پیرس" سنگ بنای ارزیابی حرارتی به روش دینامیک است (Gagge, 1986). مفهوم ارزیابی غیر ایستا برای وضعیت غیر فعال بر پایه‌ی تقسیم پیکر انسان به دو قسمت پوست و هسته و درون بدن انسان، میزان انحراف دمای سطح پوست و دمای درونی انسان و محاسبات نرخ‌های تعریق در این روش به سادگی قابل محاسبه هستند (Hoppe, 2002). استفاده از روش غیر ایستا در فضاهای باز و نیمه باز به خاطر فعالیت انسان در فضای باز مورد پیشنهاد قرار می‌گیرد و همچنین استفاده از ارزیابی حالت ارزیابی ایستا برای فضای باز و نیمه باز در شرایطی قابل استفاده که مدت حضور افراد در آن کمتر یک ساعت باشد. با توجه تعامل و سازگاری گرمایی انسان در این روش قابل مشاهده است اما مشکل اصلی این روش کنترل نشانگرهای حرارتی انسان مانند دمای متوسط بدن در فضاهای نیمه باز و باز است و مشکل بعدی شرایط روانی حاکم بر وضعیت حرارتی در این روش لحاظ نشده است.

## شبیه‌سازی و محاسبات رایانه‌ای

ساختمان یک محیط بسیار پیچیده است، جایی که و جداره‌های بیرونی آن، سیستم‌ها و تجهیزات تاسیساتی و سیستم نورپردازی و روشنایی مهمترین مولفه‌های مصرف انرژی را شکل می‌دهند و به صورت سیستمی یکپارچه، رفتار انرژی را مشخص می‌کند. لذا درک و فهم عملکرد انرژی به مثابه نتیجه و حاصل همه جنبه‌های فرآیند طراحی ساختمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و خود پیچیدگی زیادی را در بر دارد که ابزارهای مدل سازی و تحلیل می‌تواند تا حدی موثر باشد (Hong, 2000). از میان این ابزارها که در اختیار افراد و کارشناسان درگیر با حیطه فرآیند طراحی قرار دارد،

کارترین آنها در زمینه ارزیابی رفتار انرژی، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی هستند. این نرم‌افزارها با ایجاد محیط مجازی ساختمان، این امکان را فراهم می‌آورند تا پیش‌بینی عملکردی ساختمان تا حد ممکن نزدیک به واقعیت باشد و با بهینه‌سازی و بهبود طرح خود، فن‌آوری‌های جدید صرفه جویی و انرژی کارا را معرفی کند (Hensen, 2002). از آنجا که رفتارهای حرارتی جاری در ساختمان متشکل از رفتارهای گوناگون است، انواع مختلفی از شبیه‌سازی برای تحلیل این رفتارهای مختلف به وجود آمده است. معماران برای به کارگیری شبیه‌سازی، لازم است از انواع و کاربرد هر یک از آنها آگاه باشند تا بتوانند روش مناسبی را در زمان مناسب برای انجام شبیه‌سازی انتخاب کنند. تاثیر شبیه‌سازی در فرایند طراحی زمانی چشمگیر است که تحلیل عملکرد انرژی در گام‌های آغازین طراحی تشخیص داده شوند. طی ۵۰ سال اخیر بیش از صدها برنامه شبیه‌سازی مرتبط با مبحث انرژی در ساختمان توسط سازمان‌های مختلف درگیر در این حوزه، پیاده‌سازی و استفاده شده است. اصلی ترین این نرم‌افزارها، مواردی هستند که بنا را به طور کامل شبیه‌سازی کرده و مواردی نظیر میزان مصرف در دوره‌های مختلف، هزینه انرژی، محاسبات مربوط به دما و رطوبت را که نتایج شاخص‌های اصلی عملکرد انرژی در ساختمان هستند، در قالب خروجی‌های مختلف مشخص می‌کنند. به طور کلی نرم‌افزارهای تحلیل انرژی موجود به دو دسته روش‌های پیشرو و معکوس تقسیم می‌شوند. در روش پیشرو، پیش‌بینی‌های انرژی بر اساس توصیف کالبدی مانند پیکربندی، موقعیت، جزئیات مصالح و نوع عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انجام می‌گیرد. اکثر ابزارهای شبیه‌سازی انرژی موجود از رویکرد مد پیشرو تبعیت می‌کنند. در رویکرد معکوس، مدل تحلیل انرژی سعی

فضاهای باز و نیمه باز را ندارد. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی محیطی مانند انویمت<sup>۳</sup> (Bruse & Fleer, 1998)، سول وینگ<sup>۴</sup> (Lindberg et al., 2008) و تاون اسکوپ<sup>۵</sup> (Teller et al., 2001) به تحلیل یکپارچه محیط‌های ساخته شده اعم از باز و نیمه باز می‌پردازند. در دسترس بودن نسخه آموزشی انویمت و توسعه این نرم‌افزار منجر به استفاده وسیع پژوهشگران از این نرم‌افزار شده است.

### روش تحقیق

در این پژوهش به منظور تعیین ویژگی‌ها و ساختارهای حرارتی فضاهای باز و نیمه باز از روش شبیه‌سازی استفاده گردیده است. همچنین در این تحقیق با در نظر گرفتن گونه‌های مطالعه شده فضای باز به بررسی یکپارچه فضاهای باز و نیمه باز پرداخته می‌شود. ارتفاع مجتمع مسکونی با توجه به فراوانی ارتفاع آنها به انتخاب بلوک‌های ۱۰ طبقه به عنوان بناهای نمونه انتخاب می‌شود (عینی‌فر و قاضی‌زاده، ۱۳۸۹). میزان فضای باز این مجتمع با توجه دستورالعمل شورای عالی شهرسازی و معماری ایران (۱۳۸۳) محاسبه گردید و مطابق نتایج آن، میزان ۷۰٪ درصد لحاظ می‌گردد. شبیه‌سازی اقلیمی این مجتمع مسکونی فرضی توسط نرم‌افزار انویمت انجام می‌گردد و روز ۱۵ مرداد ۱۳۹۶ به عنوان گرمترین روز سال ۹۶ (یکشنبه-۱۵ مرداد ۱۳۹۶) به عنوان روز مبنای شبیه‌سازی انتخاب گردید و نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار لئونارد<sup>۶</sup> و مصور و تحلیل می‌گردد. بخش اعتبار سنجی این مقاله به روش اندازه‌گیری میدانی و مقایسه آن به نتایج بدست آمده از فرایند شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. اطلاعات اندازه‌گیری

می‌کند با استفاده از مصرف انرژی فصلی، آب و هوا و داده‌های مربوط به کارایی، نمونه عوامل ساختمان مانند ضریب بار ساختمان، بار پایه ساختمان یا ثابت زمانی ساختمان را استنتاج کند. مدل‌های معکوس به لحاظ تنظیم روابط، نسبت به مدل‌های پیشرو از پیچیدگی کمتری برخوردار هستند (قیابکلو، ۱۳۸۶). محاسبه میزان انرژی مصرفی ساختمان به سه روش پایدار، نیمه پایدار و ناپایدار امکان پذیر است که عمدتاً نرم‌افزارهای موجود به روش نیمه پایدار انرژی مصرفی، ساختمان را محاسبه می‌نمایند.

