

## ارزیابی شاخصه‌های آسایش حرارتی در فضای باز

شاهین حیدری (دانشیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا دانشگاه تهران)

shheidary@ut.ac.ir

علیرضا منعم (فوق دکتری معماری دانشگاه فنی برلین، آلمان، نویسنده مسؤول)

ar.monam@gmail.com

### چکیده

هدف اصلی این پژوهش، تعیین رابطه میان شاخصه‌های حرارتی و احساس آسایش حرارتی در فضای باز شهری است. پیشینه این موضوع نشان می‌دهد با وجود شاخصه‌های حرارتی، تصویری واحد از مجموع متغیرهای شخصی و اقلیمی، ارائه جهت بررسی جامع آسایش حرارتی در فضای باز دقت لازم وجود ندارد. شاخصه‌های حرارتی متداول در پژوهش‌های ارزیابی آسایش حرارتی در فضای داخلی و باز، "پیش‌بینی متوسط نظر"، "دمای مؤثر استاندارد" و "دمای معادل فیزیولوژیکی" می‌باشد که بر پایه تعادل حرارتی انسان تعریف شده‌اند. به منظور تعیین میزان رابطه احساس آسایش افراد با شاخصه‌های حرارتی مرسوم و شناخت مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آن‌ها، پژوهشی میدانی در بوستان‌های ملت، ساعی، لاله، شهر و بعثت شهر تهران انجام پذیرفت. روش ارزیابی بر اساس نظرسنجی با پرسش‌نامه، برداشت‌های محیطی عوامل جغرافیایی و اقلیمی بوده است. گروه‌بندی سنجه‌های ارزیابی شده و تعریف هر یک از مؤلفه‌های آسایشی با سنجه‌های زیربنایی با روش تحلیل عاملی انجام پذیرفته است. به منظور ارزیابی نهایی الگوی نظری و تعیین رابطه وابستگی میان متغیرهای به صورت هم‌زمان، از "مدل‌سازی معادلات ساختاری" استفاده شده و با در نظر گرفتن بار عاملی هر سنجه و میزان خطای پنهان، جایگاه مؤلفه‌ها در الگوی نظری تعیین شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد در مقایسه با سایر شاخصه‌های آسایش حرارتی، "دمای معادل فیزیولوژیکی" دارای دقت بالاتری برای پیش‌بینی میانگین آسایش حرارتی در فضاهای باز است. در این پژوهش رابطه‌ای آسان برای محاسبه شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" از طریق داده‌های محیطی ارائه و دامنه سطوح آسایشی حرارتی در فضای باز برای ساکنان تهران تعیین شده است.

**کلیدواژه‌ها:** آسایش حرارتی، بوستان شهری، دمای معادل فیزیولوژیکی.

## ۱- مقدمه

یکی از زیرمجموعه‌های آسایش محیطی، آسایش حرارتی بر پایه‌ی شرایط اقلیمی است که بحثی پایه‌ای و پیچیده قلمداد می‌شود (Brown, 2010:19). اگر بپذیریم که اقلیم نقش محوری در تعریف فعالیت‌ها و اختصاص کاربری در فضای باز دارد، آنگاه باید به شناخت چگونگی تأثیر عوامل محیطی برای افزایش آسایش که از اهداف برنامه‌ریزی با رویکرد اقلیمی است، بپردازیم. سنجش میزان آسایش، نیازمند شاخصه‌هایی برای مقایسه با مجموع شرایط اقلیمی حادث بر فرد است. در واقع تنها یک خصوصیت اقلیم، بیان‌کننده‌ی میزان آسایش حرارتی از محیط نیست، مانند بدن که برای درک دمای محیط، گیرنده‌ای جدا ندارد و همه‌ی متغیرهای اقلیمی با یکدیگر تلقی آدمی از شرایط محیطی را می‌سازند (Scudo, 2005: 259) از این رو به منظور سنجش آسایش حرارتی، تعیین شاخصه‌های حرارتی ضروری است. انتظار می‌رود که یافته‌های پژوهش، کارآمدترین شاخصه‌ی ارزیابی آسایش حرارتی در فضای باز شهری از میان شاخصه‌های مرسوم را معرفی و محدوده‌های آسایشی آن در فضای باز شهر تهران را تبیین کند.

## ۲- مروری بر پیشینه‌ی پژوهش

مجموعه‌ی شاخصه‌های حرارتی در دو گروه تجربی ( $ET^1$ ,  $RT^2$ ,  $HOP^3$ ,  $OP^4$ ,  $WCI^5$ ) و تحلیلی ( $ITS^6$ ,  $HIS^7$ ,  $ET^*8$ ,  $SET^*9$ ,  $OUT\_SET^{10}$ ,  $PMV^{11}$ ,  $PT^{12}$ ,  $PET^{13}$ ) تقسیم‌بندی

- 
1. Effective Temp
  2. Resultant Temp
  3. Humid Operative Temp
  4. Operative Temp
  5. Wind Chill Index
  6. Index of Thermal Stress
  7. Heat Stress Index
  8. New Effective Temp
  9. Stand. Effective Temp
  10. Out. Stand. Eff. Temp
  11. Predicted mean vote
  12. Perceived Temp
  13. Physiol. Equiv. Temp

می‌شوند (Fanger, 1972; Givoni, 1976; Ashrae, 2001) مبنای شاخصه‌های تحلیلی بر اساس تعادل انرژی (انرژی اتلافی و تولیدی در انسان) است. مشکل عمده شاخصه‌های حرارتی، ارزیابی میانگین آسایش حرارتی و شرایط اقلیمی هر ناحیه توسط آنها است، در صورتی که بیشتر افراد در طی روز، فضاهای گوناگون را با شرایط اقلیمی مختلف تجربه می‌کنند. در حال حاضر پژوهش‌های اولیه برای ارائه شاخصه‌های پویایی، همچون سامانه‌های هوشمند<sup>۱</sup> (Bruse, 2009) انجام گرفته است، که می‌توان با آن شرایط اقلیمی و مکانی را برای افراد شبیه‌سازی کرد و به نتایج دقیق‌تری دست یافت.

در سال‌های اخیر، شاخصه‌های آسایش حرارتی برای فضای باز مانند شاخصه<sup>۲</sup> "یو.تی.سی.آی" (Nagano & Horikoshi, 2011b) و شاخصه‌های "ای.تی.وی.ا.ا"<sup>۳</sup> (Błażejczyk et al., 2010) و "ای.تی.اف.ا"<sup>۴</sup> (Kurazumi et al., 2011) و "ای.تی.اف.ای"<sup>۵</sup> به صورت تئوری ارائه شده‌اند. شاخصه<sup>۶</sup> "ای.تی.وی.ا.ا" برای فضاهای خارجی که افراد در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارند، کاربرد دارد، ولی شرایط غیریکنواخت یا هدایت حرارتی را نمی‌تواند پوشش دهد. اگر چه "ای.تی.اف" و "ای.تی.اف.ای" حرارت هدایتی را در نظر می‌گیرند، اما مناسب برای فضاهای غیریکنواخت نیستند. در حال حاضر برای رفع مشکل، شاخصی به صورت نظری برای ارزیابی غیریکنواخت شرایط فضای باز با سنجش توأم حرارت تابشی و هدایتی معرفی شده است که می‌توان از آن برای ارزیابی آسایش حرارتی شخصی که بر روی نیمکتی در فضای باز بوستانی نشسته، بهره گرفت (Nagano & Horikoshi, 2011a). جدا از شاخصه‌های مذکور که تاکنون ارزیابی دقیق عملی برای سنجش میزان اعتبار آنها ارائه نشده است نتایج پژوهش‌های مختلف در مورد اعتبارسنجی سایر شاخصه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌هایی همچون "دمای مؤثر استاندارد"<sup>۶</sup> و "دمای معادل فیزیولوژیکی"<sup>۷</sup> رابطه هم‌بستگی بستگی بالای (۸۹ درصد) با احساس آسایش حرارتی در فضای باز دارند (Monteiro & Alucci, 2011).

1. MultiAgent System BOTWORLD
2. UTCI
3. ETVO
4. ETF
5. ETFe
6. SET
7. PET

2009). از سوی دیگر بیشتر پژوهش‌ها در سال‌های اخیر از شاخصه‌های "پیش‌بینی متوسط نظر"، "دمای مؤثر استاندارد" و "دمای معادل فیزیولوژیکی" به منظور پیش‌بینی دمای آسایش در فضای باز استفاده کرده‌اند (Honjo, 2009: 44). برای درک بهتر به معرفی این شاخصه‌ها، اثرگذاری، مزایا، تفاوت‌ها و شباهت‌های آن‌ها می‌پردازیم.

"پیش‌بینی متوسط نظر" در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط فانگر به منظور تعیین شاخصه‌ی ارزیابی میزان آسایش حرارتی برای افرادی با فعالیت‌های فیزیکی متنوع و پوشش مختلف لباس در فضاهای داخلی ارائه شد (Fanger, 1972). برای ارزیابی فضای باز با استفاده از این شاخصه، "جندرترکی و نوبلر"<sup>۲</sup> (۱۹۸۱) تابش‌های محیطی را به آن اضافه و الگوی با نام "کلیما مایکل"<sup>۳</sup> را معرفی کردند. از این الگو در تهیه نقشه آسایش حرارتی شهر فریبورگ<sup>۴</sup> استفاده شد. در مطالعات، محاسبه میانگین تعداد روزهای دارای دارای تنش حرارتی در یونان (Matzarakis & Mayer, 1999) رابطه میان حرارت و الگوی رفتاری در سوئد (Thorsson et al., 2004) و همچنین ارزیابی آسایش حرارتی فضای باز در برزیل (Zambrano et al., 2006) از این شاخصه برای ارزیابی آسایش حرارتی در فضای باز استفاده شد. نتایج پژوهش‌های اعتبارسنجی این شاخصه در فضای باز نشان داد که میزان "احساس حرارتی" کمتر از "پیش‌بینی متوسط نظر" می‌باشد (Kwon & Parsons, 2009)، که این امر ناشی از عواملی مانند فرهنگ، شرایط اجتماعی، روان‌شناختی و سازگاری رفتاری است. اخیراً برای رفع این مشکل، شاخصه "پیش‌بینی متوسط نظر انطباقی"<sup>۵</sup> معرفی شده است.

"دمای مؤثر استاندارد" ارتقایافته "دمای مؤثر" می‌باشد که برای سهولت در استفاده به عنوان شاخصه حرارتی فضاهای داخلی و خارجی معرفی شده است (Gagge et al., 1986). این شاخصه نشان‌دهنده دمای هوای معادل یک محیط با دمای یکنواخت و رطوبت ۵۰ درصد است که در آن شخص لباسی را که مناسب فعالیتش است، پوشیده و همان تنش حرارتی (دمای پوست) و تنظیم دمایی (رطوبت پوست) محیط واقعی را دارد (حیدری نژاد و دیگران، ۱۳۸۸: ۳۳).

1. PMV
2. Jendritzky and Nübler
3. KlimaMichel Model
4. Freiburg
5. Adaptive Predicted Mean Vote

پژوهش‌های مختلفی (Ishii et al., 1988; Honjo, 2009) اعتبار این شاخصه برای فضای باز را تأیید کرده‌اند. الگوی توسعه یافته این شاخصه برای فضای خارج با عنوان "دمای مؤثر استاندارد فضای باز" پیشنهاد شده است (Pickup & Dear, 1999).

"دمای معادل فیزیولوژیکی" امکان مقایسه تأثیر کامل مجموعه شرایط حرارتی محیط بیرون با تجربه شخصی را در اختیار فرد می‌گذارد (Lin et al., 2010: 214). شرایط دمای داخلی مرجع بر اساس دمای هوا برابر با "میانگین دمای تابشی"، جریان هوا ۰/۱ متر بر ثانیه و فشار هوای برابر ۱۲ هکتوپاسکال است. این شاخصه، آسایش حرارتی را برای کاربری بدون تحرک و با لباس معمول در فضای خانه برابر حد فاصل ۱۸ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد در نظر می‌گیرد (Matzarakis et al, 1999). اگرچه "دمای معادل فیزیولوژیکی" تحت شرایط فضای مجازی داخلی تعریف شده است، اما برای شرایط واقعی فضای خارجی نیز کاربرد دارد. "دمای معادل فیزیولوژیکی"، یکی از شاخصه‌های توصیه شده در راهبردهای برنامه‌ریزان شهری و منطقه‌ای در آلمان است که به منظور پیش‌بینی تغییرات حرارتی بخش‌های اقلیم شهری یا منطقه‌ای به کار برده می‌شود (VDI, 1998). این شاخصه در شرایط مختلف اقلیمی در فضای باز شهری در پژوهش‌های که به منظور اعتبارسنجی آن صورت گرفته است، رابطه حد‌اکثری را با احساس آسایش حرارتی نشان داده است (Tseliou et al., 2010).