### شبیه‌سازی فضاهای باز و نیمه باز

استفاده از نرم‌افزار پایه و اساس شبیه‌سازی کامپیوتری است. به عنوان رویکرد کلی، در این روش با ورود اطلاعات و شرایط محیطی مانند ساختمان‌ها، درختان، شرایط آب و هوایی و سایر عوامل و خروجی آن پیش‌بینی و ارائه پارامترهای محیطی مرتبط با این عوامل فرضی است. میانگین دمای تابشی<sup>۱</sup> به عنوان مهم‌ترین پارامتر محیطی موثر بر آسایش حرارتی انسان در بعضی از نرم‌افزار به طور صحیح و موثق قابل اندازه‌گیری و پیش‌بینی است به عنوان مثال ریمن بوسیله پروفیسور ماتزاراکیس در سال ۲۰۰۷ معرفی شد. در این نرم‌افزار با استفاده از عامل موثر ضریب دید به آسمان<sup>۲</sup> و سایر عوامل محیطی مانند دمای هوا، سرعت باد و... به محاسبه میانگین دمای تابشی پرداخته می‌شود و لذا به طبع آن شاخص‌های حرارتی متنوعی در قابل محاسبه است و به دلیل میزان دقت در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است اما این نرم‌افزار صرفاً محاسباتی بوده و قابلیت پیش‌بینی و تحلیل شرایط اقلیمی در

1. Mean Radiant Temperature (Tmrt)  
2. Sky View Factor (SVF)  
3. Envi-met  
4. SOLWEIG  
5. Town scope  
6. eonardo

می‌رود. انویمت ترکیب ۴ عامل خاک، گیاهان، اتمسفر و ساختمان است.

در نسخه ۴ این مدل انویمت تغییرات زیادی در راستای ارتقاء صحت خروجی‌های این مدل انجام گرفته است. محیط ۳ بعدی جدید به لحاظ گرافیکی به محیط مدل اضافه شده است که جزئیات بیشتری را در حوزه معماری شامل می‌شود.

ویژگی‌های اصلی انویمت ۴ به شرح زیر است:

۱: اصلاح گر کامل محیط ۳ بعدی

۲: محاسبه دقیق‌تر و پیشرفته‌تر دما نما و تعدیل انرژی

۳: سیستم فورسینگ (Forcing)، (Huntner &

Bruse, 2009).

یکی از مهمترین ویژگی‌های مدل انویمت محاسبه دقیق صحیح میانگین دمای تابشی (Tmrt) در شرایط فضای باز است (Huntner et al., 2008; Chow & Brazel, 2012). از محدودیت‌های این مدل محاسبه شاخص حرارتی PET در نسخه‌های آموزشی و رایگان آن است.

### اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی انویمت ۳,۱

به همین منظور برای دستیابی به اطلاعات شبیه‌سازی معتبر اطلاعات ساعتی اندازه‌گیری شده دمای هوا در محوطه مجتمع مسکونی اکباتان تهران با اطلاعات پیش‌بینی شده توسط انویمت ۳,۱ (ENVI-met3.1) مقایسه گردید. به منظور کاهش تاثیر تابش بر روی دمای هوا سنسور (sensor) اندازه‌گیری دمای هوا با وسیله یک محافظ پارچه ای سفید رنگ محافظت گردید. به همین منظور دمای هوای محوطه مجتمع مسکونی اکباتان تهران به طور متوالی به مدت ۲ روز در خرداد و تیر ۱۳۹۶ اندازه‌گیری گردید ۲۸ خرداد ماه و ۳ تیر ماه ۱۳۹۶ برای شبیه انتخاب شداند. همه اطلاعات اقلیمی

شده در بخش اعتبارسنجی نرم‌افزار بوسیله دیتا لاگرا<sup>۱</sup> لوترون ال-ام ۲۸۰۰۰ در ارتفاع ۱,۴ متری گردیده است. میزان وابستگی عناصر محیطی با عوامل اقلیمی در نرم‌افزار آماری تحلیل اس پی اس اس<sup>۳</sup> انجام گردیده است.

### نرم‌افزار انویمت ۳,۱ (ENVI-met3.1)

این مدل یک برنامه ۳ بعدی اقلیمی برای شبیه‌سازی تاثیرات متقابل بین سطوح، گیاهان و هوا در محیط‌های شهری است. این مدل توسط پروفیسور مایکل بروس (micheal Bruse) در دانشگاه ماینز آلمان (mainz university) طراحی شده (Bruse, 1999) و در حال توسعه است (Bruse, 2004). این نرم‌افزار در تحقیقات بسیاری مورد استفاده و آزمایش قرار گرفته است (Huttner et al., 2008; Ambrosini et al., 2014; Elnabawi et al., 2013; Allegrini et al., 2015; Taleghani et al., 2015; Ghaffarianhoseini et al., 2015).

این مدل به خاطر پوشش کامل فرایند شبیه‌سازی محیط‌های شهری مورد توجه قرار گرفته و صحت نتایج آن در بسیاری از تحقیقات به اثبات رسیده و محدودیت‌های استفاده از آن نیز مشخص شده است.

برای شبیه‌سازی واکنش‌های متقابل سطح-گیاه-هوا بلکه برای محیط‌های درون شهری و تجزیه و تحلیل رژیم آسایش دمایی در مقیاس‌های خرد کاربرد دارد این مدل با قدرت تفکیک افقی از ۰,۵ تا ۱ متر و چارچوب زمانی ۲۴ تا ۴۸ ساعت تا کمینه‌ی گام‌های زمانی ۱۰ ثانیه طراحی شده است که به دلیل قدرت فضایی بالا درک تغییرات خرد آب و هوایی را آسان نموده است و دارای چهار برنامه‌ی مکمل از جمله نرم‌افزار لئوناردو نیز است که برای تفسیر و تحلیل داده‌های خروجی مدل به صورت نقشه و نمودار به کار

1. Data logger  
2. Lutron LM-8000  
3. SPSS

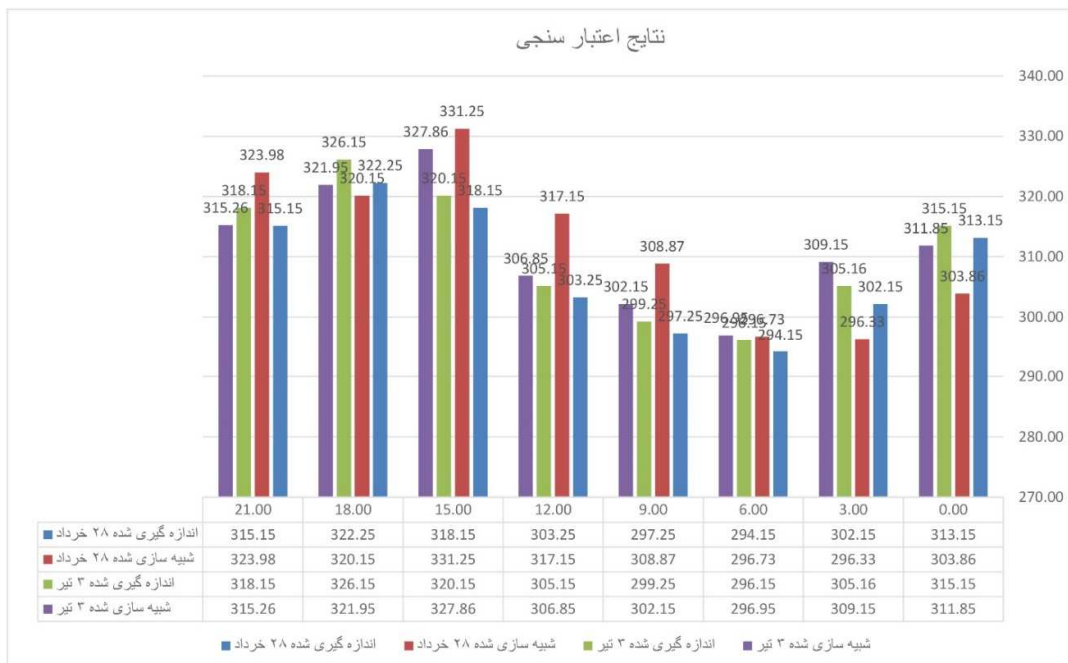
در ارتفاع ۱٫۴ متری از سطح زمین اندازه گیری شده‌اند. ساختار اقلیمی محلی نیاز است که مطابق جدول ۱ در برای شبیه سازی با انویمت فایل مربوط به محوطه و فایل نظر گرفته شده است.

جدول (۱): اطلاعات شبیه سازی. ماخذ. نگارندگان

Simulation day	23. 06. 2017	17. 06. 2017
Simulation period	24h(21:00-21:00)	24h(21:00-21:00)
Spatial resolution	1m horizontally,2m vertically	1m horizontally,2m vertically
Wind speed	1m/s	0m/s
Air temprature	294. 15	296. 15
Wind direction (N=0,E=90)	315	45
Relative midity(in 2m)	64. 58%	34. 87%
Indoor temprature	293K(20°C)	293K(20°C)
Heat transmission	Wall=1. 6 w/m <sup>2</sup>	Wall=1. 6 w/m <sup>2</sup>
albedo	Wall=0. 21 roofs=0. 18	Wall=0. 21 roofs=0. 18
Walking Speed (m/s)	0. 0	0. 0
Energy-Exchange (Col. 2 M/A)	116	116
Mech. Factor	0. 0	0. 0
Heattransfer resistance cloths	0. 5	0. 5
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm)	294. 15	296. 15
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm)	292. 35	293. 15
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)	8842	289. 3
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	64	34
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	66	37
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	70	39

شده است. اندازه گیری و مقایسه دمای هوا از جهت کاربردی بوده اطلاعات بدست آمده در بخش تحلیل یافته ها اهمیت پیدا می کند.

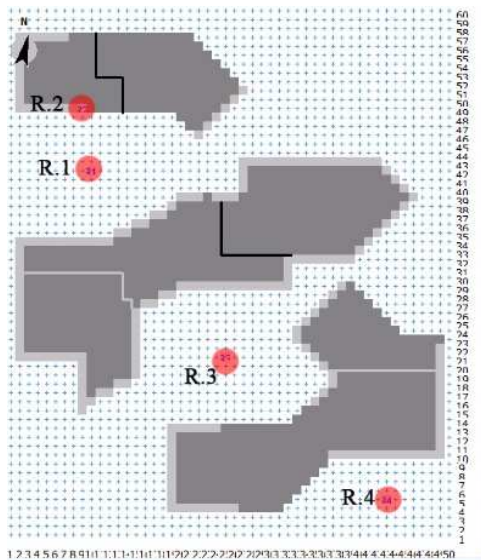
دمای هوا به عنوان محسوس ترین عامل اقلیمی در بازه های زمانی ۳ ساعته و اندازه گیری و مقایسه شده است. اطلاعات پایه برای شبیه سازی بر اساس اطلاعات ساعت ۶ صبح روز مرجع اندازه گیری و در نظر گرفته



تصویر (۱): مقایسه دماهای فرآیند اعتبار سنجی



- مطابق نتایج بدست آمده از فرایند اندازه‌گیری و شبیه‌سازی ملاحظه می‌گردد فرایند تغییر دماها و همبستگی دما از مقادیر مناسبی برخوردار است. بنابراین برای تعیین میزان صحت اطلاعات بدست آمده از فرایند شبیه‌سازی از نرم‌افزار اس‌پی‌اس‌اس استفاده گردید و بوسیله ضریب همبستگی پیرسون تحلیل گردیده و مطابق شکل ۱ و بر اساس مقایسه اطلاعات بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدانی، ضریب همبستگی پیرسون برای درک و اثبات میزان صحت اطلاعات شبیه‌سازی محاسبه گردید و نتایج آن از همبستگی ۷۲ درصدی اطلاعات برای روز ۲۸ خرداد ( $R=0.72$ ) و همبستگی ۹۳ درصدی برای روز ۳ تیر ( $R=0.93$ ) خبر می‌دهند. بنابراین نتایج شبیه‌سازی از میزان قابل قبول صحت برای دمای هوای محوطه مجتمع مسکونی اکباتان تهران برخوردار است و این اطلاعات می‌توانند برای شهر تهران تعمیم داده شوند.
- تحلیلی اقلیمی این نقاط بوسیله گیرنده‌های مجازی در نقاط مشخص شده در ارتفاع ۱٫۴ متری ثبت می‌گردد.
- اطلاعات اقلیمی پایه ای این شبیه‌سازی مربوط به روز ۱۵ مرداد ۱۳۹۶ می‌باشد.
- اطلاعات اقلیمی برای شبیه‌سازی بر اساس گزارش سازمان هوا شناسی کل کشور استخراج و مطابق جدول تنظیم گردید.
- کلیه اطلاعات شبیه‌سازی در وسط حیاط مرکزی و در ارتفاع ۱٫۴ متری محاسبه گردیده است.