از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در دمای "معادل فیزیولوژیکی"، متغیر اقلیمی "میانگین دمای تابشی" است (Faizi et al., 2011). شاخصه‌های مذکور، تصویری واحد از مجموع متغیرهای شخصی و اقلیمی را ارائه می‌نمایند و امکان مقایسه شرایط آسایشی در محیط‌های مختلف (به دلیل جهانی بودن) را فراهم می‌کنند (Johansson, 2006: 52). البته زمانی که این شاخصه‌ها بخواهند شرایط آسایشی خارج از محدوده‌های معمول یا فضاهایی با تفاوت‌های اقلیمی متغیر را پیش‌بینی کنند، دقیق نیستند (Fountain & Huizena, 1994). آن‌ها فقط مرجعی برای ارزیابی ترجیح افراد در مورد متغیرهای فیزیکی فضای باز می‌باشند (Lin et al., 2011: 311). در نتیجه هیچ‌کدام برای بررسی جامع آسایش حرارتی در فضای باز دقت لازم را ندارند. (جدول ۱) مقایسه‌ای از میزان عددی هر یک از شاخصه‌ها و احساس حرارتی در مقیاس نه‌گانه کاترین را نشان می‌دهد (جدول ۱).

## 1. OUT\_SET

جدول ۱: مقایسه‌ی دامنه‌ی آسایشی شاخصه‌های حرارتی

ارزیابی با مقیاس اشری	ارزیابی با مقیاس رولز	دمای مؤثر استاندارد	پیش‌بینی متوسط نظر	دمای معادل فیزیولوژیکی	احساس حرارتی
	۱	< ۱۰		کمتر از ۴	انجماد
-۳	۲	۱۰-۱۴/۵	-۳	۸-۴	خیلی سرد
-۲	۳	۱۴/۵-۱۷/۵	-۲	۱۳-۸	سرد
-۱	۴	۱۷/۵-۲۲/۲	-۱	۱۸-۱۳	کمی سرد
۰	۵	۲۲/۲-۲۵/۶	۰	۲۳-۱۸	آسایش
+۱	۶	۲۵/۶-۳۰	+۱	۲۹-۲۳	کمی گرم
+۲	۷	۳۰-۳۴/۵	+۲	۳۵-۲۹	گرم
+۳	۸	۳۴/۵-۳۷/۵	+۳	۳۵-۴۱	داغ
	۹	> ۳۷/۵		بیشتر از ۴۱	خیلی داغ

مأخذ: Rohles & Levins, 1971 ; Ashrae, 1966 ; Höpfe, 1999 ; Matzarakis et al., 1999 ; Gagge, 1971; Gagge et al., 1986 ; Fanger, 1972;

شاخصه "پیش‌بینی متوسط نظر" بر اساس فرض تعادل گرمایی برای سطح فعالیت‌های کم یا متوسط و برای کاربری با نرخ لباس پایین در نظر گرفته شده است که محدودیت‌هایی برای استفاده از آن در فضاهای خارجی ایجاد می‌نماید (Pickup & Dear, 1999). شاخصه "دمای مؤثر استاندارد" دارای محاسبه بسیار پیچیده‌تری از "پیش‌بینی متوسط نظر" است (Ye et al., 2003: 36). روش محاسبه تبادل گرمایی میان آدمی و محیط در آن مشابه "پیش‌بینی متوسط نظر" می‌باشد (Ibid, 36).

نرخ لباس و سطح فعالیت از متغیرهای اصلی محاسبه این شاخصه است که سازگاری رفتاری در آن لحاظ شده است (Toudert, 2005: 45). به صورت نظری، این شاخصه در محاسبه تنظیم دمای بدن دارای مزایایی نسبی به "پیش‌بینی متوسط نظر" می‌باشد که سبب افزایش دقت آن در فضای باز می‌شود (Ibid: 46).

شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" در روش ارزیابی دمای پوست و میزان تعریق با "پیش‌بینی متوسط نظر" دارای تفاوت‌هایی است (Mayer & Höpfe, 1987). محاسبه جریان حرارتی درونی به سطح پوست و سطح بیرونی لباس در آن، مشابه "دمای مؤثر استاندارد" است (VDI, 1998). نرخ لباس و فعالیت در این شاخصه به عنوان متغیر اصلی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (Toudert, 2005: 45). در مقایسه میزان "دمای معادل فیزیولوژیکی" و "دمای مؤثر استاندارد" با میزان احساس آسایش ادراکی، "دمای معادل فیزیولوژیکی" دارای رابطه بالاتری نسبت به "دمای مؤثر استاندارد" است. هر چند که به میزان بسیار کم از آسایش ادراکی بیشتر برخوردار است (Sasaki et al., 2009). همچنین در شرایط اقلیمی گرم در فضای باز (با در نظر گرفتن نرخ لباس یکسان و سطح فعالیت برابر) "دمای مؤثر استاندارد" به صورت سیستماتیک دارای میزان کمتری از شرایط واقعی است. این نشان می‌دهد که "دمای معادل فیزیولوژیکی" دارای دقت بیشتری نسبت به "دمای مؤثر استاندارد" است (Toudert, 2005: 45) و نسبت به دو شاخصه دیگر با واقعیت‌های اقلیمی تطابق بیشتری دارند (ساری صراف و همکاران، ۱۳۸۹).