تصویر (۲): مکان‌های گیرنده‌های اقلیمی در مدل انویمت، (ماخذ: نگارندگان)

**تحلیل محیطی مجتمع مسکونی طراحی شده**  
 برای تحلیل اقلیمی مجتمع مسکونی ۴ گیرنده مجازی مطابق تصویر (۲) قرار گرفته است.  
 فضاهای باز این مجتمع مسکونی به ۴ حالت:

- فضای نیمه بسته
- فضای نیمه باز
- فضای محصور
- فضای باز

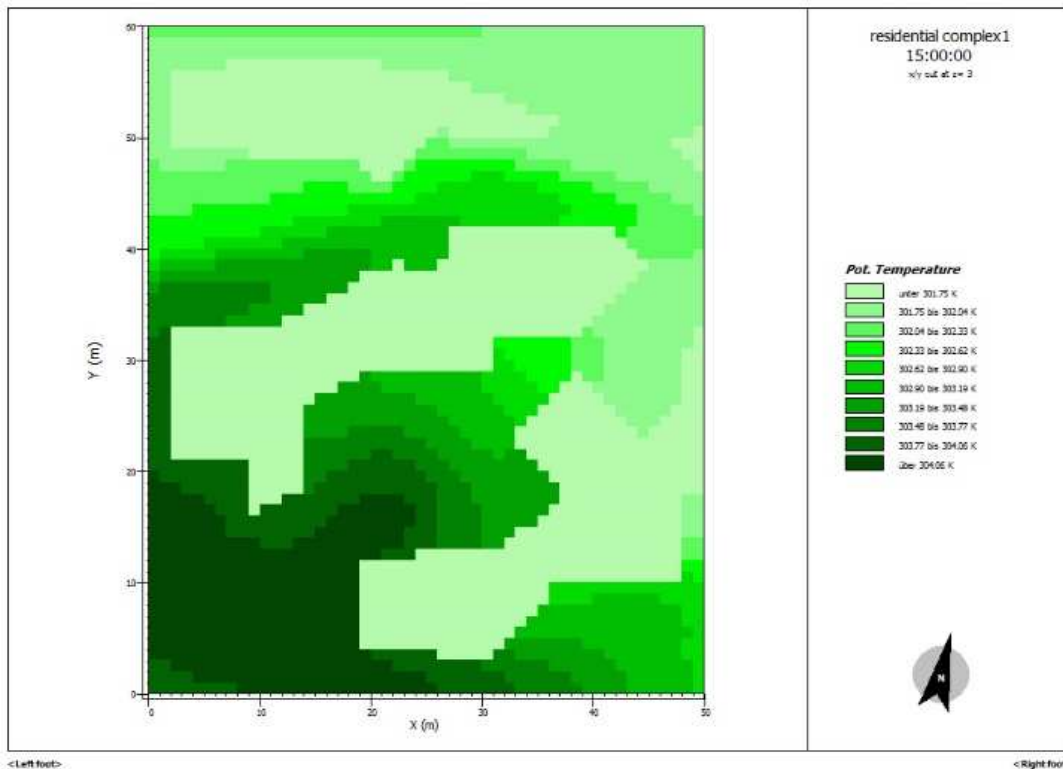
جدول (۲): اطلاعات اقلیمی روز ۱۵ مرداد ۱۳۹۶ تهران برای شبیه‌سازی، (ماخذ نگارندگان)

Simulation day	06. 08. 2017
Simulation period	14h(6:00-20:00)
Spatial resolution	1m horizontally,2m vertically
Initial Temperature	294. 15(21) °C
Wind speed	3m/s
Wind direction (N=0,E=90)	270
Relative humidity(in 2m)	73. 27%
Indoor temperature	295. 15K(20°C)
Heat transmission	Wall=1. 6 w/m <sup>2</sup>
albedo	Wall=0. 21 roofs=0. 18
Walking Speed (m/s)	0. 0
Energy-Exchange (Col. 2 M/A)	116
Mech. Factor	0. 0
Heattransfer resistance cloths	0. 5

### مقایسه دمای هوا در نقاط منتخب

در تحلیل دمای هوای فضای یاد شده از همان ساعت ابتدایی شبیه‌سازی نقاط ۴ و ۳ به سرعت شروع به افزایش دمای خود می‌کنند و دمای هوای نقطه ۴ (فضای نامحصور و باز) به علت قرارگیری در معرض فضای بکر مجاور خود به میزان ۱٫۵ درجه در ساعت اوج خود (۱۴:۰۰) از سایر نقاط گرمتر می‌باشد. افزایش دمای هوای به تابع شرایط محیطی اطراف خود می‌باشد اما تاثیر محیط اطراف بر میزان جابجایی دمای هوا به دلیل جابجایی هوا عموماً ناپایدار بوده و به سرعت به هم دمایی با دمای همای محیط خود می‌رسد. لذا هر چه محیط محصور تر میزان رکود هوا بیشتر شده باشد، بیشتر تحت تاثیر هوای محیط اطراف خود قرار می‌گیرد

و لذا اگر محیط ساخته شده مستعد خنکی باشد دمای هوای کمتری نسبت به دمای هوای پایه تولید می‌کند این امر در گیرنده مجازی نقطه ۳ اتفاق می‌افتد (فضای محصور) امکان حرکت هوا در محیط‌های به مصالح رنگ روشن و داری فضا سبز موجب تاثیرپذیری بیشتر دمای هوا در محیط‌های نیمه باز می‌باشد لذا کمترین میزان دمای هوا مربوط گیرنده مجاری شماره ۱ می‌باشد (فضای نیمه باز) است. رفتار حرارتی فضای نیمه بسته بسیار شبیه فضای نیمه باز است ولی به علت جریان هوای راکدتر دمای هوای بیشتری نسبت به فضای نیمه باز تجربه می‌کند. رفتار دمای هوای نقاط منتخب به تفکیک ساعت در نمودار ذیل بیان شده است.



تصویر (۴): تصویر محیط دمای هوا در ساعت ۱۵. ماخذ: نگارندگان

### مقایسه رطوبت نسبی در نقاط منتخب

رطوبت نسبی از عوامل اقلیمی هست که به شدت وابسته دمای هوا بوده و میزان آن در هوا متناسب با تغییر دما تغییر می‌کند. در قسمت قبل دریافته شد که اختلاف

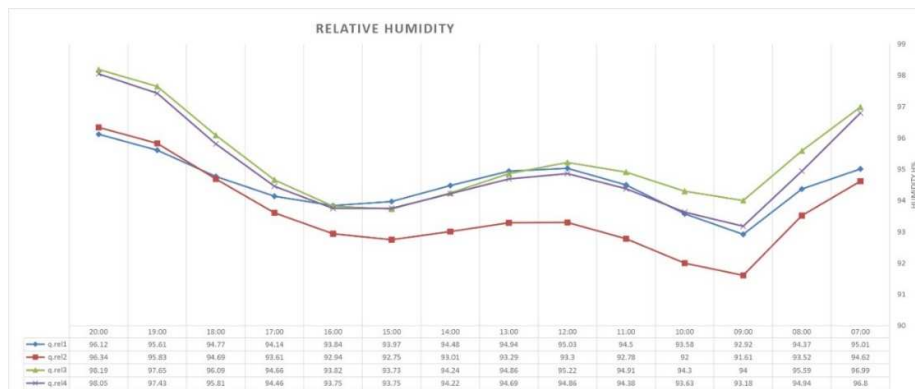
دمای بین نقاط مختلف زیاد نبوده و بیشینه اختلاف از ۱٫۵ درجه فراتر نمی‌رود. بنابراین تغییرات رطوبت نسبی این نقاط تابعی از میزان مطلق رطوبت موجود است نه دمای هوا. بنابراین میزان تغییرات متناظر بین نقاط فرار

برخوردار هستند و نسبت به سایر فضاها در طول روز، میزان کمتری از رطوبت نسبی را تجربه می‌کند. نمودار زیر میزان تغییرات رطوبت نسبی را در ساعات شبیه‌سازی را بیان می‌کند.

### مقایسه سرعت هوا در نقاط منتخب

حدود آسایش حرارتی با تغییر دامنه سرعت هوا جابجا می‌شود. لزوماً افزایش یا کاهش سرعت هوا به افزایش و کاهش حدود آسایش منجر نمی‌شود. بنا بر این کنترل میزان جریان هوا به شدت وابسته برهم کنش سایر عوامل محیطی ولی در حالت کلی برای کاهش تاثیر میزان تاثیر دمای هوای بالا تهویه و کوران هوا راهکاری عمومی و کلی است. پدیده تشدید و یا کاهش سرعت هوا به خاطر تغییر هندسه محیطی امری اجتناب ناپذیر در محیط‌های ساخته شده است. وجه و هندسه‌ی رو به باد و نیز وجود فضای پر فشار و کم فشار امری است که توأمآ منجر به افزایش موضعی سرعت هوا در محیط نیمه بسته محیط شبیه‌سازی شده است و نقطه شماره ۱ از میزان تهویه طبیعی بیشتری نسبت سایر محیط‌ها و نقاط موجود برخوردار است و همین امر موجب می‌شود که در صورت وجود شرایط اقلیمی مناسب بتوان دامنه حدود آسایش حرارتی را در اینگونه محیط‌ها به وسیله افزایش موضعی سرعت هوا را افزایش داد. مطابق همین

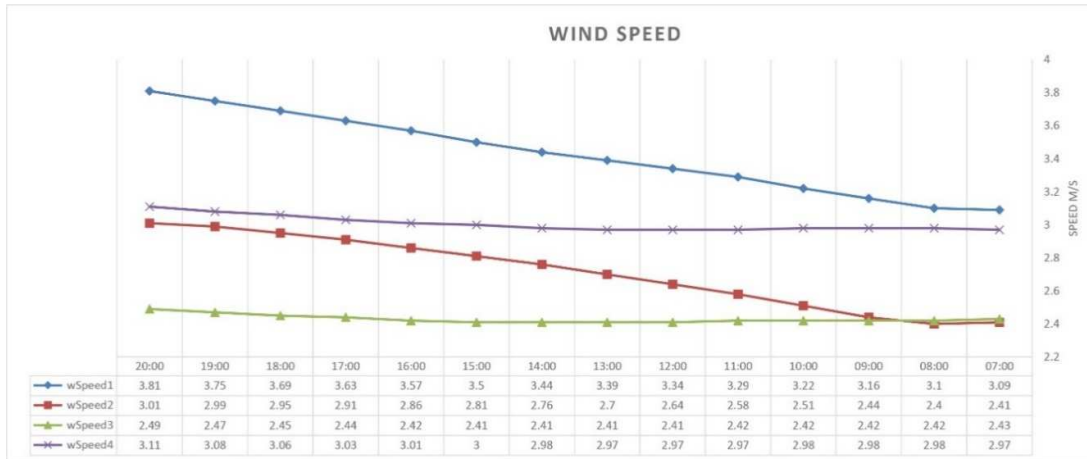
تر ۱٫۵ درصد نمی‌رود. کنترل میزان رطوبت در دستیابی به محدوده آسایش حرارتی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. رفتار یکسان نمودار نشان دهنده بر هم کنش همزمان میزان رطوبت مطلق و دمای هوا بر رطوبت نسبی نقاط منتخب است. در ساعات ابتدایی روز با افزایش میزان تابش و گرم شدت تدریجی هوا میزان رطوبت نسبی شروع به کاهش می‌کند و این روند تا ساعت ۹ صبح ادامه پیدا می‌کند. با افزایش میزان گرما و مطابق آن افزایش میزان تبخیر سطحی سطوح سبز محیط میزان رطوبت نسبی در نقاط به صورت تدریجی شروع به افزایش می‌کند و در ساعت ۱۲ ظهر به بیشینه مقدار خود می‌رسد و با ثابت شدن میزان تبخیر دوباره میزان دما در کاهش رطوبت نسبی موثر واقع می‌شود و با افزایش تدریجی دما رطوبت نسبی کاهش و این کاهش تا ساعت ۱۶ بعد از ظهر ادامه می‌یابد و ساعات بعد از ظهر با کاهش دمای محیط و نزدیک شدن به ساعات پایانی روز رطوبت نسبی نیز شروع به افزایش میزان خود با سرعت بیشتری می‌کند و در تمامی نقاط در ساعت ۲۰ رطوبت نسبی به بیشترین میزان خود می‌رسد. مطابق قسمت قبل فضای نیمه بسته و نیمه باز درصدهای مشابه هم در مورد رطوبت نسبی تولید می‌کنند. فضای نیمه بسته به علت مجاورت کمتر با محیط اطراف خود عموماً از میزان رطوبت کمتری



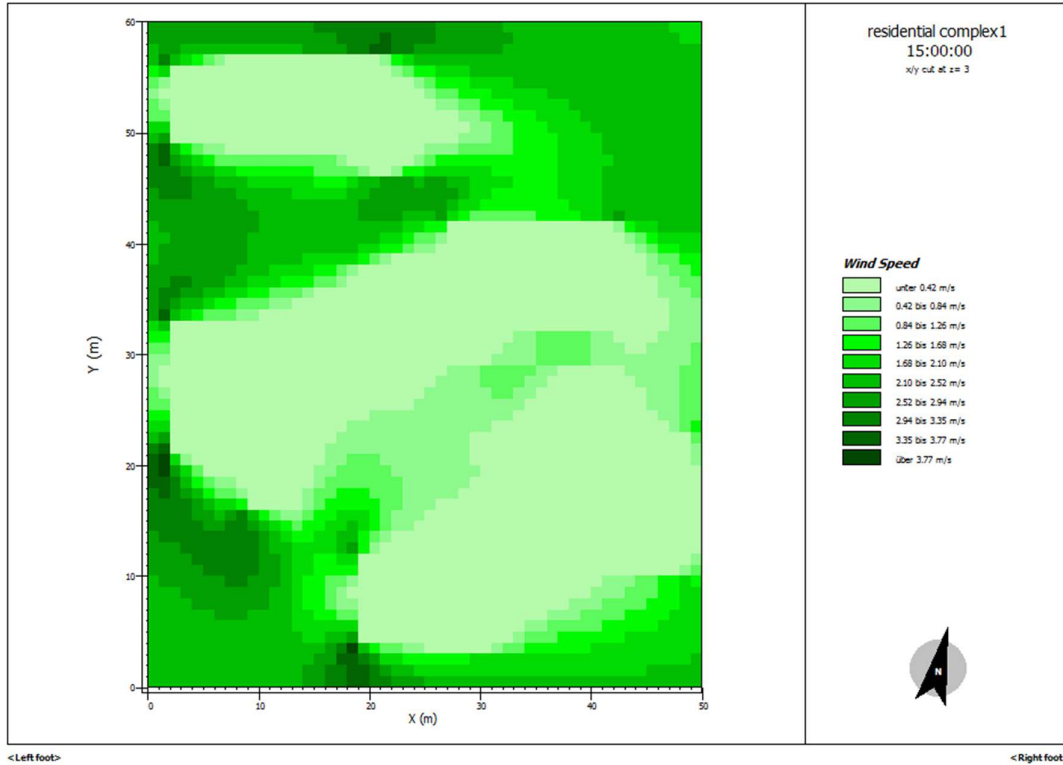
تصویر (۵): نمودار رطوبت نسبی در فضاهای منتخب مجتمع مسکونی. ماخذ: نگارندگان