### ۳- روش تحقیق

روش پژوهش در این مطالعه، بررسی موردی است که به ارزیابی‌های میدانی متغیرهای محیطی و الگوهای رفتاری افراد در پنج بوستان شهری ملت، ساعی، لاله، شهر و بعثت شهر تهران می‌پردازد. این پژوهش در طی هفته‌های پایانی مهرماه و آغازین آبان ماه ۱۳۸۹ از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۷ انجام گرفت. تنوع ساختار فضایی، مساحت، ارتفاع از سطح دریا، موقعیت جغرافیایی و اجتماعی و قدمت، دلایل انتخاب بوستان‌ها بوده است. ارزیابی در ۲۳۴ نقطه در ۳۰ ایستگاه هر بوستان بر مبنای تراکم افراد حاضر و تنوع فضایی صورت گرفت. در هر ایستگاه اطلاعاتی شامل کاربری ایستگاه و فضاهای پیرامون، پوشش و رنگ زمین، ارتفاع از سطح دریا، فاصله نسبت به حاشیه بوستان و پوشش فضای سبز ثبت شد.

ارزیابی متغیرهای محیطی و افراد حاضر در هر نقطه به صورت هم‌زمان انجام گرفت. در اندازه‌گیری با ابزار سنجش قابل حمل، میانگین و حداکثر وزش باد، رطوبت نسبی، دمای هوا و کروی و جهت باد برداشت شد. بر اساس رابطه میان متغیرهای محیطی، میانگین دمای تابشی، دمای معادل فیزیولوژیکی، پیش‌بینی متوسط نظر و دمای مؤثر استاندارد محاسبه شد. نرخ لباس و متابولیسم افراد و بازتاب کف‌پوش‌ها

بر مبنای جداول راهنما ثبت شد. ضریب دید به آسمان بر اساس تصاویر کروی محاسبه شده است (بهزادفر و منعم، ۱۳۸۹). از آمارهای شهری، دما، رطوبت و وزش باد استخراج شد و موقعیت جغرافیایی، پوشش کلی فضای سبز و ارتفاع از سطح دریا ایستگاه‌ها از نقشه‌های ماهواره‌ای برداشت گردید. تمامی وسایل اندازه‌گیری بر روی سه پایه‌ای به ارتفاع ۱/۱ متری نصب شد. فقط سنسور اندازه‌گیری جریان هوا به منظور اجتناب از تأثیر حرکت افراد، در ارتفاع ۲ متر نصب شد، سپس میزان جریان هوا در ارتفاع ۱/۱ محاسبه شد<sup>۱</sup> (جدول ۲).

جدول ۲: متغیرهای محیطی مورد ارزیابی

اندازه‌گیری مستقیم با ابزار سنجش		معادله		
نشانه	عنوان	واحد	واحد	عنوان
$V_{avg,2}$	میانگین وزش باد (۲ متر)	(m/s)	$V_{avg,1}$	میانگین وزش باد (۱/۱ متر)
$V_{max,2}$	حداکثر وزش باد (۲ متر)	(m/s)	$V_{max,1}$	حداکثر وزش باد (۱/۱ متر)
RH	رطوبت نسبی	(%)	$T_{mrt}$	میانگین دمای تابشی
$T_s$	دمای سطح زمین	(C°)	PET	دمای معادل فیزیولوژی
$T_a$	دمای هوا	(C°)	PMV	نظر سنجی پیش بینی
$T_g$	دمای کروی	(C°)	SET	دمای مؤثر استاندارد
$V_{dir}$	جهت باد	(deg)		
تصویر	آمار و نقشه شهری			
SVF	ضریب دید به آسمان	(0-1)	AMSL	ارتفاع از سطح دریا
جدول راهنما				
$a$	بازتاب زمین	(0-1)	$T_{amet}$	دمای شهری
$I_{cl}$	نرخ لباس	(clo)	$Rh_{met}$	رطوبت شهری
$M$	نرخ فعالیت	(M)		

مأخذ: نگارندگان

معادلات شاخصه‌های آسایش حرارتی با برنامه "ری من"<sup>۲</sup> (Matzarakis et al., 2006) محاسبه شد. شاخصه‌های "دمای معادل فیزیولوژی"، "پیش‌بینی متوسط نظر" و "استاندارد مؤثر دمایی"، بر اساس داده‌های اقلیمی، مشخصات شخصی و فعالیت‌های به صورت مجزا برای هر فرد

1. Sverdrup's Power Law
2. RayMan



تعیین شد. برای محاسبه شاخصه‌های حرارتی داده‌های اقلیمی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، جریان هوا، میانگین دمای تابشی و اطلاعات شخصی شامل قد، وزن، سن و جنسیت و نرخ فعالیت، نرخ لباس و حالت فیزیکی (نشسته و ایستاده) بهره گرفته شد.

ارزیابی افراد بر اساس ثبت الگوی رفتاری، خصوصیات ظاهری و نظرسنجی انجام گرفت. گزینش افراد به صورت تصادفی بوده و تنها سعی شده است که نسبت زنان و مردان برابر بوده و تمامی رده‌های سنی با توانایی پاسخگویی به سؤالات انتخاب شوند. کنترل روایی پرسشنامه بر مبنای ارزیابی اهل فن و پایایی آن بر اساس نظرسنجی نمونه تأیید شده است. مشخصات عمومی افراد شامل جنسیت، وضعیت فیزیکی، نوع فعالیت و ویژگی خاص و موقعیت استقرار نسبت به تابش آفتاب، همراه با تکمیل پرسشنامه برداشت شده است. در زمان تکمیل، مشخصات لباس ظاهری شامل نوع، جنس، رنگ و ملحقات همراه ثبت شد. مشخصات فردی و ارزیابی احساس حرارتی بر اساس پرسشنامه کسب شده است.

مقایسه شاخصه‌های کمی و کیفی و همچنین تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار اکسل<sup>۱</sup> نگارش ۲۰۱۰ و "اس.پی.اس.اس"<sup>۲</sup> نگارش ۱۹ و آموس<sup>۳</sup> نگارش ۱۸ انجام گرفت. در بخش توصیفی، مشخصه‌های آماری مانند فراوانی، میانگین و انحراف معیار در سطوح مختلف متغیرهای مستقل و وابسته مشخص شد و در بخش تحلیلی، رابطه بین متغیرها با ضرایب همبستگی پیرسون<sup>۴</sup>، اسپیرمن<sup>۵</sup> و تأثیر جمعی متغیرهای مستقل بر وابسته با ضریب رگرسیون چندمتغیره<sup>۶</sup> تعیین شد. به منظور گروه‌بندی سنجه‌های ارزیابی شده و تعریف هر یک از مؤلفه‌های آسایشی با سنجه‌های زیربنایی از روش تحلیل عاملی<sup>۷</sup> استفاده شد. به منظور ارزیابی نهایی الگوی نظری و تعیین رابطه وابستگی میان متغیرهای به صورت هم‌زمان، از "مدل‌سازی معادلات

- 
1. Excel
  2. SPSS
  3. AMOS
  4. Pearson's Correlation Coefficient
  5. Spearman's Correlation Coefficient
  6. Multivariate Regression
  7. Factor Analysis

ساختاری<sup>۱</sup> استفاده و با در نظر گرفتن بار عاملی هر سنجه و میزان خطای پنهان، جایگاه هر یک از مؤلفه‌ها در الگوی نظری تعیین شد.