محصور به دلیل محیط محصور خود میزان سرعت هوای کمتری را نسبت به محیط خود تجربه می کند و در طول روز میزان ثابتی دارد (نقطه شماره ۳) در حالی که میزان ثابت سرعت هوا در محیط های کاملاً باز به شدت وابسته به میزان سرعت هوای محیط پیرامون خود است (نقطه شماره ۴).

منطقه محیط های نیمه بسته شرایط مشابه محیط های نیمه باز دارند ولی نسبت به آنها سرعت هوای کمتری دارند و نرخ رشد سرعت هوا نیز در این محیط ها نسبت به محیط های نیمه باز کمتر است (نقطه شماره ۲). محیط کاملاً محصور و یا کاملاً باز شرایط ثابتی را در طول روز از نظر سرعت هوا تجربه می کنند. محیط های کاملاً



تصویر (۶): نمودار سرعت هوا در فضاهای منتخب مجتمع مسکونی. ماخذ: نگارندگان



تصویر (۷): تصویر محیطی سرعت هوا در ساعت ۱۵. ماخذ نگارندگان

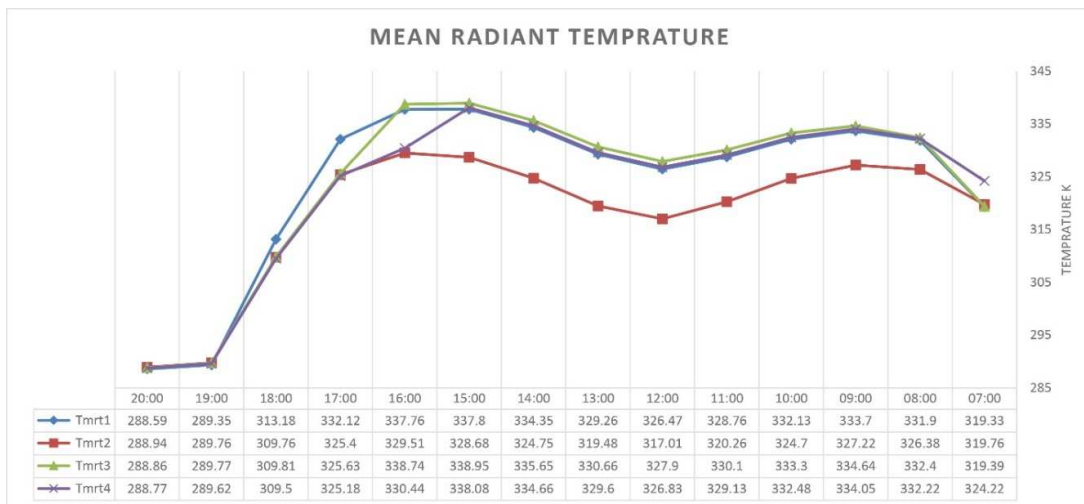
### مقایسه میانگین دمای تابشی در نقاط منتخب

آخرین عامل از عوامل محیطی میانگین دمای تابشی است که در بسیاری از مطالعات به عنوان عامل اصلی استرس حرارتی مطرح می‌شود. Tmrt میانگین مجموع تابش‌های مستقیم و غیر مستقیم مطرح است. مطابق نمودار زیر در هر سه بخش فضای باز، محصور و نیمه میزان میانگین دمای تابشی میزان تفاوت فاحشی بین مقادیر وجود ندارد و الگوی رفتاری مشابهی را طی می‌کنند. چرا که در هر سه نقطه میزان تابش مستقیم به یک میزان به گیرنده‌های مجازی میرود و به جهت اینکه میزان بازتابش مصالح نما در هر ۴ نقطه یکسان در نظر گرفته شده و این مورد برای مصالح کف صدق می‌کند. از آنجا که به طور کلی Tmrt متأثر از ۳ عامل محیطی زیر است:

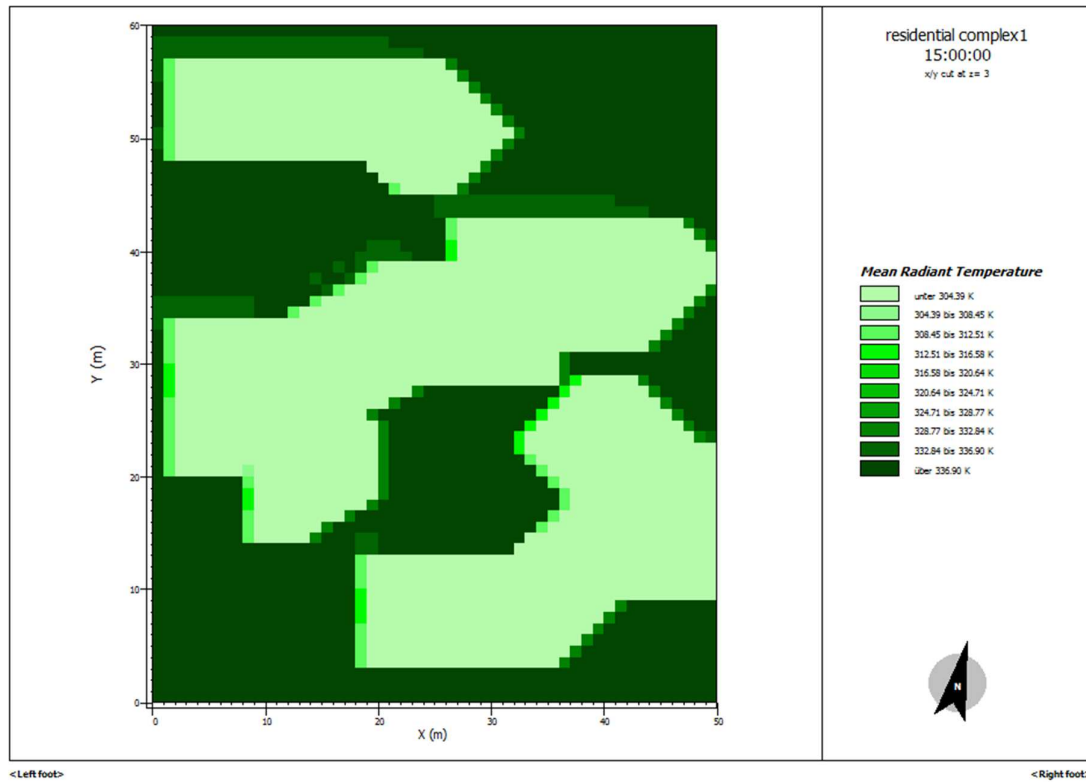
- دمای کروی
- دمای هوا
- سرعت هوا

بنابراین مقادیر Tmrt این نقاط بیشتر از آنکه تابع میزان مجمع تابش مستقیم و غیر مستقیم باشد از سرعت جریان

هوا و دمای هوا این نقاط متأثر است و مقادیر تغییرات جریان هوا و دمای هوا به تغییرات میانگین دمای تابشی منجر می‌شود. اما مطابق نمودار ذیل Tmrt برای نقطه ۲ (فضای نیمه بسته) از کاهش محسوسی برخوردار است. بر خلاف ۳ نقطه دیگر این نقطه به علت قرار گیری در سایه به مراتب از میانگین تابشی کمتری برخوردار است. میزان تابش مستقیم برای این نقطه صفر بوده و میزان تابش غیر مستقیم آن به ضریب بازتابش مصالح کف و دیوارها بستگی دارد و همین امر سبب گشته است میزان Tmrt کمتری را در ساعاتی آفتابی تجربه کند. در ساعت اولیه شبیه‌سازی به علت میزان Tmrt این نقطه مشابه سایر نقاط است با افزایش میزان ارتفاع آفتاب میانگین تابشی هر ۴ نقطه شروع به رشد کرده ولی نرخ رشد نقطه فضای نیمه بسته کمتر از سایر نقاط است این تفاوت بین ساعات ۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰ اتفاق می‌افتد و با کاهش میزان ارتفاع دوباره آفتاب نرخ کاهش نمودار هر ۴ نقطه شروع به همگرایی کرده و در ساعت ۱۹:۰۰ و ۲۰:۰۰ یکسان می‌گردد. نمودار ساعتی تغییرات Tmrt مطابق نمودار ذیل است.



تصویر (۸): نمودار میانگین دمای تابشی در فضاهای منتخب مجتمع مسکونی. ماخذ: نگارندگان



تصویر (۹): تصویر محیطی میانگین دمای تابشی در ساعت ۱۵. ماخذ: نگارندگان

### نتیجه گیری

بر روی عوامل اقلیمی و محیطی در فضای باز پرداخته می شود. بدین منظور، گرم ترین روز تهران در سال ۱۳۹۶ (یکشنبه- ۱۵ مرداد ۱۳۹۶) برای شبیه سازی فضاهای باز و نیمه باز یاد شده جهت بررسی و ارزیابی خصوصیات و شرایط حرارتی این فضاها در قالب یک مجتمع مسکونی مفروض انجام گردید و نتایج ذیل بدست آمد:

۱. کمترین میزان دمای هوا مربوط گیرنده مجاری شماره ۱ می باشد (فضای نیمه باز) و مطابق رفتار حرارتی فضای نیمه باز فضای نیمه بسته مجاور فضای نیمه باز دمای هوای خنک تری را تجربه می کند ولی به علت جریان هوای راکدتر دمای هوای بیشتری نسبت به فضای نیمه باز تجربه می کند. رفتار دمای هوای نقاط منتخب به تفکیک ساعت در نمودار ذیل بیان شده است.

کیفیت فضاهای باز شهری به شدت متأثر از ویژگی های حرارتی آن است و ساختار متفاوت فضاهای باز و نیمه باز رفتار های حرارتی متفاوتی دارند. فعالیت های متفاوت در فضای باز و نیمه باز و اهمیت حضور مردم در این فضاهای ضرورت ارتقاء آگاهی در این حوزه در معماری و شهر سازی مدرن به چشم می خورد. بنابراین تعیین ساختار کالبدی و تبیین رفتار و خصوصیات حرارتی فضاهای باز و نیمه باز در قالب ۴ وضعیت کالبدی مورد پژوهش قرار گرفت، شامل:

- فضای نیمه بسته
- فضای نیمه باز
- فضای محصور
- فضای باز

۴. میانگین دمای تابشی به عنوان موثرترین عامل تاثیر گذار بر حدود آسایش حرارتی در فضای باز مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت و عوامل موثر بر آن تحلیل گردید. به علت ثابت بودن میزان تابش‌های مستقیم و غیر مستقیم و همچنین مشخصات فیزیکی مصالح، میانگین دمای تابشی این نقاط متاثر میزان دریافت تابش نیستند به استثنای فضای نیمه بسته عموماً در سایه قرار دارند. با توجه فرمول محاسباتی میانگین دمای تابشی دریافتی می‌شود که سرعت باد و تهویه طبیعی مهمترین عامل تاثیر گذار بر میانگین دمای تابشی است و محیطی که سرعت باد بیشتری داشته باشد از میزان دمای میانگین کمتری برخوردار است.

نتایج این پژوهش مربوط به اقلیم تهران در یکی گرم ترین روز سال آن می‌باشد لذا بررسی ساختارهای حرارتی در سایر اقلیم‌ها کاربری‌ها و هندسه‌های متفاوت به عنوان پژوهش‌های بعدی توصیه می‌گردد.

۲. از نظر میزان رطوبت نسبی، ۴ نقطه ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه حاصل شده بیانگر تاثیرپذیر رطوبت نسبی از میزان رطوبت مطلق محیط در فضاهای باز و نیمه باز است. این موضوع با توجه به ثبات دمای هوا در نقاط یاد شده تبیین می‌گردد. فضای نیمه بسته به علت مجاورت کمتر با محیط اطراف خود عموماً از میزان رطوبت کمتری برخوردار هستند و نسبت به سایر فضاها در طول روز، میزان کمتری از رطوبت نسبی را تجربه می‌کند.

۳. سرعت باد در محیط‌های باز و نیمه مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج آن بیان گر سرعت بالای در محیط‌های نیمه بسته به علت وجود نواحی پر فشار و کم فشار در مجاورت اینگونه فضاهاست و در سایر فضاهای کاملاً باز و نیمه باز سرعت هوا در این فضا به شدت به سرعت باد در محیط‌های مجاور خود هستند و فضاهای باز کاملاً محصور نظیر حیاط‌های مرکزی کمتر میزان سرعت باد را تجربه می‌کنند.