#### ۴- یافته‌های تحقیق

یافته‌های این پژوهش از یک سو به روابط میان احساس حرارتی و شاخصه‌های حرارتی و در نتیجه آن تعیین محدوده‌های شاخصه‌های حرارتی می‌پردازد. از سوی دیگر میزان تأثیر عوامل محیطی بر شاخصه‌های حرارتی سنجیده می‌شود که در نتیجه آن معادله کاربردی برای محاسبه شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" بر پایه داده‌های محیطی اولیه ارائه می‌شود.

#### ۴-۱- روابط احساس حرارتی و شاخصه‌های حرارتی

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ضریب هم‌بستگی احساس حرارتی افراد با "دمای معادل فیزیولوژیکی" برابر ۰/۵۲، با "پیش‌بینی متوسط نظر" برابر ۰/۳۸ و با "دمای مؤثر استاندارد" برابر ۰/۱۶ در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ می‌باشد که به بالا بودن نسبی هم‌بستگی میان "دمای معادل فیزیولوژیکی" با ارزیابی احساس حرارتی اشاره دارد. بر مبنای رابطه احساس حرارتی و "دمای معادل فیزیولوژیکی" محاسبه‌شده، محدوده آسایش "دمای معادل فیزیولوژیکی" برابر ۲۸/۴-۲۴/۸ درجه می‌باشد که نسبت به محدوده تعیین‌شده در اروپا حداقل ۵ درجه بالاتر و در مقایسه با کشورهای جنوب شرقی آسیا در حدود ۱ درجه کمتر است (جدول ۳). ضریب هم‌بستگی دمای معادل فیزیولوژیکی با احساس حرارتی برابر ۰/۵۲ با سطح معنی‌داری ۰/۰۰ می‌باشد. محدوده هر سطح آسایشی با "دمای معادل فیزیولوژیکی" محاسبه شده برای فضای باز شهر تهران و همچنین مقایسه با محدوده‌های اروپایی و جنوب شرقی آسیا در (جدول ۳) ارائه شده است.

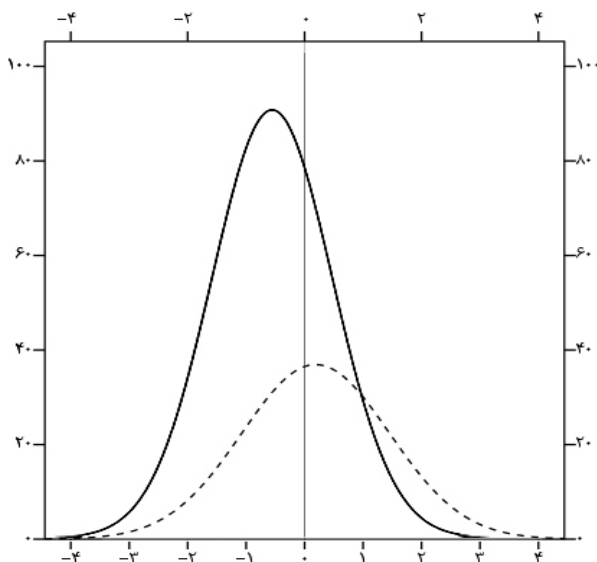
جدول ۳: مقایسه دمای معادل فیزیولوژیکی محاسبه شده برای فضای باز تهران با سایر کشورها

دمای معادل فیزیولوژیکی شهر تهران	دمای معادل فیزیولوژیکی (Lin et al., 2010) جنوب شرقی آسیا	دمای معادل فیزیولوژیکی (Höppe, 1999) غرب و مرکز اروپا	احساس حرارتی (Matzarakis, et al., 1999)
کمتر از ۱۳/۸	کمتر از ۱۴	کمتر از ۴	خیلی سرد
۱۳/۸-۱۷/۵	۱۴-۱۸	۴-۸	سرد
۱۷/۵-۲۱/۱	۱۸-۲۲	۸-۱۳	خنک
۲۱/۱-۲۴/۸	۲۲-۲۶	۱۳-۱۸	کمی خنک
۲۴/۸-۲۸/۴	۲۶-۳۰	۱۸-۲۳	آسایش
۲۸/۴-۳۲/۱	۳۰-۳۴	۲۳-۲۹	کمی گرم
۳۲/۱-۳۵/۷	۳۴-۳۸	۲۹-۳۵	گرم
۳۵/۷-۳۹/۴	۳۸-۴۲	۳۵-۴۱	داغ
بیشتر از ۳۹/۴	بیشتر از ۴۲	بیشتر از ۴۱	خیلی داغ

مأخذ: نگارندگان

مقایسه شاخص "پیش‌بینی متوسط نظر" با ارزیابی احساس حرارتی افراد به عنوان شاخص کیفی سنجش آسایش حرارتی در (شکل ۱) یک ارائه شده است. در این نمودار محور عمودی درصد توزیع فراوانی و محور افقی بیانگر میزان شاخص "پیش‌بینی متوسط نظر" و ارزیابی احساس حرارتی می‌باشد. توزیع فراوانی در محدوده آسایشی (+۱ تا -۱) بالاتر از محدوده فوق در "پیش‌بینی متوسط نظر" است و چولگی منحنی فوق تمایل به سمت -۱ را نشان می‌دهد. در صورتی که منحنی "پیش‌بینی متوسط نظر" توزیع نرمال‌تری را ارائه کرده است.

شکل ۱: درصد توزیع فراوانی برای شاخصه‌های "پیش‌بینی متوسط نظر" با احساس حرارتی



==== پیش‌بینی متوسط نظر \_\_\_\_\_ احساس حرارتی برآورد شده

مأخذ: نگارندگان

#### ۲-۴- عوامل مؤثر بر شاخصه‌های آسایش حرارتی

به منظور تعیین میزان تأثیر عوامل محیطی و انسانی بر سه شاخصه پیش‌بینی‌کننده آسایش حرارتی "دمای مؤثر استاندارد"، "دمای معادل فیزیولوژیکی" و "پیش‌بینی متوسط نظر" از "مدل‌سازی معادله‌های ساختاری" بهره گرفته شد (شکل ۲). در این الگو، از آنجا که هر سه شاخصه فوق با برنامه ریمن محاسبه شده‌اند، دارای خطای محاسباتی تقریباً مشابهی خواهند بود. در الگو این خطاها به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین از آنجا که مؤلفه‌های دمای هوا، دمای کروی و سرعت وزش باد در رابطه محاسبه میانگین دمای تابشی نقش داشته‌اند، خطای آن‌ها نیز با یکدیگر مرتبط شده‌اند. ارتباط خطاهای دمای هوا و رطوبت نسبی به علت استفاده از دستگاه سنجش و ذخیره‌کننده یکسان برای هر دو مؤلفه می‌باشد، که البته دارای رابطه پایینی (۰/۱۷) نیز می‌باشد. شاخص برازش و شاخص نیکویی برازش تعدیل شده در الگوی تحلیلی عاملی رابطه

بیان شده به ترتیب برابر  $0/۸۳$  و  $0/۸۲$  می باشد. با توجه به نتایج تحلیل عاملی و شاخص‌های ارزیابی، الگوی اندازه‌گیری از برازش قابل قبولی برخوردار است (جدول ۴).

جدول ۴: نشانه‌ها در الگوی تأثیر عوامل محیطی و انسانی بر شاخصه‌های حرارتی

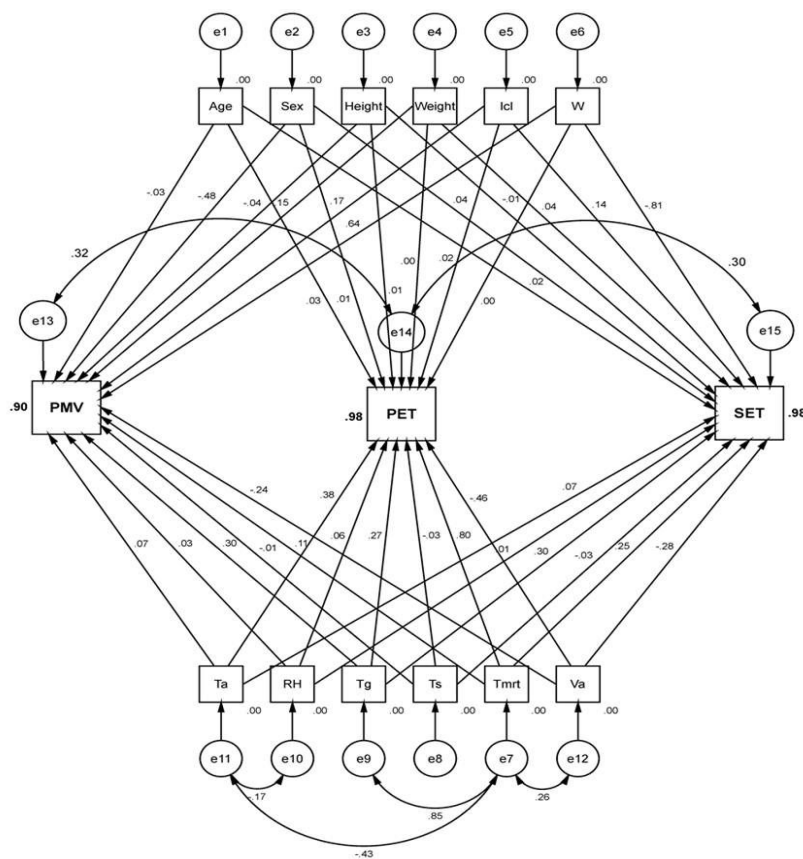
نشانه	متغیر	
RH	رطوبت نسبی	عوامل محیطی
Ta	دمای هوا	
Tmrt	میانگین دمای تابشی	
Ts	دمای سطح زمین	
Tg	دمای کروی	
Va	سرعت وزش باد	
Age	سن	
Sex	جنسیت	
Height	قد	
Weight	وزن	
Icl	نرخ لباس	
W	نرخ فعالیت	شاخصه‌های حرارتی
PET	دمای معادل فیزیولوژیکی	
SET	دمای مؤثر استاندارد	
PMV	پیش‌بینی متوسط نظر	

ارزیابی میزان تأثیر عوامل محیطی و انسانی بر سه شاخص پیش‌بینی کننده آسایش حرارتی نشان می‌دهد که متغیرهای سرعت وزش باد، میانگین دمای تابشی و وزن افراد در شاخص "دمای مؤثر استاندارد" دارای بالاترین تأثیر هستند. متغیرهای سرعت وزش باد، میانگین دمای تابشی و دمای هوا در شاخص "دمای معادل فیزیولوژیکی" و متغیرهای سرعت وزش باد، میانگین دمای تابشی، جنسیت و وزن افراد در شاخص "پیش‌بینی متوسط نظر" نیز دارای بالاترین تأثیر می‌باشند و نقش مابقی متغیرها قابل اغماض است. بر اساس این یافته‌ها، سنجه‌های فاقد ارزش حذف و الگوی تحلیل عاملی مجدداً اجرا شد. در این حالت شاخص برازش<sup>۱</sup> به  $0/۸$  و شاخص برازش تطبیقی<sup>۲</sup> به  $0/۹$  ارتقا یافت، که در مقایسه با

1. GFI
2. CFI

الگوی پیشین دارای نیکویی برازش بالاتری می‌باشد. مؤلفه‌های محیطی و انسانی مؤثر بر "دمای مؤثر استاندارد" و "دمای معادل فیزیولوژیکی" که در بالا به آن اشاره شد، ۹۸ درصد از تغییرات شاخص‌های فوق را تبیین می‌نمایند. ۲ درصد باقی مانده شامل خطای سنجش و محاسبه و سایر عوامل مؤثر بر ارزیابی این دو شاخص می‌باشد. در شاخص "پیش‌بینی متوسط نظر" میزان خطا و سایر مؤلفه‌های مؤثر که به آن اشاره نشده است، سهمی در حدود ۱۰ درصد دارند و مؤلفه‌های ۰.۹٪ تغییرات شاخص را تبیین می‌نمایند.