## منابع

- حیدری، شاهین (۱۳۹۳). *سازگاری حرارتی در معماری*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- قیابکلو، زهرا (۱۳۸۶). *آشنایی با نرم‌افزار اکوتکت*. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
- عینی‌فر، علیرضا و قاضی‌زاده، سیده‌ندا (۱۳۸۹). *گونه‌شناسی مجتمع‌های مسکونی تهران با معیار فضای باز*. نشریه معماری و شهرسازی آرمانشهر، ۵، ۳۵-۴۵.
- Ahmed, K. S. (2003), Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, 35(1), 103-110.
- Allegrini, J. , Dorer, V. , & Carmeliet, J. (2015), Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108-117.
- Almhafdy, A. , Ibrahim, N. , Ahmad, S. S. , & Yahya, J. (2013), Courtyard design variants and microclimate performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 101, 170-180.
- Ambrosini, D. , Galli, G. , Mancini, B. , Nardi, I. , & Sfarra, S. (2014), Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013-7029.
- Asawa, T. , Hoyano, A. , & Nakaohkubo, K. (2008), Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system. *Building and Environment*, 43(12), 2112-2123.
- Berkovic, S. , Yezioro, A. , & Bitan, A. (2012), Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy*, 86(5), 1173-1186.
- Bruse, M. (1999), The influences of local environmental design on microclimate-development of a prognostic numerical Model ENVI-met for the simulation of Wind, temperature and humidity distribution in urban structures. *Temperature and Humidity Distribution in Urban Structures (in German)*, Germany, Institute of Geography, University of Bochum.
- Bruse, M. (2004), ENVI-met 3. 0: updated model overview. University of Bochum. Retrieved from: [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com).
- Bruse, M. , & Fleer, H. (1998), Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3), 373-384.
- Chen, L. , & Ng, E. (2012), Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*, 29(2), 118-125.
- Chen, L. , & Ng, E. (2013), Simulation of the effect of downtown greenery on thermal comfort in subtropical climate using PET index: a case study in Hong Kong. *Architectural Science Review*, 56(4), 297-305.
- Cheng, V. , & Ng, E. (2006), Thermal comfort in urban open spaces for Hong Kong. *Architectural Science Review*, 49(3), 236-242.
- Cheng, V. , Ng, E. , Chan, C. , & Givoni, B. (2012), Outdoor thermal comfort study in a subtropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. *International journal of biometeorology*, 56(1), 43-56.
- Chow, W. T. , & Brazel, A. J. (2012), Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170-181.
- Elnabawi, M. H. , Hamza, N. , & Dudek, S. (2013, August), Use and evaluation of the ENVI-met model for two different urban forms in Cairo, Egypt: measurements and model simulations. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France.
- Emmanuel, R. , Rosenlund, H. , & Johansson, E. (2007), Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1995-2004.
- Fahmy, M. , & Sharples, S. (2009), On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 44(9), 1907-1916.
- Gagge, A. P. , Fobelets, A. P. , & Berglund, L. (1986), A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans. ;(United States)*, 92(CONF-8606125-).
- Gál, C. V. (2014), The influence of built form and vegetation on the canopy layer microclimate within urban blocks. *Acta Climatol. Chorol. Univ. Szeged*, 47-48.
- Ghaffarianhoseini, A. , Berardi, U. , & Ghaffarianhoseini, A. (2015), Thermal performance characteristics of unshaded



- courtyards in hot and humid climates. *Building and Environment*, 87, 154-168.
- Gulyás, Á. , Unger, J. , & Matzarakis, A. (2006), Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment*, 41(12), 1713-1722.
- Hensen, J. L. M. (2002), Simulation for performance based building and systems design: some issues and solution directions. Actes de conférence 6th International Conference on Design and Decision support Systems in Architecture and Urban Planning.
- Hong, T. , Chou, S. K. , & Bong, T. Y. (2000), Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and environment*, 35(4), 347-361.
- Höppe, P. (1999), The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.
- Höppe, P. (2002), Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, 34(6), 661-665.
- Huttner, S. (2012), Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. Mainz University, Germany.
- Huttner, S. , Bruse, M. , & Dostal, P. (2008, October), Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. In *5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology* (Vol. 18, pp. 307-312).
- Li, J. , Wang, J. , & Wong, N. H. (2016), Urban Micro-climate Research in High Density Cities: Case Study in Nanjing. *Procedia Engineering*, 169, 88-99.
- Lin, T. P. , Matzarakis, A. , & Hwang, R. L. (2010), Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213-221.
- Lindberg, F. , Holmer, B. , & Thorsson, S. (2008), SOLWEIG 1.0—Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), 697-713.
- Matzarakis, A. , Rutz, F. , & Mayer, H. (2007), Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 51(4), 323-334.
- Mayer, H. , & Höppe, P. (1987), Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and applied climatology*, 38(1), 43-49.
- Nikolopoulou, M. , & Lykoudis, S. (2006), Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries. *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470.
- Nikolopoulou, M. , & Steemers, K. (2003), Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95-101.
- Peng, L. L. , & Jim, C. Y. (2013), Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598-618.
- Salata, F. , Golasi, I. , de Lieto Vollaro, A. , & de Lieto Vollaro, R. (2015), How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study. *Energy and Buildings*, 99, 32-49.
- Shahidan, M. F. , Jones, P. J. , Gwilliam, J. , & Salleh, E. (2012), An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials. *Building and Environment*, 58, 245-257.
- Spangenberg, J. , Shinzato, P. , Johansson, E. , & Duarte, D. (2008), Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 3(2), 1-19.
- Taleghani, M. , Kleerekoper, L. , Tenpierik, M. , & van den Dobbelsteen, A. (2015), Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65-78.
- Taleghani, M. , Tenpierik, M. , van den Dobbelsteen, A. , & Sailor, D. J. (2014), Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, 103, 108-124.
- Tan, Z. , Lau, K. K. L. , & Ng, E. (2016), Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114, 265-274.
- Thorsson, S. , Lindqvist, M. , & Lindqvist, S. (2004), Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology*, 48(3), 149-156.
- Tsiros, I. X. , & Hoffman, M. E. (2014), Thermal and comfort conditions in a semi-closed rear wooded garden and its adjacent semi-open spaces in a Mediterranean climate (Athens) during summer. *Architectural Science Review*, 57(1), 63-82.
- Wang, Y. , Bakker, F. , de Groot, R. , Wortche, H. , & Leemans, R. (2015), Effects of urban trees on local outdoor microclimate: synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban ecosystems*, 18(4), 1305-1331.
- Wang, Y. , Berardi, U. , & Akbari, H. (2015), The Urban Heat Island effect in the city of Toronto. *Procedia Engineering*, 118, 137-144.
- Wong, N. H. , & Jusuf, S. K. (2008), GIS-based greenery evaluation on campus master plan. *Landscape and urban planning*, 84(2), 166-182.
- Yang, F. , Lau, S. S. , & Qian, F. (2011), Thermal comfort effects of urban design strategies in high-

rise urban environments in a sub-tropical climate.  
*Architectural Science Review*, 54(4), 285-304.