شکل ۲: الگوی اولیه تحلیل عاملی شاخص‌های آسایش حرارتی



مأخذ: نگارندگان

تبیین معادله برای محاسبه سریع و آسان "دمای معادل فیزیولوژیکی" در فضاهای مختلف بوستان برای فصول گرم، یکی دیگر از یافته‌های مهم این پژوهش می‌باشد. در این معادله، ضریب هم‌بستگی

"دمای معادل فیزیولوژیکی" با متغیرهای محیطی برابر  $0/72$  و ضریب تعیین تعدیل یافته<sup>۱</sup> برابر  $0/51$  می‌باشد. با توجه به میزان ضریب تعیین<sup>۲</sup>،  $52$  درصد از واریانس تغییرات مربوط به "دمای معادل فیزیولوژیکی" با متغیرهای مذکور تبیین می‌شود. معادله زیر، رگرسیون استاندارد برای ارزیابی سریع "دمای معادل فیزیولوژیکی" فضای باز شهر تهران (جدول ۵) را ارائه می‌نماید.

$$PET_{\text{Tehran}} = 21/7 + 0/4 * Ta_{\text{met}} - 0/2 * RH_{\text{met}} - 2/1 * V_a - 6/1 * a + 1/8 * LC + 2/6 * SVF$$

در معادله فوق  $Ta_{\text{met}}$  دمای هوای شهری بر اساس درجه سانتی‌گراد،  $RH_{\text{met}}$  رطوبت نسبی شهری بر اساس درصد که هر دو از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی برداشت می‌گردد،  $V_a$  سرعت وزش باد محلی بر اساس متر بر ثانیه،  $LC$  درصد تراکم فضای سبز،  $SVF$  درصد ضریب دید به آسمان و  $a$  ضریب بازتاب سطح زمین می‌باشد. در معادله مذکور، سطح هم‌بستگی "دمای معادل فیزیولوژیکی" با متغیرهای تعریف‌کننده برای رطوبت شهری بالای  $20$  درصد افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۵: ضرایب آزمون تحلیل رگرسیون الگوی ارزیابی سریع "دمای معادل فیزیولوژیکی"

سطح معنی‌داری	آزمون تی	ضریب رگرسیون استاندارد شده	خطای معیار	ضریب رگرسیون		
0/001	8/8		2/5	21/7	مقدار ثابت	
0/001	3/9	0/29	0/09	0/4	دمای هوای شهری	$Ta_{\text{met}}$
0/001	-7/4	-0/51	0/03	-0/2	رطوبت شهری	$RH_{\text{met}}$
0/001	-5/1	-0/27	0/42	-2/1	میانگین وزش باد	$V_a$
0/001	-3/8	-0/31	1/6	-6/1	بازتاب سطح زمین	$a$
0/001	5/1	0/29	0/35	1/8	تراکم فضای سبز	$LC$
0/002	3/1	0/21	0/83	2/6	ضریب دید به آسمان	$SVF$

مأخذ: نگارندگان

- Adjusted R Square
- R Square

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش تأکید می‌کند که هیچ‌کدام از شاخصه‌های حرارتی، ارزیابی جامعی از میزان آسایش حرارتی در فضای باز را ارائه نمی‌نمایند. در بیشتر پژوهش‌ها به صورت مرسوم از شاخصه "پیش‌بینی متوسط نظر" استفاده می‌شود، در صورتی که دامنه ارزیابی پایین این شاخصه، محدودیت‌های آن در سطوح حد اکثر و حداقل است و وابستگی آن به شرایط فردی سبب می‌شود که شاخصه مناسبی برای استفاده در ارزیابی آسایش حرارتی در فضای باز نباشد. شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" را جایگزین مناسبی برای آن می‌توان برشمرد که هم‌بستگی بالاتری نیز با احساس حرارتی افراد در فضای باز دارد. از آنجا که نقش عوامل انسانی بر این شاخصه بسیار ناچیز است، مناسب برای ارزیابی آسایش حرارتی فضاهای باز شهری با حوزه گسترده‌ای از افراد به شمار می‌آید. نتایج تأکید می‌نمایند که "میانگین دمای تابشی" نقش اصلی بر احساس حرارتی افراد و بیش‌ترین تأثیر بر شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" را دارد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، محدوده آسایش "دمای معادل فیزیولوژیکی" برای فضای باز شهری در تهران ۲۴/۸ تا ۲۸/۴ درجه است که بسیار متفاوت با دامنه تعریف شده کنونی برگرفته از استانداردهای اروپایی است. به منظور محاسبه سریع و آسان شاخصه "دمای معادل فیزیولوژیکی" در فضاهای باز شهری تهران، رابطه‌ای بر مبنای داده‌های محیطی در این پژوهش ارائه شد که امکان پیش‌بینی محدوده آسایش حرارتی در فضاهای مختلف با داده‌های پایه را فراهم می‌نماید.

## کتابنامه

۱. بهزادفر، مصطفی؛ منعم، علیرضا. (۱۳۸۹). «تأثیر ضریب دید به آسمان در آسایش حرارتی کاربران فضای باز شهری». نشریه آرمانشهر. ۵. صص ۳۳-۲۳.
۲. حیدری‌نژاد، قاسم؛ دلفانی، شهرام؛ زنگنه، محمد امین و حیدری‌نژاد، محمد. (۱۳۸۸). آسایش حرارتی. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.



۳. ساری صراف، بهروز. محمدی، غلام‌حسن و حسینی صدر، عاطفه. (۱۳۸۹). «تعیین مناسب‌ترین شاخص "ری من" برای مطالعه اقلیم آسایش در شمال استان آذربایجان غربی». چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. تهران: مؤسسه ژئوفیزیک، صص ۱۰۵-۱۰۰.

4. Ali-Toudret, Fazia. (2005). *Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*; Ph.D. Thesis, Universität Freiburg.
5. Ashrae. (1966). *Thermal comfort condition; ASRAE standard 55.66*, New York.
6. Ashrae. (2001). *Ashrae Fundamentals Handbook 2001*; Atlanta, Ga., American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
7. Blažejczyk, K., Broede, P, Fiala, D, Havenith, G, Holmer, I, Jendritzky, G., Kampmann, B. & Kunert, A. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica*, 14.pp 91-102.
8. Brown, Robert. (2010). *Design With Microclimate: The Secret to Comfortable Outdoor Space*: Washington, Island Press.
9. Bruse, Michael. (2009). Analysing Human Outdoor Thermal Comfort and Open Space Usage with the Multi-Agent System Botworld. *The seventh International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan.
10. Faizi, Mohsen, Monam, Alireza & Ghazizadeh, Neda. (2011). Evaluation of the Effect of Meteorological and Geographical Parameters on Thermal Discomfort Intensity with the ENVI-met model. *Journal of Climate Research*, In Press.
11. Fanger, P.O (1972). *Thermal Comfort : Analysis and applications in environmental engineerin*. New York, McGraw Hill.
12. Fountain, M.E & Huizenga, C. (1994). *Using the ASHRAE thermal comfort tool*, Atlanta. An ASHRAE Special Publication.
13. Gagge, AP, Fobelets, AP & Berglund, PE. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment; *ASHRAE Transactions*. New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
14. Givoni, B. (1976). *Man, Climate and Architectur*. London. Applied Science Publishers.

15. Honjo, Tsuyoshi. (2009). Thermal Comfort in Outdoor Environment; *Global Environmental Research*, 13, pp 43-47.
16. Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature: a universal index for the assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, pp 71-75.
17. Ishii, A., Katayama, T, Shiotsuki, Y, Yoshimizu, H. & ABE, Y. (1988). Experimental study on comfort perception of people in the outdoor environment. *Journal of architecture, planning and environmental engineering*, 386, pp 28-37.
18. Jendritzky, Gerd & Nübler, W. (1981). model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 29, pp313-326.
19. Johansson, Eric. (2006). *Urban Design and Outdoor Thermal Comfort in Warm Climates Studies in Fez and Colombo*; Ph.D. Thesis, Cambridge.
20. Kurazumi, Yoshihito, Fukagawa, Kenta, Yamato, Yoshiki, Tobita, Kunihito, Kondo, Emi, Tsuchikawa, Tadahiro, Horikoshi, Tetsumi & Matsubara, Naoki (2011). Enhanced conduction-corrected modified effective temperature as the outdoor thermal environment evaluation index upon the human body; *Building and Environment*, 46, pp12-21.
21. Kwon, Juyoun & Parsons, Ken. (2009). Evaluation of the PMV thermal comfort index in outdoor weather conditions; *In: Castellani, John W. & Endrusick, Thomas L, eds. the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, Boston*. University of Wollongong. pp132-136.
22. Lin, Tzu-ping, De Dear, Richard & Hwang, Ruey-Lung. (2011). Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort. *International Journal of Climatology*, 31, pp 302-312.
23. Lin, Tzu-Ping, Matzarakis, Andreas & Hwang, Ruey-Lung (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort; *Building and Environment*, 45, pp 213-221.
24. Matzarakis, Andreas & Mayer, Helmut (1999). Heat stress in Greece; *International Journal of Biometeorology*, 41, pp 34-39.

25. Matzarakis, Andreas, Mayer, Helmut & Iziomon, M. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature; *International Journal of Biometeorology*, 43. pp 76–84.
26. Matzarakis, Andreas, Rutz, Frank & Mayer, Helmut (2006). Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA). Geneva, Switzerland. pp449-453.
27. Mayer, H. & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments; *Theoretical and Applied Climatology*, 38. pp43-49.
28. Monteiro, Leonardo Marques & Alucci, Marcia Peinado (2009). Thermal comfort index for the assessment of outdoor urban spaces in subtropical climates; The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan.
29. Nagano, K. & Horikoshi, T. (2011a). New index indicating the universal and separate effects on human comfort under outdoor and non-uniform thermal conditions; *Energy and Buildings*, 43. pp 1694-1701.
30. Nagano, Kazuo & Horikoshi, Tetsumi (2011b). Development of outdoor thermal index indicating universal and separate effects on human thermal comfort; *International Journal of Biometeorology*, 55. pp 219-227.
31. Pickup, J. & R.D., Dear (1999). An outdoor thermal comfort index (OUT-SET\*). The 15th International Congress of Biometeorology (ICB) and the International Conference on Urban Climatology (ICUC); Macquarie University, Sydney.
32. Rohles, Fj & Levins, R (1971). The nature of thermal comfort for sedentary man; *ASHRAE Trans*, 77. pp 239–246.
33. Sasaki, Keisuke, Mayer, Helmut, Mochida, Akashi, Uchida, Maria, Tonouchi, Takahiro & Corporation, Shimizu (2009). Field measurement on thermal comfort in outdoor locations Comparison of SET\* and PET based on questionnaire survey; *The seventh International Conference on Urban Climate*. Yokohama, Japan.
34. Scudo, Giovanni (2005). Environmental comfort in green urban spaces : an introduction to design tools; *In: Werquin, Ann Caroll, Duhem, BERNARD*,

- Lindholm, Gunilla , Oppermann, Bettina , Pauleit, Stephan & Tjallingii, Sybrand (Eds.) *Green Structure And Urban Planning*. Belgium: COST Office.
35. Thorsson, Sofia, Lindqvist, Maria & Lindqvist, Seven (2004). Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Goteborg, Sweden; *International Journal of Biometeorol*, 48, pp 149–156.
36. Tseliou, Areti, Tsiros, Ioannis X., Lykoudis, Spyros & Nikolopoulou, Marialena (2010). An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions; *Building and Environment*, 45, pp 1346-1352.
37. VDI (1998). *Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning*. Part I: Climate, VDI guideline 3787. Part 2; Beuthen, Berlin.
38. Ye, Guodong, Yang, Changzhi, Chen, Youming & Li, Yuguo (2003). A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET\*); *Building and Environment*, 38, pp 33-44.
39. Zambrano, Leticia , Malafaia, Cristina & Bastos, Leopoldo E.G. (2006). Thermal comfort evaluation in outdoor space of tropical humid climate; *In: PLEA*, ed. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland.