بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیطزیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ)

(مطالعه موردی دانشگاه صنعتی شاهرود)

نگارنده: اشکان کاظمی

استاد راهنما

دکتر بهناز دهرآزما

استاد مشاور

دکتر محمد ضامن

تیر ماه ۱۳۹۷

تقدیم به

پدر و مادر نازنین و برادر عزیزم

و تمام آزادمردانی که نیک می‌اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند.

دانشمندان، بزرگان، و جوان مردانی که جان و مال خود را در حفظ و اعتلای این مرز و بوم فدا نموده و می‌نمایند.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌بینم تا قدردان زحمات و محبت‌های کسانی باشم که وجودشان مایه دلگرمی من بوده و کمک‌هایشان، به انجام رساندن این پژوهش را ممکن ساخته است.

نخست خانواده عزیزم که همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند. آنان که محبتشان مهم‌ترین انگیزه من برای کار و تلاش است.

اینان مگر ز رحمت محض آفریده‌اند

کارام جان و اُنس دل و نور دیده‌اند

سپس از اساتید گران‌قدر سرکار خانم دکتر بهناز دهرآزما، استاد راهنما و جناب آقای دکتر محمد ضامن، استاد مشاور پایان‌نامه، که نقاط قوت این کار حاصل راهنمایی‌های بسیار ارزشمند ایشان و نقاط ضعف آن نتیجه اهمال این‌جانب است. خداوند بزرگ را شاکرم که توفیق به سرانجام رساندن یک تجربه ارزشمند در کنار این اساتید را نصیب من کرد و از درگاهش برای ایشان همواره آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

در بزم عشق شمع فروزان معلم است

مردم چو پیکرند اگر، جان معلم است

همچنین تشکر و احترام فراوان تقدیم به اساتید بزرگوار آقایان دکتر سید فضل‌الله ساغروانی و دکتر رمضان واقعی که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند.

تعهدنامه

این‌جانب اشکان کاظمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-مهندسی محیط‌زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ) (مطالعه موردی دانشگاه صنعتی شاهرود) تحت راهنمایی سرکار خانم دکتر بهناز دهرآزما متعهد می‌شوم.

تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام‌شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.

مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

اکثر مردم در جهان، بیش از ۹۰ درصد زمان روز خود را در فضاهای داخلی مانند منازل، ادارات، کارخانه‌ها، مدارس و دانشگاه‌ها سپری می‌کنند؛ بنابراین ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی در فضاهای داخلی با تراکم جمعیت بالا مورد نیاز است و کمبود این‌چنین مطالعات در کشور احساس می‌شود. به همین منظور در تحقیق حاضر کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ) دانشگاه صنعتی شاهرود به صورت کمّی و کیفی ارزیابی گردید. با در نظر گرفتن شرایط اوج بهره‌برداری از فضاهای داخلی و بازه زمانی بحرانی، فصول زمستان و بهار به‌منظور بررسی انتخاب شد و برداشت داده از فضاهای داخلی زمان‌بندی شد. پارامترهای موردمطالعه جهت ارزیابی IEQ عبارت از کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ) شامل غلظت آلاینده‌های کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، ترکیبات آلی فرار (VOCs) و ذرات معلّق $PM_{2.5}$، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، روشنایی و میزان صدا بودند. همچنین به‌وسیله‌ی پرسشنامه از افراد حاضر در هریک از فضاهای داخلی، به‌صورت کیفی نظرسنجی شد. مطابق با نتایج، مقادیر میانگین برای این پارامترها در فضاهای داخلی موردبررسی در مجموع دو فصل، به ترتیب برابر ۵۱۳/۱۴۳±۱/۱ ppm، ۰/۰±۱۳/۵۷ ppm، ۸±۱۲/۹ $\mu g/m^3$، ۲۳/۲±۱/۴ ^oC، ٪ ۲۰/۹±۶/۲، m/s ۰/۰±۰۶/۰۸، ۵۰۳/۳۲۲±۱ lux و ۵۵/۱۲±۱/۳ dBa اندازه‌گیری گردید. مقادیر میانگین برای تمامی پارامترهای موردمطالعه، در محدوده‌ی مجاز استانداردهای مطرح در این زمینه قرار داشتند. دررابطه با پرسش "احساس کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی"، تعداد نظرات مساعد و باکیفیت‌بالا نسبت به نظرات نامساعد و با کیفیت پایین، بسیار بیشتر مشاهده شد. همچنین IEQ موردبررسی از نظر مردان نسبت به زنان بهتر بود. به‌طورکلّی از نظر افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی در دانشگاه صنعتی شاهرود، کیفیت زیست‌محیطی قابل‌قبول و رضایت مردان بیشتر از زنان (حدود دو برابر) بود.

واژه‌های کلیدی: کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی، کیفیت هوای فضای داخلی، اندازه‌گیری کمّی، ارزیابی کیفی، دانشگاه صنعتی شاهرود

مقالات استخراج‌شده از پایان‌نامه

- کاظمی ا، دهرآزما ب، (۱۳۹۵)، " مروری بر مدیریت پسماند دانشگاه ها به منظور کاهش و بازیافت پسماند جامد منطبق بر توسعه‌پایدار"، اولین همایش ملّی دانشگاه سبز، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

- کاظمی ا، دهرآزما ب، (۱۳۹۶)، "ارزیابی کیفیت هوای فضاهای داخلی (مطالعه موردی دانشگاه صنعتی شاهرود)"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مقاله دردست‌تهیه جهت چاپ در ژورنال

- Assessment of Indoor Environmental Quality (Case Study Shahrood University of Technology)

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلّیات

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسئله ۳

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۴- اهداف تحقیق ۵

۱-۵- روش انجام تحقیق ۷

۱-۶- سازمان‌بندی پایان‌نامه ۷

فصل دوم: مبانی تئوریک و مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- ساختمان سبز ۱۱

۲-۲-۱- تاریخچه ساختمان سبز ۱۱

۲-۲-۲- تعریف ساختمان سبز ۱۲

۳-۲-۲- شکل شماتیک یک ساختمان سبز ۱۵

۲-۳- سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ساختمان سبز ۱۶

۲-۳-۱- ارزیابی ساختمان سبز ۱۷

۲-۳-۲- ابزارهای ارزیابی زیست‌محیطی ساختمان‌ها ۱۸

۲-۳-۳- سیستم ارزیابی و رتبه‌بندی لیید (LEED™) ۱۹

۲-۴- ویژگی‌های ساختمان سبز ۲۱

۲-۴-۱- سایت پایدار (SS) ۲۲

۲-۴-۲- انرژی و اتمسفر (EA) ۲۳

۲-۴-۳- کارآمدی آب (WE) ۲۵

۲-۴-۴- مصالح و منابع (MR) ۲۶

۲-۵- کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ) ۲۷

۲-۵-۱- کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ) و عوامل مؤثر بر آن ۲۹

۲-۵-۱-۱- آلاینده‌های معدنی ۳۰

۲-۵-۱-۲- آلاینده‌های آلی ۳۱

۲-۵-۱-۳- آلاینده‌های ناشی از احتراق ۳۲

۲-۵-۱-۴- آلاینده‌های بیولوژیکی ۳۳

۵-۱-۵-۲- سایر آلاینده‌های هوا ۳۴

۲-۵-۲- آسایش دمایی و دمای مطلوب ۳۴

۳-۵-۲- آسایش صوتی و میزان صدا..... ۳۵

۴-۵-۲- روشنایی و نور دریافتی از خورشید طی روز و عوامل مؤثر بر آن ۳۶

۵-۵-۲- چشم‌انداز فضای داخلی ۳۷

۶-۵-۲- سیستم تهویه مطبوع و فیلتراسیون ۳۷

۷-۵-۲- اثرگذاری مصالح ساختمانی پس از اتمام سازه بر هوای فضای داخلی ۳۸

۶-۲- معرفی مدل‌های ارزیابی IEQ ۳۸

۷-۲- مروری بر مطالعات انجام شده در ارتباط با ارزیابی IEQ ۴۱

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۱-۱- مقدمه (روش کلی تحقیق) ۵۰

۲-۳- معرفی محل موردبررسی و انتخاب فضاهای داخلی ۵۱

۳-۳- موقعیت مکانی، زمان‌بندی و نحوه برداشت داده‌های کمّی و کیفی از فضاهای داخلی ۵۲

۴-۳- روش اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه ۵۳

۵-۳- روش ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه ۵۵

۶-۳- روش ارزیابی کلّی IEQ ۵۷

فصل چهارم: نتایج و بحث

۱-۴- مقدمه ۶۰

۲-۴- نتایج حاصل از ارزیابی کمّی IEQ ۶۰

۱-۲-۴- تحلیل آماری IEQ در فضاهای داخلی در فصول موردبررسی ۶۰

۲-۲-۴- تحلیل آماری کلّی IEQ ۷۵

۳-۴- نتایج حاصل از ارزیابی کیفی IEQ ۸۶

۱-۳-۴- ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی ۸۶

۲-۳-۴- استخراج مقادیر خنثی ۹۲

۳-۳-۴- ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی ۱۰۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵- مقدمه ۱۱۴

۲-۵-جمع‌بندی نتایج حاصل از ارزیابی کمّی IEQ ۱۱۴

۵-۲-۱- نتایج کلّی تحلیل آماری IEQ در فضاهای داخلی در فصول موردبررسی ۱۱۴

۵-۲-۲- نتایج کلّی تحلیل آماری کلّی IEQ ۱۱۷

۵-۳- جمع‌بندی نتایج حاصل از ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه ۱۱۸

۵-۳-۱- نتایج کلّی ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی ... ۱۱۸

۵-۳-۲- نتایج کلّی استخراج مقادیر خنثی ۱۲۰

۵-۳-۳- نتایج کلّی ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی ۱۲۱

۵-۴- پیشنهادات جهت مطالعات آتی ۱۲۲

منابع و مراجع ۱۲۴

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: شکل شماتیک یک ساختمان سبز ۱۵

شکل ۲-۲: نحوه دریافت گواهی‌نامه بر اساس امتیاز کسب‌شده ۲۱

شکل ۲-۳: خلاصه‌ای از پارامترها، استانداردها، نحوه برداشت داده و روش‌های ارزیابی IEQ ۳۹

شکل ۲-۴: اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر IEQ مطابق با مطالعات مختلف انجام‌شده ۳۹

شکل ۳-۱: تجهیزات اندازه‌گیری کمّی، در یکی از فضاهای داخلی موردبررسی ۵۴

شکل ۳-۲: پرسشنامه مورداستفاده برای ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه ۵۶

شکل ۴-۱: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر غلظت آلاینده CO_2 به تفکیک فضاهای داخلی موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۶۲

شکل ۴-۲: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر غلظت آلاینده VOCs به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۶۴

شکل ۴-۳: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۶۶

شکل ۴-۴: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر دمای هوا (AT) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۶۷

شکل ۴-۵: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر رطوبت نسبی (RH) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۶۹

شکل ۴-۶: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر سرعت جریان هوا (AV) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۷۰

شکل ۴-۷: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر روشنایی (L) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۷۲

شکل ۴-۸: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر میزان صدا (SL) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۷۴

شکل ۴-۹: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس کیفیت هوای فضاهای داخلی (IAQ) ۸۷

شکل ۴-۱۰: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس دمای هوا (AT) در فضاهای داخلی ۸۸

شکل ۴-۱۱: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس رطوبت نسبی (RH) در فضاهای داخلی ۸۹

شکل ۴-۱۲: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس سرعت جریان هوا (AV) در فضاهای داخلی ۹۰

شکل ۴-۱۳: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس روشنایی (L) در فضاهای داخلی ۹۰

شکل ۴-۱۴: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس میزان صدا (SL) در فضاهای داخلی ۹۱

شکل ۴-۱۵: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ) ۹۲

شکل ۴-۱۶: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده CO_2 به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۴

شکل ۴-۱۷: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده VOCs به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۵

شکل ۴-۱۸: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۶

شکل ۴-۱۹: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر دمای هوا (AT) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۷

شکل ۴-۲۰: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر رطوبت نسبی (RH) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۸

شکل ۴-۲۱: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر سرعت جریان هوا (AV) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۹۹

شکل ۴-۲۲: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر روشنایی (L) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۱۰۰

شکل ۴-۲۳: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر میزان صدا (SL) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل) ۱۰۱

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: عوامل تأثیرگذار بر محیط ساخته‌شده ۱۳

جدول ۲-۲: زیرمجموعه‌های گواهی‌نامه‌ها در سیستم LEED v.4 ..... ۲۰

جدول ۲-۳- معیارهای دریافت گواهی‌نامه BD+C و امتیازبندی آن‌ها ۲۱

جدول ۲-۴: مشخصات مدل چیانگ و همکاران (۲۰۰۱) به‌منظور ارزیابی IEQ ۴۰

جدول ۲-۵: کلاس‌های ارزیابی و محدوده‌های مجاز پارامترهای موردمطالعه ۴۰

جدول ۳-۱: فضاهای داخلی انتخاب‌شده در دانشگاه صنعتی شاهرود جهت ارزیابی IEQ ۵۲

جدول ۴-۱: تحلیل آماری کلی حاصل از اندازه‌گیری کمّی داده‌ها برای هریک پارامترهای موردمطالعه در فصول زمستان و بهار و مجموع دو فصل ۷۶

جدول ۴-۲: استانداردها و محدوده مجاز غلظت آلاینده کربن دی‌اکسید (CO_2) در فضای داخلی برحسب ppm ($CO_{2\ Outdoor} = 400ppm$) ۷۷

جدول ۴-۳: مقادیر خنثی حاصل از ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامترهای موردمطالعه در فصول زمستان و بهار و مجموع دو فصل ۱۰۲

جدول ۴-۴: توزیع میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترها ۱۰۶

جدول ۴-۵: تعداد آرا و درصد حاصل از پرسشنامه‌ها به تفکیک مرد و زن و مجموع آن‌ها برای هریک از پارامترها ۱۱۱

جدول ۵-۱: تحلیل آماری کلّی حاصل از اندازه‌گیری کمّی داده‌ها برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار) ۱۱۷

جدول ۵-۲: مقادیر خنثی حاصل از ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامترهای موردمطالعه در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار) ۱۲۱

جدول ۵-۳: توزیع درصد رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترها در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار) ۱۲۲

فصل اول

کلّیات

۱-۱- مقدمه

به‌طورکلّی هرگونه اقدام و عمل ساده‌ای که برای کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی انجام می‌شود «سبز» در نظر گرفته می‌شود. ساختمان سبز به احداث سازه‌ها و استفاده از فرآیندهایی اشاره دارد که دارای دو ویژگی بارز باشند: نسبت به محیط‌زیست مسئول باشند و از منابع کارآمد در سراسر چرخه حیات خود استفاده کنند. مطابق با سیستم ارزیابی و رتبه‌بندی لیید (LEED™)[1] ساختمان سبز دارای پنج ویژگی اصلی است که یکی از آن‌ها کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ)[2] است. عوامل مؤثر بر این ویژگی عبارت‌اند از: کیفیت هوای داخلی (IAQ)[3] ، آسایش دمایی و رطوبتی، میزان صدا، نور دریافتی از خورشید طی روز، چشم‌انداز فضای داخلی، تهویه مطبوع هوا و فیلتراسیون و نیز مصالح ساختمانی اثرگذار بر هوای فضای داخلی[۱،۲].

هدف تحقیق حاضر ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ) (مطالعه موردی دانشگاه صنعتی شاهرود) است. در راستای نیل به این هدف با استفاده از آیین‌نامه‌های داخلی موجود و استانداردهای بین‌المللی مطرح در این زمینه، به‌وسیله‌ی تجهیزات مناسب و دستگاه‌های موردنیاز، غلظت آلاینده‌های کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)[4] و ذرات معلّق $PM_{2.5}$، و همچنین پارامترهای دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، روشنایی و میزان صدا در فضاهای داخلی به‌صورت کمّی اندازه‌گیری گردیده است. همچنین ارزیابی کیفی با استفاده از تکمیل پرسشنامه‌های استاندارد با جمعیت آماری بالا توسط افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی صورت پذیرفته است. درنهایت بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های کمّی و ارزیابی کیفی از شرایط موجود، ارتباط منطقی برقرار گردیده و درنهایت IEQ تجزیه‌وتحلیل و ارزیابی شده است.

[1] Leadership in Energy and Environmental Design
[2] Indoor Environmental Quality
[3] Indoor Air Quality
[4] Volatile Organic Compounds

۲-۱- بیان مسئله

فراهم کردن محیطی راحت و تأمین آسایش و سلامتی ساکنان، هدف اصلی ساختمان‌هاست. این محیط و فضای داخلی به عواملی نظیر محل، آب‌وهوا، سیستم ساختمان و ساکنان وابسته است؛ به‌طوری‌که ترکیب این عوامل، محیط و فضای داخلی را شکل می‌دهد[۳]. سلامتی و میزان بهره‌وری و کارایی ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی یک ساختمان، ارتباط تنگاتنگی با کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی ساختمان و همین‌طور کیفیت هوایی که ساکنان در این فضاها تنفس می‌کنند دارد[۱،۴،۵]؛ درنتیجه سیستم‌های تهویه مطبوع[1] در ساختمان‌ها، جهت ایجاد شرایط زیست‌محیطی مطلوب و فراهم کردن هوای با کیفیت مناسب در فضاهای داخلی ساختمان طراحی می‌شود. از طرفی IEQ با عوامل متعددی (شیمیایی و فیزیکی) در ارتباط است[۶]. عوامل مؤثر بر کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ) ساختمان عبارت‌اند از[۱]:

- کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ)
- آسایش دمایی و دمای مطلوب
- آسایش صوتی و میزان صدا
- روشنایی و نور دریافتی از خورشید طی روز
- چشم‌انداز فضای داخلی
- سیستم تهویه مطبوع و فیلتراسیون
- اثرگذاری مصالح ساختمانی پس از اتمام سازه بر هوای فضای داخلی

آلاینده‌های رایجی که بر کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ) ساختمان اثر می‌گذارند، عبارت‌اند از[۱]:

[1] Air Conditioning

- آلاینده‌های معدنی شامل آزبست، سرب، رادون و پنبه نسوز
- آلاینده‌های آلی شامل ترکیبات آلی فرار (VOCs)، ترکیبات آلی جامد و نیمه جامد، آلدئیدها
- آلاینده‌های ناشی از احتراق شامل کربن‌مونوکسید (CO)، کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_X)، اکسیدهای گوگرد (SO_X)
- آلاینده‌های بیولوژیکی مانند قارچ و کپک، باکتری، ویروس، انگل، گردوغبار، جوندگان، حشرات و سایر حیوانات حساسیت‌زا
- سایر آلاینده‌های هوا شامل ذرات معلّق[1] در هوا (PM_1،$PM_{2.5}$،PM_{10})، اُزُن (O_3)، دود سیگار، پسماند آفت‌کش‌ها، فایبرگلاس‌ها

به‌طورکلّی می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش جمعیت و رشد فنّاوری و درنتیجه ورود آلاینده‌های مختلف به فضاهای داخلی ساختمان‌ها، برآورد وضعیت موجود و ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی آن‌ها، کنترل و در ادامه بهینه‌سازی کیفیت آن‌ها ازجمله مسائل مطرح در عصر کنونی است.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

اغلب مردم در سراسر دنیا بیش از ۹۰ درصد از زمان روز خود را در فضاهای بسته مانند منازل، ادارات و کارخانه‌ها سپری می‌کنند[۱،۳]؛ بنابراین کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی و کیفیت هوایی که ساکنان ساختمان‌ها در این فضاها استنشاق می‌کنند، نقش به سزایی بر سلامتی، کارایی و تندرستی آن‌ها دارد[۱،۴،۵]. آسایش و میزان راحتی در فضاهای داخلی، معیاری برای اندازه‌گیری رضایت ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی است؛ چراکه فراهم بودن راحتی و آسایش در محیط،

[1] Particulate Matter

منجر به بهره‌وری ساکنان شده و بر روی سلامتی آن‌ها نیز به‌صورت مستقیم اثرگذار است[۳]. تحقیقات دانشکده آمریکایی آلرژی[1] نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد تمامی بیماری‌ها به دلیل آلودگی هوای فضاهای داخلی به وجود آمده و یا بدتر شده‌اند و علاوه بر این موارد بیماری‌های مرتبط با ساختمان (BRI)[2] و سندرم ساختمان مریض (SBS)[3] در حال افزایش است[۱،۴،۵]. در آلودگی هوای محیط‌های محدودشده و فضاهای داخلی یک ساختمان و درنتیجه کاهش IEQ، عوامل متعددی (شیمیایی نظیر آلاینده CO_2 و فیزیکی مانند دمای هوا) دخیل است[۶]؛ بنابراین همین تعدد عوامل و تأثیرات سوء کیفیت نامناسب هوای فضاهای داخلی و افزایش روزافزون عوامل آلاینده در این فضاها، ضرورت انجام تحقیقی در ارتباط با ارزیابی IEQ در ساختمان‌ها را روشن می‌سازد.

با توجه به موارد ذکرشده، تحقیق حاضر باهدف ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی ساختمان به‌عنوان گامی مؤثر در جهت ایجاد ساختمان‌های سبز و درنهایت رسیدن به توسعه پایدار، پایه‌گذاری گردیده است.

۴-۱- اهداف تحقیق

هدف کلّی تحقیق حاضر عبارت است از:

ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ) با مطالعه موردی دانشگاه صنعتی شاهرود.

اهداف جزئی تحقیق حاضر بدین قرار است:

- بررسی فضاهای داخلی موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود و انتخاب فضاهای حسّاس و بااهمیت جهت ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ) با توجه به کاربری آن‌ها

[1] American College of Allergies
[2] Building-related Illness
[3] Sick-building Syndrome

- اندازه‌گیری کمّی و آنالیز پارامترهای مؤثر بر IEQ شامل غلظت آلاینده‌های CO_2، VOCsو $PM_{2.5}$، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت هوا، روشنایی و میزان صدا در فضاهای داخلی موردبررسی طی دو فصل زمستان و بهار
- تحلیل آماری داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری کمّی پارامترهای مؤثر بر IEQ در فضاهای داخلی موردبررسی در دو فصل زمستان و بهار
- ارزیابی کیفی و تحلیل پارامترهای مؤثر بر IEQ شامل کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ)، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت هوا، روشنایی و میزان صدا در فضاهای داخلی موردبررسی طی فصول زمستان و بهار، از طریق تکمیل پرسشنامه توسط افراد حاضر در فضاهای داخلی
- ارزیابی احساس افراد و ساکنان حاضر در فضاهای داخلی از شرایط زیست‌محیطی موجود در فضاهای داخلی موردبررسی در دو فصل زمستان و بهار
- بررسی میزان تطابق نتایج کمّی حاصل از اندازه‌گیری با دستگاه با نتایج کیفی حاصل از توزیع پرسشنامه در فضاهای داخلی موردبررسی، و استخراج مقادیر خنثی
- ارزیابی میزان رضایت افراد و ساکنان حاضر در فضاهای داخلی از شرایط زیست‌محیطی موجود در فضاهای داخلی موردبررسی در دو فصل زمستان و بهار
- مقایسه‌ی نتایج حاصل از ارزیابی IEQ در فضاهای داخلی موردبررسی با محدوده‌های مجاز برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در استانداردهای بین‌المللی موجود در این زمینه
- مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری کمّی و ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه بین دو فصل زمستان و بهار

۱-۵- روش انجام تحقیق

روش تحقیق حاضر به‌قرار زیر است:

- مطالعه و شناخت درباره‌ی ساختمان سبز، سیستم‌های ارزیابی و ویژگی‌های آن
- شناخت ویژگی کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ) و عوامل مؤثر بر آن
- استخراج پارامترهای مؤثر، تجهیزات لازم و استانداردهای بین‌المللی جهت ارزیابی IEQ
- اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه به‌وسیله دستگاه و همچنین ارزیابی نظرات کیفی از طریق توزیع پرسشنامه در فضاهای داخلی موردبررسی
- استخراج جداول و اشکال حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌های کمّی و کیفی به‌دست‌آمده
- ارزیابی IEQ دانشگاه صنعتی شاهرود

۱-۶- سازمان‌بندی پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر به‌قرار زیر سازمان‌بندی گردیده است:

- فصل اول: کلّیات

در این فصل به طرح و بیان مسئله موردبررسی در پایان‌نامه، ضرورت انجام این تحقیق، اهداف و روش انجام تحقیق حاضر پرداخته شد.

- فصل دوم: مبانی تئوریک و مروری بر مطالعات پیشین

در این فصل مبانی تئوریک نظیر تاریخچه، تعریف و شکل شماتیک ساختمان سبز، سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ساختمان سبز و ویژگی‌های ساختمان سبز بیان گردیده است. همچنین به بررسی و مرور مطالعات پیشین و تحقیقات انجام‌شده در خصوص ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی پرداخته شده است.

- فصل سوم: مواد و روش‌ها

در این فصل به مباحثی همچون معرفی محل موردبررسی و انتخاب فضاهای داخلی، موقعیت مکانی، زمان‌بندی و نحوه برداشت داده‌های کمی و کیفی از فضاهای داخلی، روش اندازه‌گیری کمی پارامترهای موردمطالعه، روش اندازه‌گیری کمی پارامترهای موردمطالعه و درنهایت روش ارزیابی کلی IEQ اختصاص داده شده است.

- فصل چهارم: نتایج و بحث

در این فصل نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه شامل تحلیل آماری برای فضاهای داخلی موردبررسی و تحلیل آماری کلی، و نیز نتایج حاصل از ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه شامل استخراج مقادیر خنثی، ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی و ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی در قالب اشکال و جداول مربوطه بیان شده است. همچنین به بحث پیرامون نتایج حاصل از این تحقیق و مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات پیشین در این زمینه پرداخته شده است.

- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل جمع‌بندی کلّی حاصل از نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر بیان شده و نیز پیشنهادات مدنظر به‌منظور ادامه و تکمیل تحقیق حاضر ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی نظری و مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲- مقدمه

در فصل پیش رو به بحث و بررسی درباره‌ی مبانی نظری تحقیق حاضر نظیر تاریخچه، تعریف و شکل شماتیک ساختمان سبز، سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ساختمان سبز و ویژگی‌های ساختمان سبز پرداخته شده است. همچنین به مرور و بررسی مطالعات پیشین و بیان نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات مشابه محققین پیشین در خصوص ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی پرداخته شده است.

ساختمان سبز چیست؟ احتمالاً اولین سؤالی که پس از طرح عنوان «ساختمان سبز» در ذهن مخاطب ایجاد می‌شود؛ سؤالی ساده که بیشترین دفعات تکرار را در پایگاه‌های اطلاعاتی مرتبط با انجمن ساختمان سبز ایالات‌متحده (USGBC)[۱] داشته است. «ساختمان سبز» می‌تواند برای افراد مختلف تعاریف متفاوتی داشته باشد. سیستم رتبه‌بندی لیید (LEED™)[۲] به‌عنوان یک استاندارد معتبر جهت امتیازدهی به ساختمان‌های سبز در این زمینه مطرح است؛ اما بسیاری از سازمان‌های محلی در سراسر دنیا، استانداردهای خاص خود را دارند و تعریفی از «ساختمان سبز» ارائه می‌دهند. بسیاری از سازندگان و پیمانکاران باوجود عدول و صرف‌نظر کردن از برخی استانداردهای مطرح‌شده در سیستم رتبه‌بندی لیید، ادعا می‌کنند که سبز هستند[۷].

به‌طورکلّی هرگونه اقدام و عمل ساده‌ای که برای کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی انجام می‌شود «سبز» در نظر گرفته می‌شود. ازجمله این اقدامات در صنعت ساختمان می‌توان به این موارد اشاره کرد: استفاده از مصالح تجدید پذیر، عایق‌کاری کارآمد، بهره‌مندی از اتوماسیون (خودکارسازی)[۳] به‌روز و لوازم‌خانگی هوشمند، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، مدیریت منابع آب،

[1] U. S. Green Building Council
[2] Leadership in Energy and Environmental Design
[3] Automation

به‌کارگیری فناوری‌های نوین و انجام پروژه‌هایی نظیر بازسازی و نوسازی. ساختمان سبز یک مفهوم جامع است و با درک این موضوع شروع می‌شود که محیط ساخته‌شده می‌تواند اثرات مثبت و منفی تأثیرگذاری بر محیط‌زیست طبیعی، و همچنین بر انسان که هرروز در این محیط ساخته‌شده زندگی می‌کند داشته باشد. ازاین‌جهت، ساختمان سبز تلاشی برای تقویت نقاط مثبت و تضعیف نقاط منفی این اثرات در سراسر چرخه حیات ساختمان و محیط ساخته‌شده است[۱،۷].

۲-۲- ساختمان سبز

۱-۲-۲- تاریخچه‌ی ساختمان سبز

در سال ۱۹۸۷ برای نخستین بار مفهوم توسعه پایدار توسط کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه تعریف شد: "توسعه‌ای که نیازهای نسل فعلی را بدون ایجاد مشکل در توانایی نسل‌های آینده در برآوردن احتیاجات خود تأمین می‌کند".

سال ۱۹۹۰ سالی پر از دستاورد برای ساختمان سبز و توسعه پایدار بود. در این سال بود که کشورهای مختلف بر آن شدند که به‌طورجدی تری در عرصه حفظ و نگهداری از محیط‌زیست بکوشند. در کشور کانادا، انستیتو بین‌المللی توسعه پایدار در همین سال تأسیس شد و پس از شروع به کار، و به‌طور پیوسته اخبار مربوط به توسعه پایدار را تحت مجموعه آنلاین بولتن مذاکرات زمین منتشر کرد. مهم‌تر از همه این‌که اولین گواهی‌نامه ساختمان سبز به نام BREEAM[1] نیز در همین سال پایه‌گذاری شد. BREEAM که مخفف "متدولوژی ارزیابی زیست‌محیطی سازمان پژوهش ساختمان" است، متعلق به کشور انگلستان و جزو برترین گواهی‌نامه‌های ساختمان سبز است.

[1] Building Research Establishment Environmental Assessment Method

یک سال بعد، یعنی در سال ۱۹۹۳، نخستین ملاقات سازمان ملل متحد با موضوع توسعه پایدار، برای پیشبرد اهداف (UNCED)[1] و افزایش همکاری‌های بین‌المللی و بهبود ظرفیت‌های تصمیم‌گیری بین دولت‌ها برگزار شد.

انجمن ساختمان سبز ایالات‌متحده (USGBC) در سال ۱۹۹۳ به وجود آمد و با این هدف شروع به کار کرد که صنعت ساخت‌وساز را سازگاربامحیط‌زیست کند. این شورا که ازنظر مالی از دپارتمان انرژی آمریکا تأمین می‌شود شروع به تعریف یک سیستم امتیازدهی و ارزیابی برای ساختمان‌های سبز کرد. گواهی‌نامه‌ای که USGBC ارائه کرد، گواهی‌نامه لیید (LEED™) است که در ادامه به آن اشاره می‌شود. USGBC که کار خود را با صد عضو شروع کرده بود با محبوبیت روزافزونش در سال ۲۰۰۷ حدود ۷۷۰۰ عضو داشت.

در ادامه موج ظهور گواهی‌نامه‌های ساختمان سبز، USGBC در سال ۱۹۹۸ اولین نسخه‌ی گواهی‌نامه لیید (LEED™) که مخفف لاتین عبارت "راهبری طراحی زیست‌محیطی و انرژی" است، را منتشر کرد. یک سال بعد، سال ۱۹۹۹، جمعیت کره زمین به ۶ میلیارد نفر افزایش پیدا کرد و پس‌ازآن یعنی در سال ۲۰۰۰، USGBC نسخه‌ی دوم لیید با عنوان LEED v.2 را روانه بازار کرد. نسخه‌ی سوم و به‌روز شده گواهی‌نامه لیید با عنوان LEED v.3 در سال ۲۰۰۹ منتشر شد. تغییرات مثبتی در این نسخه از گواهی‌نامه روی داد و سرانجام در سال ۲۰۱۴، نسخه چهارم لیید با عنوان LEED v.4 منتشر شد[۷].

۲-۲-۲- تعریف ساختمان سبز

ساختمان سبز (همچنین به‌عنوان ساخت‌وساز سبز یا ساختمان پایدار یا ساختمان با عملکرد بالا نیز شناخته می‌شود) به احداث سازه‌ها و استفاده از فرآیندهایی اشاره دارد که دارای دو ویژگی بارز باشند:

[1] United Nations Conference on Environment and Development

این‌که نسبت به محیط‌زیست مسئول باشند و از منابع کارآمد در سراسر چرخه حیات خود استفاده کنند؛ از بهینه‌سازیِ مکان‌یابی (تعیین محل پروژه) گرفته تا طراحی، ساخت‌وساز، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، نوسازی و واسازی[1] ساختمان. به‌عبارت‌دیگر، ساختمان سبز شامل برقراری تعادل بین فرایند ساخت سازه و محیط‌زیست پایدار است. این امر مستلزم همکاری نزدیک گروه‌های طراحی، معماران، مهندسان و مشتریان در تمامی مراحل پروژه است. از نتایج اولیه‌ی برقراری این تعادل، برطرف شدن مشکلات اقتصادی ناشی از طراحی قدیمی ساختمان‌ها و نیز رشد و توسعه‌ی بهره‌وری، دوام و راحتی در ساختمان‌های سبز است. در جدول ۲-۱ عوامل مؤثر بر محیط ساخته‌شده آورده شده است[۱،۸].

جدول ۲-۱: عوامل تأثیرگذار بر محیط ساخته‌شده[۸]

جنبه‌ها	مصارف	اثرات زیست‌محیطی	اثرات نهایی
. مکان‌یابی . طراحی . ساخت . بهره‌برداری . حفظ و نگهداری . نوسازی . واسازی	. انرژی . آب . مصالح . منابع طبیعی	. پسماند[2] . آلودگی هوا . آلودگی آب . آلودگی محیط داخلی . جزیره‌های گرمایی[3] . جریان فاضلاب سطحی . سروصدا	. آسیب به سلامتی انسان . تخریب محیط‌زیست . فقدان منابع

هدف اصلی ساختمان سبز و یا هر ساختمان دیگری که از نظر زیست‌محیطی پایدار است، کاهش اثرات نامطلوب محیط ساخته‌شده بر سلامت انسان و بر محیط‌زیست طبیعی است. این هدف به‌وسیله‌ی اقدامات زیر تحقق می‌یابد:

- استفاده کارآمد از انرژی، آب و سایر منابع
- حفاظت از بهداشت ساکنین و بهبود بهره‌وری کارکنان

[1] Deconstruction
[2] Waste
[3] Heat Islands

- کاهش پسماند، آلودگی و تخریب محیط‌زیست

در راستای عملیاتی شدن این اقدامات ساختمان سبز راهکارهایی پیشنهاد می‌کند: به‌عنوان‌مثال ساختمان سبز از مصالح پایدار در ساخت‌وساز خود بهره می‌گیرد (مثلاً مصالح باقابلیت استفاده مجدد، مصالح با محتوای بازیافتی و یا مصالح ساخته‌شده از منابع تجدید پذیر)؛ ساختمان سبز با ایجاد محیط داخلی سالم، آلاینده‌ها را به حداقل می‌رساند (مثلاً با کاهش استفاده از محصولات فرار در محیط داخلی)؛ و یا ساختمان سبز با بهره‌گیری از ویژگی‌های محوطه‌سازیِ[1] مناسب میزان آبِ مصرفی را کاهش می‌دهد (مثلاً محوطه‌سازی با استفاده از گیاهان بومی که بدون آبیاری اضافی به حیات خود ادامه می‌دهند).

بر اساس اصول طراحی پایدار، ساختمان سبز بر مسیری طراحی و ساخته می‌شود که دارای کمترین اثرات مخرب زیست‌محیطی در سراسر چرخه حیات ساختمان باشد. نتیجه‌ی این طراحی پایدار افزایش کارایی ساختمان‌ها و بهره‌وری سایت‌های ساختمان‌هاست که مصرف‌کننده‌ی انرژی، آب و مصالح هستند. ازاین‌رو، ساختمان سبز می‌تواند در طراحی هر نوع ساختمان، ازجمله خانه‌های مسکونی، مدارس، ساختمان‌های تجاری، فضاهای صنعتی، آزمایشگاه‌ها و بسیاری دیگر از کاربری‌های مربوط به صنعت ساختمان استفاده شود.

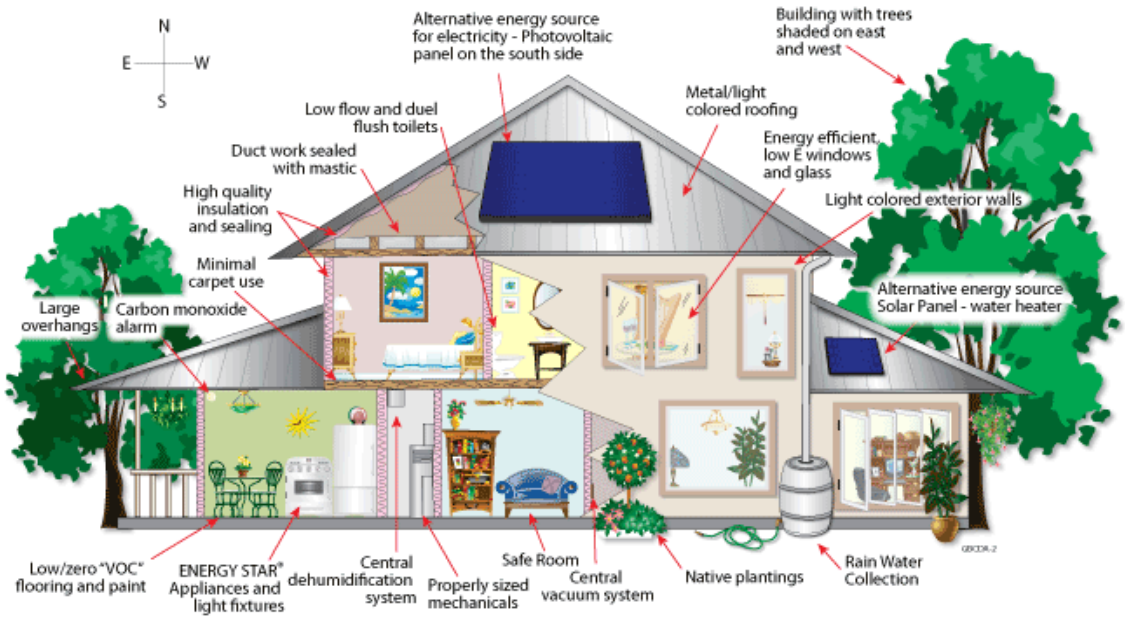
تمامی مطالب ذکرشده به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به یک مفهوم مشترک اشاره دارند و آن ارزیابی چرخه حیات[2] (LCA) است. کارکرد LCA تحقیق و ارزش‌گذاری اثرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی محصولات و یا خدمات است. درزمینه‌ی ساختمان سبز، LCA ارزش مصالح ساختمانی را در تمامی طول دوره حیات آن‌ها برآورد می‌کند و طیف گسترده‌ای از اثرات زیست‌محیطی (مطلوب و نامطلوب) آن‌ها را موردبررسی قرار می‌دهد. ازجمله این اثرات زیست‌محیطی

[1] Landscaping
[2] Life-Cycle Assessment

عبارت‌اند از: انرژی نهفته[1] مصالح؛ پسماند جامد تولیدشده در فرایند استخراج، استفاده و دفع آن مصالح؛ آلودگی هوا و آلودگی آب مرتبط با آن مصالح؛ و پتانسیل زمین‌گرمایی[2] آن مصالح. LCA یک ابزار بسیار مهم است، زیرا می‌تواند سبز بودن مصالحی که در ساختمان سبز استفاده شده است را نشان دهد[۱،۷،۸].

۳-۲-۲- شکل شماتیک یک ساختمان سبز

با توجه به مطالب گفته‌شده در خصوص ساختمان سبز، یک شکل شماتیک از ساختمان سبز که در شکل ۲-۱ نشان داده شده، به فهم بهتر مفهوم ساختمان سبز کمک می‌کند[۹].



شکل ۲-۱: شکل شماتیک یک ساختمان سبز[۵]

همان‌طور که در شکل ۲-۱ ملاحظه می‌شود، ساختمان سبز دارای ویژگی‌هایی است که می‌توان این ویژگی‌ها را در پنج اعتبار کلّی دسته‌بندی کرد. در بخش ۲-۴ به بیان این ویژگی‌ها و توضیح در رابطه با هریک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

[1] Embodied Energy
[2] Global-Warming

۳-۲- سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ساختمان سبز

ساختمان‌ها در طول ساخت، نوسازی، اشغال، تغییر کاربری و تخریب به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارند. در طی فرایندهای ساختمانی مقدار زیادی آب، انرژی، و مصالح خام هدر می‌رود و باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند کربن‌دی‌اکسید، متان و اُزُن می‌شود[۱۰]. صنعت ساختمان در حدود ۴۰٪ از مصرف منابع، ۱۲٪ از مصرف آب شرب، ۵۵٪ از تولیدات چوب، ٪۴۵ تا ۶۰٪ از تولید زباله، ۴۰٪ از مصرف مواد خام و ۴۸٪ از گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به نقش مهمی که ساختمان‌ها در مصرف منابع و تأثیر بر محیط‌زیست ایفا می‌کنند، نظارت بر صنعت ساختمان به امری حیاتی تبدیل شده است. در دهه ۷۰ میلادی بحث‌هایی در مورد پایداری در ساختمان‌ها مطرح شد و سپس شورای صنعت ساختمان پایدار (SBIC)[1] در آمریکا در سال ۱۹۸۰ تأسیس شد، که تمرکز آن بر دستیابی به ساختمان‌هایی با کارآمدی انرژی و مصالح بود. تمامی روش‌های طراحی پایدار علاوه بر کاهش آسیب‌های وارد بر محیط‌زیست سعی بر این دارند تا محیطی سالم و خوشایند برای مصرف‌کنندگان فراهم کنند. با جهانی‌شدن موضوع پایداری و گرایش به ساختمان سبز در دنیا، نیاز بود تا معیاری برای سنجش ساختمان‌های سبز وجود داشته باشد. علاوه بر این تجربیات نشان می‌دادند که روش ساختی که در گام اول پروژه به کار گرفته می‌شود و نحوه ارزیابی ساختمان‌ها امری حیاتی است؛ بنابراین متصدیان بر آن شدند تا سیستم‌هایی برای ارزیابی، رتبه‌بندی و اعطای گواهی‌نامه به ساختمان‌ها ارائه دهند. امروزه در سراسر دنیا سیستم‌های مختلفی برای ارزیابی زیست‌محیطی ساختمان‌ها وجود دارند که این امکان را می‌دهند تا بدون دخالت دادن نظرات شخصی و با معیاری مشخص بتوان ساختمان‌های

[1] Sustainable Buildings Industry Council

موجود را با یکدیگر مقایسه کرد. گواهی‌نامه‌ها و سیستم‌های رتبه‌بندی به ما این امکان را می‌دهند که در بازار تعریفی برای ساختمان‌های سبز داشته باشیم و دریابیم که این ساختمان‌ها ازلحاظ عملکرد زیست‌محیطی چگونه‌اند؟ چه اندازه اجزا و مصالح سبز در آن‌ها به‌کار رفته است؟ چه روش‌ها و شیوه‌هایی برای کارایی آب و انرژی در آن‌ها به‌کار گرفته شده است؟ و بسیاری موارد دیگر[۷،۱۰،۱۱،۱۲].

۱-۳-۲- ارزیابی ساختمان سبز

نحوه‌ی ارزیابی ساختمان‌ها، با توجه به شرایط منطقه می‌تواند متفاوت باشد. عوامل مختلفی بر اولویت‌های ارزیابی ساختمان‌ها مؤثر هستند. یکی از این عوامل منطقه‌ی ساخت است. به‌عنوان‌مثال ممکن است اثرات زیست‌محیطی یک ساختمان در اروپای شمالی که منطقه‌ای سرسبز و دارای آب‌وهوای معتدل است، با اثرات زیست‌محیطی یک ساختمان در شبه‌جزیره‌ی عربستان که منطقه‌ای بیابانی و دارای آب‌وهوای گرم و خشک است، متفاوت باشد؛ بنابراین معیارهای ارزیابی ساختمان‌ها در این دو منطقه با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند. عامل دیگر مؤثر بر اولویت‌های ارزیابی ساختمان‌ها، نوع ساختمان است. به‌عنوان‌مثال نمی‌توان انتظار داشت که در ارزیابی یک مدرسه و یک انبار، اولویت‌ها یکسان باشند. بدون شک در یک مدرسه موضوعات مربوط به کیفیت هوای فضای داخلی از اهمیت بیشتری برخوردار است[۱،۲]. از طرفی دیگر امروزه جهان به‌طورجدی با کمبود سوخت‌های فسیلی روبه‌رو است؛ بنابراین، تقریباً در تمامی سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی، اولویت با موضوع «انرژی» است. این امر همچنین به‌منظور تشویق ساختمان‌سازان به استفاده از منابع پاک و دوستدار محیط‌زیست و استفاده از سوخت‌های جایگزین و تجدیدپذیر است[۱۱].

۲-۳-۲- ابزارهای ارزیابی زیست‌محیطی ساختمان‌ها

دو نوع ابزار ارزیابی ساختمان در دنیا وجود دارد: ابزارهای ارزیابی چرخه حیات (LCA) و ابزارهای بر پایه‌ی ضوابط (CBT)[1]

در روش LCA اثرات زیست‌محیطی تمامی تولیدات و فرایندها در طول عمرشان، از ابتدای حیات تا نابودی ارزیابی می‌شوند. به‌عنوان‌مثال برای ارزیابی چرخه حیات یک قطعه‌سنگ ساختمانی، باید انرژی مصرف‌شده برای این سنگ از ابتدای خلقت، سپس بهره‌برداری، حمل، فرایندهای انجام‌گرفته بر روی آن در کارخانه، حمل به محل کارگاه، نصب و استفاده و درنهایت تخریب و از بین رفتن آن موردبررسی قرار گیرد. بیشتر روش‌های ارزیابی زیست‌محیطی ساختمان‌ها که بر اساس LCA هستند، با هدف انتخاب نوع مصالح و طراحی ساختمان، منابع انرژی، مدیریت پسماند و گزینه‌های حمل‌ونقلی در طول فازهای طراحی پروژه مورداستفاده قرار می‌گیرند؛ اما دشواری استفاده از روش LCA از این واقعیت ناشی می‌شود که فرایند تولید یک محصول بسیار پیچیده است و طول عمر اجزا در یک ساختمان بسیار طولانی است، بنابراین فرایندهای ابتدایی چرخه‌ی حیات قابل‌بررسی است اما فرایندهای انتهایی به علت زمان‌بر بودن بر اساس حدس و گمان خواهند بود.

روش CBT مبتنی بر سیستمی است که در آن به پارامترهای مشخصی امتیاز تعلق می‌گیرد. مقدار این امتیاز وابسته به میزان تأثیر آن پارامتر بر محیط‌زیست است. به علّت پیچیدگی و زمان‌بر بودن روش LCA اکثر سیستم‌های ارزیابی ساختمان‌های سبز بر اساس روش CBT هستند. سیستم‌های ارزیابی و رتبه‌بندی زیست‌محیطی ساختمان‌ها که در دنیا بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرند، همگی بر اساس روش CBT هستند. این سیستم‌ها عبارت از BREEAM، LEED، CASBEE[2]، Green Building Tool و Green Glob هستند[۱].

[1] Criteria-based Tools
[2] Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency

۳-۳-۲- سیستم ارزیابی و رتبه‌بندی لیید (LEED™)

اولین نسخه سیستم ارزیابی و رتبه‌بندی LEED v.1 توسط انجمن ساختمان سبز امریکا (USGBC) در سال ۱۹۹۸ منتشر شد. نسخه‌ی دوم آن در سال ۲۰۰۰ و نسخه‌ی سوم آن در سال ۲۰۰۹ انتشار یافت. آخرین نسخه‌ی موجود که نسخه چهارم است، در اکتبر ۲۰۱۴ به بازار عرضه شد که کامل‌ترین و به‌روزترین نسخه است. در ادامه توضیحاتی در مورد نحوه‌ی ارزیابی ساختمان‌ها بر اساس LEED v.4 ارائه می‌شود.

در سیستم LEED v.4 پنج نوع گواهی‌نامه برای انواع ساختمان وجود دارد، که عبارت‌اند از:

- BD+C (Building Design & Construction):
مربوط به ساختمان‌های تازه‌ساخت است و یا بازسازی اساسی در آن‌ها صورت گرفته است.

- ID+C (Interior Design & Construction):
مربوط به پروژه‌هایی است که در آن‌ها قصد دارند تغییرات کامل در دکوراسیون داخلی اعمال کنند.

- O+M (Building Operations & Maintenance):
مربوط به ساختمان‌های موجود که قصد دارند با اعمال تغییراتی ساختمان خود را بهبود بخشند.

- ND (Neighbourhood Design):
مربوط به پروژه‌هایی است که در یک زمین جدید شروع به ساخت کرده‌اند و یا پروژه‌هایی که با هدف توسعه‌ی مجدد زمین‌های دست‌خورده، آغاز به کار کرده‌اند.

- Homes:
مربوط به ساختمان‌های مسکونی تک خانوار، ساختمان‌های چند خانوار (یک تا سه طبقه) و ساختمان‌های چند خانوار بیشتر از سه طبقه (چهار تا شش طبقه)

هر یک از گواهی‌نامه‌های ذکرشده، زیرمجموعه‌هایی را شامل می‌شوند که در جدول ۲-۲ به آن‌ها اشاره می‌شود. در سیستم رتبه‌بندی LEED v.4 هفت معیار اصلی برای امتیازدهی وجود دارد که با توجه به نوع گواهی‌نامه، به هر معیار امتیازی تعلق می‌گیرد که راهنمای کامل LEED در بازار موجود

است. در این‌جا به‌عنوان نمونه معیارهای موردنیاز برای دریافت گواهی‌نامه BD+C (ساختمان‌های نوساخت یا بازسازی‌شده) و امتیازهایی که به هر یک تعلق می‌گیرد در جدول ۲-۳ آورده شده است[۱۳].

جدول ۲-۲: زیرمجموعه‌های گواهی‌نامه‌ها در سیستم LEED v.4 [۱۳]

زیرمجموعه‌ها	انواع گواهی‌نامه
۱- ساختمان‌های نوساخت ۲- خرده‌فروشی‌ها ۳- انبارها و مراکز پخش ۴- مراکز تهیه و تولید ۵- هسته و پوسته[1] ۶- مدارس ۷- مراکز اطلاعاتی ۸- مراکز درمانی	BD+C
۱- داخل مراکز تجاری ۲- خرده‌فروشی‌ها ۳- مراکز تهیه و توزیع	ID+C
۱- بهره‌برداری و نگهداری از ساختمان‌های موجود ۲- تهیه و تولید ۳- مراکز اطلاعاتی ۴- مدارس ۵- خرده‌فروشی‌ها ۶- انبارها و مراکز پخش	O+M
۱- برنامه‌ی توسعه‌ی منطقه‌ای ۲- توسعه‌ی منطقه	ND
۱- خانه‌ها ۲- خانه‌های چندطبقه با تعداد طبقات متوسط	Homes

[1] Core & Shell

جدول ۲-۳- معیارهای دریافت گواهی‌نامه BD+C و امتیازبندی آن‌ها[۱۳]

ردیف	معیار امتیازدهی	امتیاز قابل کسب
۱	موقعیت مکانی و وسایل حمل‌ونقلی	۱۶
۲	سایت پایدار	۱۰
۳	انرژی و اتمسفر	۳۳
۴	کارآمدی آب	۱۱
۵	مصالح و منابع	۱۳
۶	کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی	۱۶
۷	نوآوری	۶
۸	ارجحیت‌های منطقه‌ای	۴
مجموع	-	**۱۱۰**

در LEED سطوح مختلفی شامل تأییدشده، نقره‌ای، طلایی و پلاتینیم مطابق با شکل ۲-۲ برای اعطای گواهی‌نامه وجود دارد؛ به‌طوری‌که با توجه به امتیازی که یک ساختمان به دست آورده است، یکی از گواهی‌نامه‌ها را دریافت می‌کند[۱۳].

شکل ۲-۲: نحوه دریافت گواهی‌نامه بر اساس امتیاز کسب‌شده[۱۳]

۲-۴- ویژگی‌های ساختمان سبز

پیش‌تر در مورد سیستم رتبه‌بندی ساختمان‌های سبز (LEED) توضیحاتی ارائه شد. انجمن ساختمان سبز ایالات‌متحده (USGBC) گواهی‌نامه‌هایی برای ساختمان‌های سبز در نظر گرفت تا هم

سبز بودن ساختمان‌ها تأیید شود، هم پیمانکاران تشویق شوند ساختمان‌های سبز بیشتری بسازند؛ زیرا برخی تسهیلات دولتی مانند تخفیف‌های مالیاتی نیز شامل ساختمان‌های سبز می‌شود.

تمرکز اصلی این گواهی‌نامه به پنج اصل در ساختمان سبز است:

- سایت پایدار (SS)[1]
- انرژی و اتمسفر (EA)[2]
- کارآمدی آب (WE)[3]
- مصالح و منابع (MR)[4]
- کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ)[5]

تمام این پنج اصل به نحوی با هم مرتبط‌اند. برای مثال در سایت پایدار انتخاب محل مناسب برای ساخت ساختمان می‌تواند تأثیر زیادی در مصرف انرژی داشته باشد و یا انتخاب درست مصالح ساختمانی می‌تواند از برون‌رفت انرژی در ساختمان جلوگیری نماید[۱۲].

۱-۴-۲- سایت پایدار (SS)

در طول سال‌های اخیر، مطالعات نشان می‌دهد که مساحت زمین‌هایی که بر روی آن‌ها می‌توان ساخت‌وساز کرد در حال کاهش است؛ درحالی‌که جمعیت زمین رو به افزایش است. زمین یک منبع گران‌بهاست که باید در حفظ آن کوشا بود. چراکه این زمین ممکن است زیستگاه گونه‌های گیاهی و جانوری باشد که بقای انسان‌ها درنتیجه‌ی بقای آن‌هاست. درنتیجه در انتخاب محل احداث یک ساختمان باید مدیریتی صورت بگیرد که کمترین آسیب را به‌جای بگذارد.

[1] Sustainable Site
[2] Energy and Atmosphere
[3] Water Efficiency
[4] Materials and Resources
[5] Indoor Environmental Quality

سایت پایدار به سایتی اطلاق می‌شود که "کمترین اثرات زیست‌محیطی را بر منطقه به‌جای بگذارد"[۱]. انتخاب صحیح مکان احداث یک ساختمان، مهم‌ترین مرحله در اجرای ساختمان سبز است. اگر در همان ابتدای پروژه تصمیمات درستی در مورد سایت ساختمان گرفته شود، می‌تواند از بسیاری از اثرات مخرب زیست‌محیطی بکاهد و حتی در مواردی باعث کاهش مصرف انرژی و آب و بهبود کیفیت هوای داخلی شود. در مورد محل احداث ساختمان‌های سبز، می‌بایست خصوصیات زیست‌محیطی منطقه در نظر گرفته شود و تا حد امکان از زیان‌های احتمالی بر این خصوصیات کاسته شود. اهدافی که سایت پایدار دنبال می‌کند عبارت‌اند از محافظت از سایت‌های خاص و حساس، محافظت از زمین‌های بکر، استفاده مجدد از زمین‌های دست‌خورده، کاهش اثرات مخرب بر روی گیاهان و جانوران، بهبود ارتباط و دسترسی به جامعه، و کاهش اثرات حمل‌ونقل بر روی محیط‌زیست و همچنین بر مصرف انرژی و غیره[۱،۲].

۲-۴-۲- انرژی و اتمسفر (EA)

طبق آمار ارائه شده توسط وزارت انرژی ایالات‌متحده[1]، ساختمان‌ها به‌طور تقریبی ۹۰٪ انرژی و ۷۴٪ برق تولیدی در یک سال را به مصرف می‌رسانند. اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در هر گام از تولید نیروی برق که غالباً از سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی و زغال‌سنگ جهت حصول آن استفاده می‌شود، به چشم می‌خورند. این اثرات منفی تنها محدود به روند تولید نمی‌شوند. استخراج و حمل مواد اولیه، پالایش و پخش آن‌ها و درنهایت مصرف این مواد برای تولید برق خود مجموعه‌ای عظیمی از ناملایمات بر طبیعت را تحمیل می‌کند. برای مثال در استخراج زغال‌سنگ (سوخت متداول در تولید الکتریسیته) حفاری معادن، زیست‌بوم‌های طبیعیِ گیاهی و جانوری را مختل می‌کند و منظرهای طبیعت را از بین می‌برد. زه‌کش‌های اسیدی (آب زهکشی شده در معادن که حالت اسیدی یافته) اکوسیستم نواحی حاشیه معدن را به مخاطره می‌اندازد. شستشوی زغال‌سنگ به‌تنهایی میلیاردها گالن

[1] U. S. Department of Energy

آب را به لجن آلوده می‌کند که چاره‌ای جز تخلیه این آب در برکه‌ها و تالاب‌ها نیست. حفاری معدن نیز خود حرفه‌ای پرمخاطره ست که حوادث گوناگون جان کارگران معدن را تهدید می‌کند و تنفس گردوغبار تأثیر چشمگیری در کاهش سلامتی آنان دارد[۱۱].

انرژی و اتمسفر در ساختمان‌های سبز سه نوع فعالیت عمده را ترویج می‌دهد که به‌قرار زیر است:

۱- پیگیری عملکرد انرژی ساختمان- طراحی، راه‌اندازی، ارزیابی و نظارت

ساختمان‌های سبز باید به لحاظ عملکرد انرژی، از ساختمان‌های مرسوم و معمول بهتر عمل کنند. ابتدا باید ساختمان برای بیشترین و بهترین عملکرد طراحی شود. در مرحله دوم و پس از راه‌اندازی، سیستم‌های ساختمانی مانند تجهیزات گرمایشی بایستی تحت سنجش و نظارت متخصصان شروع به کار کنند تا این اطمینان حاصل گردد مقاصد طراحی به‌طور مطلوب محقق شده‌اند. درنهایت نیز پروسه‌ای برای تصدیق و تأیید عملکرد انرژی ساختمان در بلندمدت، تدوین و تعیین شود تا اطمینان از عملکرد مطلوب انرژی هم برای ساکنان و هم مالکان حاصل گردد.

۲- مدیریت خنک‌کننده‌ها، برای حذف CFCها

همان‌طور که می‌دانیم آزاد شدن کلروفلوئوروکربن‌ها یا همان CFCها از تجهیزات سرمایشی مثل یخچال‌ها، سبب تخریب لایه اُزُن شده است، حفاظی که ما را در برابر اشعه مخرب ماورای بنفش مصون نگاه می‌دارد. CFCها با تجمع در لایه استراتوسفر، محل قرارگیری لایه اُزُن، با جذب اشعه مادون‌قرمز گاز گلخانه‌ای بسیارقوی کلر را نیز ایجاد می‌کنند که بازهم به گرم شدن زمین مرتبط است. درنتیجه با وضع محدودیت‌هایی در استفاده از CFCها می‌توان از سرعت تخریب لایه اُزُن و تغییرات آب‌وهوایی کاست. در ساختمان‌های سبز نوساز باید تجهیزاتی به کار گرفته شود که از خنک‌کننده‌های با پایه مصرف CFC استفاده نکنند.

۳- استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر

ساختمان سبز می‌تواند به دو شیوه از انرژی‌های تجدیدپذیر بهره گیرد:

- استفاده از سیستم‌های انرژی تجدید پذیر در ساختمان (در سایت)
- خریداری برق سبز از شبکه‌های برق‌رسانی (خارج از سایت)

سیستم‌هایی مانند صفحات فتوولتاییک، توربین‌های بادی، سلول‌های سوخت هیدروژنی و ... انرژی سبز و پاک تولید می‌کنند. انرژی برق خارج از سایت نیز با عقد قرارداد با شرکت‌هایی که برق پاک تولید می‌کنند، در دسترس قرار می‌گیرد.

شش اقدام عمده مطرح‌شده در سیستم LEED در راستای دست‌یابی به یک ساختمان سبز و ایده آل، ازلحاظ مصرف انرژی به این قرار می‌باشند[۲]: ۱-راه‌اندازی و بررسی سیستم‌های انرژی ساختمان، ۲- عملکرد مطلوب و بهینه انرژی، ۳- مدیریت اصولی مبرّدها (سردسازها)، ۴- انرژی‌های تجدید پذیر در سایت، ۵- سنجش و بازبینی، ۶- برق سبز

۳-۴-۲- کارآمدی آب (WE)

بهترین تعریف برای کارآمدی آب "به دست آوردن یک نتیجه مطلوب یا ارائه یک خدمت (سطح سرویس) و یا انجام یک کار، وظیفه یا فرآیند، با کمترین میزان آب موردنیاز" است؛ به‌عبارت‌دیگر، کارآمدی آب نمایانگر رابطه میان مقدار آبی است که برای یک فرآیند یا منظور خاص موردنیاز است با مقدار آبی که عملاً برای همان فرآیند یا منظور استفاده می‌شود. نکته مهمی که باید در همین ابتدا به آن توجه شود این است که یک تفاوت واضح بین حفاظت آب[1] و کارآمدی آب وجود دارد، اگرچه این دو معمولاً به‌جای یکدیگر استفاده می‌شوند. حفاظت آب را می‌توان به‌عنوان شیوه‌های مدیریت آب در نظر گرفت که الگوی استفاده از منابع آب را به‌منظور سود رساندن به انسان و طبیعت اصلاح می‌کند؛

[1] Water Conservation

این اساساً به‌منزله کاهش سودمند در میزان مصرف آب و کاهش هدر رفت آن است؛ اما تأکید کارآمدی آب کاملاً بر روی کاهش تولید فاضلاب است، نه محدود کردن استفاده از منابع آن.

تدابیر کارآمدی آب به‌راحتی می‌تواند متوسط مصرف آب در ساختمان‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد. کارآمدی آب می‌تواند به طرق گوناگونی افزایش یابد؛ مثل تعمیر شیرهایی که چکه می‌کنند، دوش گرفتن‌های کوتاه به‌جای حمام‌های طولانی، نصب دستگاه‌های هدایت‌کننده فاضلاب در داخل مخازن توالت، نصب حس‌گرهای خودکار روی شیرهای آب برای کنترل جریان خروجی، استفاده از ماشین‌های ظرف‌شویی و لباسشویی با حداکثر ظرفیت ممکن. علاوه بر این اجرای لوله‌کشی‌های خاص مثل توالت‌های دارای آب‌شویه ۲ زمانه، به‌کارگیری شیرهای خودکار کم جریان، سردوش های خودکار کم جریان، از روش‌های دیگر برای کاهش تولید فاضلاب می‌باشند. استفاده از آب غیر شرب برای آبیاری محوطه اطراف و یا استفاده از سیستم‌های جمع‌آوری آب باران برای این منظور از دیگر روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب و در راستای کارآمدی آب هستند[۱،۲].

۴-۴-۲- مصالح و منابع (MR)

بنا بر اظهارات انجمن ساختمان سبز ایالات‌متحده (USGBC) انتخاب مصالح ساختمانی از میان گزینه‌های موجود در طراحی پایدار اهمیت دارد؛ چراکه شبکه گسترده‌ای از استخراج، پردازش و مراحل مختلف حمل‌ونقل موردنیاز را در برمی‌گیرد؛ علاوه بر این، فعالیت‌های موردنیاز برای تولید این مصالح ساختمانی پیامدهایی از قبیل امکان آلوده کردن هوا و آب، از بین بردن زیستگاه‌های طبیعی و اتمام منابع طبیعی را خواهند داشت. به همین جهت یکی از اعتبارات اصلی ساختمان سبز به مصالح و منابع سبز است. به‌کارگیری مصالح و محصولات سبز در یک پروژه در تضاد با کارایی یا زیبایی نیست و لزوماً هزینه بالاتری در پی نخواهد داشت.

مصالح ساختمانی سبز تعریف آسانی دارند. به‌طورکلی "مصالح ساختمانی زمانی «سبز» نامیده می‌شوند که با محیط‌زیست سازگار باشند". مصالح ایده آل ساختمانی هیچ‌گونه اثرات منفی

زیست‌محیطی نداشته و حتی ممکن است اثرات مثبتی هم بر هوا، زمین و تصفیه آب داشته باشند. مصالحی به‌عنوان مصالح کاملاً سبز وجود ندارند، اما در عمل تعداد فزاینده‌ای از مصالح وجود دارند که اثرات منفی آن‌ها بر انسان و محیط‌زیست کاهش‌یافته و یا حتی حذف شده است.

از میان ویژگی‌هایی که به‌طورمعمول مصالح ساختمانی سبز دارند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

پایایی و دوام؛ قابلیت بازیافت آسان؛ برداشت پایدار از منابع تجدید پذیر؛ قابلیت مصرف مجدد به‌منظور بازیابی، تازه‌سازی، بازسازی؛ ساخته‌شده از مواد زائد مانند حصیر (نی)، خاکستر بادی؛ بسته‌بندی حداقلی و یا جلد کردن با بسته‌بندی‌های قابل بازیافت؛ استخراج و پردازش‌شده به‌صورت محلی؛ انرژی کارآمد حین استفاده؛ مصرف انرژی کمتر طی مراحل استخراج، پردازش و حمل به محل کار؛ تولید انرژی تجدید پذیر؛ تولیدشده از طریق یک فرایند با آب کارآمد[۱،۲].

۵-۲- کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ)

هدف اصلی ساختمان‌ها فراهم کردن سلامتی و محیط راحت برای ساکنان است. محیط فضای داخلی از ترکیب عواملی نظیر محل، آب‌وهوا، سیستم ساختمان و ساکنان ساختمان نتیجه می‌شود[۳]. در اکثر قسمت‌های جهان، مردم بیش از ۹۰ درصد زمان روز خود را در فضاهای بسته سپری می‌کنند[۱،۳]. در تحقیقات دیگر عنوان شده که اکثریت مردم بین ۸۰ تا ۹۰ درصد زندگی خود را درون ساختمان‌ها مانند منازل مسکونی، ادارات، کارخانه‌ها، مدارس و دانشگاه‌ها سپری می‌کنند[۱۴،۱۵]. نحوه عملکرد ساختمان در رابطه با IEQ بر سلامتی، کارایی و تندرستی ساکنان ساختمان و همین‌طور بر هزینه‌های چرخه حیات و مصرف انرژی اثر می‌گذارد[۱،۴،۵]. حامیان ساختمان سبز و محققینی که در رابطه با IEQ تحقیق می‌کنند، اشاره به این نکته دارند که ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی، بزرگ‌ترین سهم را در هزینه‌های عملیاتی یک ساختمان دارند؛

درنتیجه IEQ بالا می‌تواند مزایا و منافع اقتصادی به همراه داشته باشد[۱۶،۱۷،۱۸]. آسایش و میزان راحتی در فضاهای داخلی، روشی برای اندازه‌گیری رضایت ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی است؛ که به‌نوبه خود می‌تواند به‌صورت مستقیم بر سلامتی و بهره‌وری ساکنان نیز تأثیرگذارد[۳]. تحقیقات نشان می‌دهد که بر اساس استاندارد اروپایی EN 15251 طراحی فضاهای داخلی بر مبنای دسته‌بندی زیست‌محیطی پایین‌تر، کاهش سطح عملکرد ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی را در پی خواهد داشت. در ساختمان‌های موجود و همچنین آینده، روند رو به افزایشی در جهت توجه به نحوه استفاده از انرژی و همچنین IEQ دیده می‌شود[۱۴]. این نکته در جهان پذیرفته شده است که IEQ باید بهبود یابد و آسایش بیشتری را برای ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی فراهم آورد؛ بدین منظور نیاز است که پارامترهای تأثیرگذار در این زمینه مورد ملاحظه قرار گیرند[۳]. در محیط‌های محدودشده، IEQ وابسته به عواملی است. این عوامل مؤثر را می‌توان به دو دسته‌ی شیمیایی و فیزیکی تقسیم کرد: عوامل شیمیایی نظیر اکسیدهای کربن (CO و CO_2)، دود تنباکو ناشی از استعمال دخانیات، فرمالدئیدها و ترکیبات آلی فرار (VOCs)[۶،۱۹]؛ و عوامل فیزیکی مانند نرخ تهویه مطبوع[1]، مرطوب‌سازی و دمای هوا[۶]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت رضایت ساکنان از محیط، به تعدادی از پارامترهای زیست‌محیطی بستگی دارد. چهار جزء اصلی یعنی آسایش دمایی، کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ)[2]، آسایش شنوایی و آسایش بصری به‌منظور تعیین IEQ قابل‌قبول، شناسایی شده است[۲۰،۲۱]. باوجود این‌که تعداد مطالعات در رابطه با IEQ رو به رشد است؛ مطالعات درزمینه‌ی IEQ در دانشگاه‌ها و همچنین ارزیابی آن و بررسی عملکرد یادگیری دانشجویان در فضاهای داخلی محیط‌های آموزشی دارای تهویه مطبوع هنوز بسیار اندک است[۲۱،۲۲].

[1] Air Conditioning
[2] Indoor Air Quality

۱-۵-۲- کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ) و عوامل مؤثر بر آن

سلامتی و میزان بهره‌وری و کارایی ساکنان یک ساختمان ارتباط تنگاتنگی با هوایی که تنفس می‌کنند دارد. مطالعات نشان می‌دهد که تهویه مطبوع در ساختمان باعث بهبود در سلامتی افراد می‌شود[۱]. IAQ ضعیف در ساختمان‌های با کاربری عمومی ممکن است سبب افزایش شیوع گونه‌های مختلفی از بیماری‌های انسانی شود[۲۳]. از طرفی مشخص شده است که IAQ ضعیف با سندرم ساختمان بیمار (SBS)[۱] مرتبط است[۴،۵]. تحقیقات دانشکده آمریکایی آلرژی[۲] نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد تمامی بیماری‌ها به دلیل آلودگی هوای فضاهای داخلی به وجود آمده و یا بدتر شده‌اند؛ علاوه بر این‌که موارد بیماری‌های مرتبط با ساختمان (BRI)[۳] درحال افزایش است[۱]. به‌عنوان‌مثال کیفیت هوای نامناسب در ساختمان‌های مدارس می‌تواند باعث ایجاد برخی مشکلات در سلامت دانش آموزان شود و همچنین بر روی یادگیری و راحتی کار و فعالیت آن‌ها تأثیر گذارد[۲۳]. تعداد شکایات و نارضایتی‌های مرتبط با رشد استفاده از مصالحی که منابع طبیعی را مصرف می‌کنند و افزایش استفاده از انرژی به‌منظور دستیابی به آسایش فضای داخلی، در سال‌های اخیر افزایش یافته است[۳]. در سال‌های اخیر بیماری‌هایی که در اثر قرارگیری افراد در هوا و فضای نامناسب به‌وجود می‌آید رو به افزایش بوده است، و در این میان کودکان و افراد سالخورده‌ای که بیماری‌های قلبی، گوارشی و تنفسی دارند بیشترین آسیب را متحمل شده‌اند[۱]. مطابق با اظهارات سازمان بهداشت جهانی (WHO)[۴] در آمریکا ۴۰ درصد از کل ساختمان‌ها خطرات قابل‌توجهی را برای سلامتی به وجود می‌آورند که دلیل آن آلودگی هوای فضاهای بسته و داخلی است. تحقیقات آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA)[۵] نشان می‌دهد که عدم کیفیت مناسب هوای محیط داخلی، منجر به

[1] Sick-building Syndrome
[2] American College of Allergies
[3] Building-related Illness
[4] World Health Organization
[5] U.S. Environmental Protection Agency

کاهش بازدهی افراد تا حدود ۱۸ درصد می‌شود. مطابق تحقیقات انجمن پزشکی آمریکا[1] در کشور آمریکا یک‌سوم از کل هزینه ملی صرف بیماری‌های مزمنی می‌شود که به‌طور مستقیم از آلودگی هوای فضاهای داخلی ناشی می‌شود[۲۴]. خوشبختانه طی ۲۰ سال گذشته پیشرفت‌ها و تحقیقات بسیاری جهت کاهش این بیماری‌ها و آسیب‌ها انجام‌شده است؛ به‌طوری‌که هم سازندگان ساختمان‌ها و هم ساکنان در تلاش‌اند تا هوای باکیفیت‌تری را در ساختمان‌ها به وجود آورند. عوامل مؤثر بر هوای داخلی عبارت‌اند از: عدم وجود نور کافی و روشنایی، رشد و تکثیر باکتری‌ها و کپک‌ها، و گازهای شیمیایی که از برخی از مصالح به‌کار رفته در ساختار ساختمان متصاعد می‌شوند. بهتر است که در انتخاب مصالح از موادی استفاده شود که گازهای کمتری متصاعد می‌کنند، تهویه مطبوع در تعداد مناسبی تعبیه شوند و طراحی سازه به‌گونه‌ای باشد که بیشترین مقدار نور خورشید بر آن تابیده شود[۱]. اثرات کوتاه‌مدت یا بلندمدت آلاینده‌های هوا بر سلامتی افراد عبارت از خارش و سوزش چشم‌ها، بینی و گلو؛ سردرد؛ سرگیجه؛ تهوع؛ خس‌خس در هنگام تنفس است. اثرات بلندمدت بیماری‌های قلبی؛ سرطان؛ مشکلات تنفسی و ریوی شدید است[۲۵]. در آلودگی هوای یک ساختمان و کاهش کیفیت هوای داخلی آن عوامل متعددی دخیل است و همین تعدد عوامل باعث شده است که راه‌های متفاوتی برای رفع هریک در نظر گرفته شود[۱]. عوامل آلودگی هوای فضاهای داخلی ترکیبی از فاکتورهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و همچنین تهویه مطبوع مناسب در محیط است[۲۶]. در ادامه به توصیف و توضیح هریک از آلاینده‌هایی که می‌توانند بر IAQ ساختمان تأثیر بگذارند پرداخته شده است.

۱-۱-۵-۲- آلاینده‌های معدنی

موادی مانند سرب، پنبه‌ی نسوز، آزبست و رادون ازجمله آلاینده‌هایی هستند که خطر بسیار زیادی برای سلامتی افراد دارند. به‌عنوان‌مثال پنبه‌ی نسوز به دلیل عایق بودن صدا و حرارت، عدم رسانایی و

[1] American Medical Association

مقاومت کششی بالا در صنعت کاربرد فراوانی دارد. عملیاتی مانند بریدن، سمباده کشی و فعالیت‌هایی ازاین‌دست که باعث آسیب دیدن بافت یک‌تکه‌ی این ماده می‌شود، مواد مضری را به هوا وارد می‌کند؛ که تنفس این ماده باعث ایجاد بیماری ازجمله سرطان ریه می‌شود. میزان خطری که این ماده می‌تواند ایجاد کند به ترکیبات شیمیایی به‌کار رفته در آن بستگی دارد. لازم‌به‌ذکر است که اگر این ماده در مکان مناسب و به‌دوراز حرارت و یا بریدگی قرار گیرد، خطر چندانی برای انسان ندارد[۱].

۲-۱-۵-۲- آلاینده‌های آلی

امروزه مواد آلی طبیعی و مصنوعی را تقریباً می‌توان در همه‌جا ازجمله زمین، گیاهان، آب‌های زیرزمینی و غیره یافت. این مواد می‌توانند از طرق مختلف نفوذ یابند؛ ازجمله نشست تصادفی مخازن، حشره‌کش‌ها، و یا کودهای شیمیایی. ترکیبات آلی شامل ترکیبات آلی فرار (VOCs)[1]، بسیار فرار، ترکیبات آلی جامد و نیمه جامد و آلدئیدها می‌باشند. این مواد از راه‌ها و منابع گوناگونی وارد هوای داخلی ساختمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ازجمله‌ی این منابع می‌توان به مصالح بنّایی، مبلمان، رنگ‌ها، حلّال‌ها، خوشبوکننده‌های هوا، پاک‌کننده‌های شیمیایی، مواد نگه‌دارنده و غیره اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهد که غلظت ترکیبات آلی فرار در محیط‌های داخلی بسیار بیشتر از محیط‌های بیرونی است، ولی نکته‌ی مثبت این ترکیبات کاهش و یا حذف آن‌ها با گذشت زمان است. استنشاق این مواد در بعضی مواقع بر روی سیستم مرکزی اعصاب تأثیر می‌گذارد و عوارضی همچون التهاب گلو، بینی، چشم، کاهش قدرت تمرکز، بروز افسردگی، سردرد و ازدست‌دادن هماهنگی، تهوع، صدمه به کبد، کلیه‌ها، و سیستم عصبی مرکزی را در پی‌دارند. حتی در بسیاری از متون پزشکی از این مواد به‌عنوان مواد سرطان‌زا نام برده شده است[۱].

[1] Volatile Organic Compounds

۳-۱-۵-۲- آلاینده‌های ناشی از احتراق

نمونه‌هایی از این آلاینده‌ها کربن‌مونواکسید (CO)، کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_X) و دود ناشی از سوختن تنباکو است. این مواد بیشتر از سوختن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود و در حین سوختن حجم بسیار زیادی از آلاینده‌ها را وارد هوا می‌کنند.

گاز کربن‌دی‌اکسید (CO_2) گازی بی‌بو، بی‌رنگ، غلیظ و غیرقابل اشتعال است که از گذشته در اثر بازدم انسان‌ها و موجودات در جو وجود داشته و مداوم مقدار آن دستخوش تغییرات شده است. این گاز به‌طورمعمول از سوزاندن بنزین، روغن، نفت سفید، گاز طبیعی، چوب، زغال‌سنگ، کک و غیره حاصل می‌شود. همچنین طی فرآیند تخمیر کربوهیدرات‌ها و یا واکنش اسید با سنگ‌آهک و یا سایر کربوهیدرات‌ها به‌دست می‌آید. CO_2 به‌صورت طبیعی توسط گیاهان برای انجام واکنش‌های سنتزی جذب می‌شود. اگرچه خود این گاز به‌خودی‌خود مشکلی برای سیستم ایمنی افراد ایجاد نمی‌کند؛ اما در صورت عدم وجود تهویه مطبوع مناسب، تجمع CO_2 می‌تواند مشکلاتی را برای سلامتی ساکنان ایجاد کنند. در صنایع از این گاز به‌صورت جامد و تحت عنوان یخ خشک، در نوشابه‌های گازدار و خاموش‌کننده‌های آتش استفاده می‌شود[۱]. تحقیقات نشان می‌دهد غلظت آلاینده CO_2 در فضای داخلی، بر عملکرد انسان و میزان بهره‌وری تأثیر مستقیم دارد. در مطالعه‌ای در مورد آلاینده CO_2، نتایج نشان داده که در اگر مقدار این آلاینده در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ قرار گیرد، هوا آلوده محسوب می‌شود[۱۴].

گاز کربن‌مونواکسید (CO) گاز دیگری است که در اثر سوختن ناقص سوخت‌های فسیلی، چوب، زغال‌سنگ، نفت سفید، پلاستیک، پارچه و غیره تولید می‌شوند. این گازها نیز بی‌بو، بی‌رنگ و سبک‌تر از هوا است. در محیط‌های بسته‌ای که این گاز تولید می‌شود، احتمال خفگی و مسمومیت بسیار زیاد است. در مواردی که سطح غلظت این گاز کم باشد باعث ایجاد خستگی و تنگی نفس در هنگام فعالیت، برافروختگی، قرمزی پوست در پیشانی و کل صورت و نقص حرکتی می‌شود. کسانی که به

بیماری‌های قلبی دچار هستند بیشتر در قفسه‌ی سینه احساس درد می‌کنند. افراد مسن، کودکان، و زنان باردار ازجمله قربانیان اصلی CO هستند. به‌طورکّلی بارزترین علامت مسمومیت با این گاز سردرد شدید و حالت تهوع است. با توجه به این‌که CO بی‌بو و بی‌طعم است، کسانی که در معرض آن هستند، خیلی دیر متوجه مسمومیت می‌شوند و حتی در برخی از موارد منجر به مرگ می‌شود. لازم به ذکر است که به همین دلیل مرگ با این گاز به مرگ خاموش موسوم شده است.

نیتروژن‌دی‌اکسید (NO_2) گازی بی‌بو، و بی‌رنگ است که در صورت داشتن غلظت بالا غشای مخاطی چشم، گلو و بینی را مورد هجوم قرار می‌دهد. NO_2 نیز به‌عنوان یک آلاینده هوا نگرانی عمده‌ای ایجاد می‌کند، چراکه به تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی کمک می‌کند و تأثیرات قابل‌توجهی بر سلامت انسان می‌گذارد. تحقیقات حاکی از این است که قرارگیری درازمدت در مجاورت این گاز مشکلات تنفسی را به‌وجود می‌آورد. به دلیل این‌که NO_2 در بافت‌های متحرک بهتر حل شده و باقی می‌ماند از طریق تنفس در ریه‌ها قرار می‌گیرد، عفونت‌های ریوی را به‌وجود آورده و سپس استخوان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. می‌بایست تا حد امکان از قرارگیری کودکان، افراد مبتلا به بیماری‌های تنفسی و سالمندان در معرض این گاز جلوگیری کرد[۱].

۴-۱-۵-۲- آلاینده‌های بیولوژیکی

آلودگی‌های بیولوژیکی شامل قارچ‌ها، کپک‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها، و همین‌طور انگل‌ها، گرده‌ها، جوندگان، حشرات و سایر حیوانات حساسیت‌زا است. قارچ‌ها و کپک‌ها به‌طور طبیعی بخشی از طبیعت هستند و در بیشتر محیط‌ها حضور دارند؛ با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند مگر با تکثیر شدن. برای ایجاد کپک و قارچ و یا تکثیر آن‌ها، وجود چهار عنصر هاگ‌های زیست‌پذیر[1]، منبع تغذیه مانند مواد آلی (محصولات چوبی، فرش و تیغه)، رطوبت و گرما الزامی است. وجود هریک از این عوامل به‌تنهایی نمی‌تواند به رشد و تکثیر آن‌ها کمکی کند. برای این منظور هوایی مناسب است که دارای رطوبت

[1] Viable Spores

نسبی (RH)[1] ۸۰ درصدی یا بیشتر باشد. وجود جریان هوا باعث می‌شود تا رطوبت به تمام سطوح و حفره‌های ساختمان برسد. کلید اصلی جهت کنترل این موجودات، کنترل رطوبت هوای داخلی سازه است. چنین آلاینده‌هایی که منشأ زیستی دارند از طریق تنفس وارد بدن ساکنان شده و باعث ایجاد بیماری‌های عفونی می‌گردد. این موجودات به‌خصوص در افرادی که دچار ضعف سیستم ایمنی هستند با شدت بیشتری و در قالب آسم و یا عود کردن حساسیت‌ها ظهور می‌کند. میزان رطوبت، دمای هوای داخل ساختمان و عدم وجود نور کافی ازجمله رشد و تکثیر این موجودات است که با کنترل این عوامل می‌توان از رشد آن‌ها جلوگیری کرد[۱].

۵-۱-۵-۲- سایر آلاینده‌های هوا

سایر آلاینده‌هایی که می‌توانند بر کیفیت هوای فضاهای داخلی اثرگذار باشند، شامل ذرات معلق در هوا (PM_{10}،$PM_{2.5}$،PM_1)، اُزُن (O_3)، دود سیگار، پسماند آفت‌کش‌ها و فایبرگلاس‌ها می‌باشند[۱].

۲-۵-۲- آسایش دمایی و دمای مطلوب

تحقیقات نشان می‌دهد که درجه‌ی هوا بر میزان احساس رضایتی که ساکنان و افراد حاضر در یک محیط دارند تأثیر بسیار زیادی دارد[۱]. همچنین احساس شرایط دمایی بر بهبود عملکرد آن‌ها تأثیر دارد؛ به‌طوری‌که احساس هوای خیلی سرد یا خیلی گرم تأثیر منفی بر سطح عملکرد دارد[۱۴]. تعیین درجه حرارت مطلوب به عوامل زیادی مانند فرهنگ، منطقه، سطح فعالیت افراد و پوشش آن‌ها مربوط می‌شود. حتی افرادی که در یک خانواده رشد کرده‌اند، در دماهای متفاوتی احساس راحتی می‌کنند؛ اما موضوع مشترکی که وجود دارد این است که هوای خیلی سرد و یا خیلی گرم برای همه‌ی افراد تحمل‌ناپذیر است. پس می‌توان با در نظر گرفتن مجموع عوامل، یک محدوده‌ی دمایی مناسب تعریف کرد که افراد علاوه بر احساس رضایت و راحتی عملکرد مناسبی داشته باشند[۱]. بر اساس ادراک ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی، مؤثرترین پارامتری که تمامی محققین بدان

[1] Relative Humidity

اشاره کرده‌اند، پارامتر دمای هوا است. ازاین‌رو برای بهبود IEQ می‌باید توجه دقیقی به آسایش دمایی در محیط‌های داخلی شود. به‌عنوان‌مثال طراحی‌های بحرانی مرتبط با جنبه‌های مختلف ساختمان، جهت‌گیری مناسب ساختمان، عایق‌بندی دمایی، انتخاب درست پنجره‌ها و نوع شیشه‌ها، هم منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هم فراهم آمدن آسایش دمایی برای ساکنان و درنتیجه آن افزایش بهره‌وری آن‌ها می‌شود[۳].

۳-۵-۲- آسایش صوتی و میزان صدا

آلودگی صوتی نوعی از آلودگی‌های انرژیتیکی است که باعث حواس‌پرتی، عصبی‌شدن و ایجاد صداهای متفرقه در گوش می‌شوند. آلودگی صوتی به‌صورت تغییرات صدای پیرامون که شنوایی انسان را دچار اختلال می‌کند تعریف می‌شود. صداها و لرزش‌ها از منابعی مانند سیستم‌های تهویه مطبوع، مکنده‌های هوا، پمپ‌ها و حتی بالگردها ایجاد می‌شوند و می‌توانند باعث تشنج در افراد حساس به صدا شوند. وجود صدا باعث کاهش تمرکز در افراد می‌شود. به‌عنوان‌مثال کودکانی که در مدارس واقع در مناطق پرسروصدا مشغول به تحصیل هستند دچار عدم یادگیری و اختلالات آموزشی می‌شوند؛ یا حتی کارگرانی که در وضع مشابهی کار می‌کنند به دلیل صدای زیاد در حین کار دچار مشکلات جدی می‌شوند. آلودگی صوتی با عواملی مانند صدای ناشی از وسایل نقلیه، ساخت‌وسازهایی که در مناطق مسکونی صورت می‌گیرد، صدایی که در اثر کار کردن تجهیزات صنایع ایجاد می‌شود و صدای ناشی از فعالیت‌های روزانه تشدید می‌شود. جهت کاهش این آلودگی می‌توان مسافت بین مراکز صنعتی و مسکونی را افزایش داد، منابع تولید صدا را طوری تنظیم کرد که صدای کمتری تولید کنند، و یا بین محل تولید صدا و مناطق مسکونی مسدودکننده‌ی صدا نصب کرد و حتی می‌توان در دیوارها و پنجره‌ها از عایق‌های صوتی استفاده کرد[۱].

۴-۵-۲- روشنایی و نور دریافتی از خورشید طی روز[1] و عوامل مؤثر بر آن

سال‌هاست که نور خورشید اصلی‌ترین منبع تأمین نور و حرارت برای موجودات روی کره‌ی زمین است. در حال حاضر به دلیل افزایش دمای زمین و گرمایش آن تمام طراحی‌ها به سمت استفاده‌ی هرچه‌بهتر و بیشتر از منابع طبیعی است که نور خورشید یکی از آن‌ها است. نور دریافتی از خورشید را می‌توان به‌صورت نوری که در طی روز از خورشید دریافت می‌شود و فعالیت انسان‌ها را ممکن می‌کند؛ تعریف کرد. هنگامی‌که نور به جسمی می‌تابد بخشی از آن از سطح جسم بازتاب می‌کند. بازتاب نور خورشید از زمین چیزی بین ۰/۲ تا ۲۰ درصد است. این موضوع بیان می‌کند که علاوه بر میزان نور تابیده‌شده، عواملی مانند پنجره‌های سقفی و نورگیرها در میزان نور منعکس‌شده از سقف منازل که معمولاً هم بسیار زیاد است، تأثیرگذار است. پنجره‌های سقفی عملکرد بسیار مثبتی در این موضوع دارند. تحقیقات نشان می‌دهد در سازه‌هایی که شرایط کاملاً یکسان دارند تمایل به خرید منزل با پنجره‌ی سقفی ۴۰ درصد بیشتر است. در حال حاضر معماران برآن‌اند که با ساخت منازل دارای این پنجره‌ها و به‌کارگیری شیشه‌هایی که تنها به قسمت نور مرئی اجازه‌ی ورود می‌دهد، جلوه‌ی ویژه به محیط داخلی سازه دهند. این رویکرد، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و در سلامتی افراد هم بسیار مؤثر است. برای اجرای این طرح می‌توان ایده‌هایی نظیر پنجره‌هایی که در بام تعبیه می‌شوند، نورگیرها و غیره را به‌کار برد. برای بهره‌وری هرچه بیشتر این نور می‌بایستی سایه‌هایی که در طول روز در محیط داخلی ایجاد می‌شوند را در طراحی مدنظر قرارداد[۱]. طراحی‌های بحرانی مرتبط با جنبه‌های مختلف ساختمان، جهت‌گیری مناسب ساختمان، استفاده مؤثر از نور خورشید طی روز و فنّاوری‌های نوین در این زمینه، انتخاب مناسب پنجره‌ها و نوع شیشه‌ها، همگی از مواردی است که به صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک می‌کند؛ از طرفی هم روند دستیابی به IEQ را افزایش داده و همچنین تأمین آسایش بصری و بهره‌وری ساکنان را بهبود می‌بخشد[۳].

[1] Daylighting

۵-۵-۲- چشم‌انداز فضای داخلی

طی تحقیقاتی که صورت گرفته است، نتایجی مبنی بر این‌که وجود تعداد کافی پنجره و دسترسی ساکنان به محیط خارج از محیط کار و منازل باعث می‌شود که علاوه بر تأمین نور کافی کارگران و ساکنان احساس بهتری داشته باشند، گزارش شده است. علاوه بر این، سلامت آن‌ها در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد و درنتیجه بهره‌وری و ساعت کاری کارگران افزایش و میزان غیبت آن‌ها کاهش می‌یابد. این درحالی‌است که در صورت عدم وجود دسترسی به محیط بیرونی ساختمان کارگران و کارمندان بیشتر به صحبت کردن با یکدیگر و تلفن همراه مبادرت می‌ورزند[۱].

۶-۵-۲- سیستم تهویه مطبوع و فیلتراسیون

ممکن است که در نگاه اول به نظر رسد که افزایش تعداد سیستم‌های تهویه مطبوع در یک سازه باعث افزایش میزان مصرف انرژی می‌گردد؛ ولی خود این افزایش انرژی را می‌توان با استفاده‌ی مجدد از گرمای فن[1]ها و یا رویکردهای اقتصادی جبران کرد. علاوه بر این‌ها می‌توان با در نظرگیری شرایط جوی منطقه در طراحی، این انرژی‌ها را به کمترین مقدار رساند. به‌غیراز سیستم‌های تهویه مطبوع، می‌توان از فیلترهای هوا هم جهت افزایش کیفیت هوای فضای داخلی سازه استفاده کرد. این فیلترها با حذف عواملی که باعث بیماری، خستگی و یا به‌طورکلی احساس نارضایتی در افراد می‌شود؛ هوای تازه را وارد محیط کند. در حال حاضر انواع مختلفی از این فیلترها تحت عنوان فیلترهای مکانیکی، فیلترهای برقی، فیلترهای متصل شونده و غیره به فروش می‌رسد. پاک‌کننده‌های هوا هم می‌توانند مفید واقع شوند؛ ولی میزان این مفید بودن به میزان آلاینده‌های هوا و پایداری آن‌ها و مقاومتشان در برابر این مواد پاک‌کننده بستگی دارد[۱].

[1] Fan

۲-۵-۷- اثرگذاری مصالح ساختمانی پس از اتمام سازه بر هوای فضای داخلی

مطالعات نشان می‌دهد که مصالح به‌کار رفته در سازه می‌توانند در کیفیت هوای فضای داخلی، اثرگذار باشند. حتی در بعضی مواقع برخی از مواد به‌عنوان منبع آلاینده‌ی داخلی شناخته می‌شود. به همین دلیل، طراحان و کاربران به دنبال استفاده از مصالح کم‌خطرتر هستند؛ تا هم هزینه‌ی ناشی از تهویه مطبوع را کاهش دهند و هم سطح سلامتی ساکنان را ارتقاء بخشند[۱].

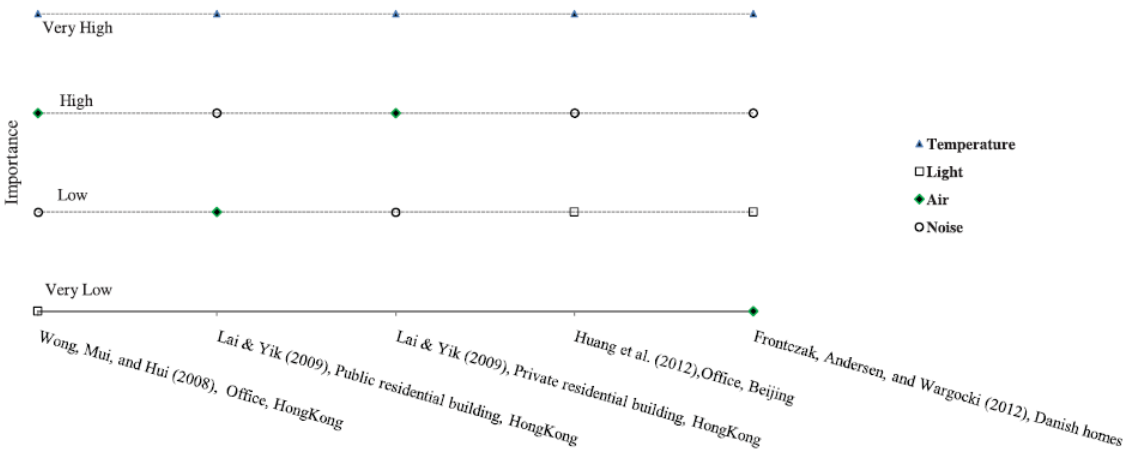
۲-۶- معرفی مدل‌های ارزیابی IEQ

به‌منظور دستیابی به آسایش در یک محیط داخلی، اندازه‌گیری و ارزیابی پارامترهایی نظیر کیفیت هوای فضای داخلی (IAQ)، دمای هوا، چشم‌انداز بصری و میزان صدا لازم و مهم است؛ همچنین اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و همچنین ارزیابی از طریق پرسشنامه، روش مؤثری به‌منظور آنالیز کلّی IEQ و شرایط موجود در ساختمان است[۳]. ازاین‌رو مدل‌های ارزیابی IEQ نیازمند جمع‌آوری داده‌هایی است؛ تا درنتیجه‌ی آن تصویر مختصری از نحوه‌ی عملکرد یک فضا یا ساختمان تهیه شود. این سنجش مختصر می‌تواند به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های کمّی پارامترهای فیزیکی (مانند دمای هوا، میزان صدا، روشنایی و غیره) و یا ارزیابی نظرات کیفی ساکنان (مانند طرح پرسش "تا چه حد از میزان صدا در محل کار خود رضایت دارید" و غیره) و یا هردوی این‌ها به‌صورت هم‌زمان تکمیل شود[۲۷].

در شکل ۲-۳ خلاصه‌ای از پارامترها، استانداردها، نحوه برداشت داده‌های کمّی و کیفی و همچنین روش‌های ارزیابی که در مطالعات مختلف استفاده شده، ارائه شده است. بر اساس اهمیت درک‌شده از پارامترهای IEQ، در شکل ۲-۴ پارامترهای دما، نور، کیفیت هوا و سروصدا، ازنظر مطالعات مختلف انجام‌شده در این زمینه، اولویت‌بندی شده است[۳].

Parameters	Temperature, Visual, Acoustic **and** Air Quality		Amount **of** Space, Visual Privacy, Adjustability **of** Furniture, Colours, Textures, **and** Workspace Cleanliness, Ease **of** Interaction, Comfort **of** Furnishing, Building Cleanliness **and** Building Maintenance.		
Standards	**China**	**European**	**ASHRAE**	**ISO**	**Other**
	GB 50019-2003, GB/T 5699-2008, GB/T 5700-85, GB 50034-2004, GB/T 50033-2001, GB 50325-2001 and GB/T 18883-2002, GBJ 118-1988, GBJ 87-1985, **and** GBJ 122-1988	EN15251 (2007)	ASHRAE 55 (2004) ASHRAE 62 (1984), ASHRAE (1989), ASHRAE Handbook (2005)	ISO7730 (1984), ISO/TR3352(1974), ISO/DIS 28802(2009)	SP: 41 (1987)
Data Acquisition	**Questionnaire**		**Physical Measurement**		
	• Online • Personal		• Controlled Environment • Field Survey		
Data Assessment	**Mathematical Method**		**Software**		
	• Spearman Rank Correlation Coefficient Method • Analytical Hierarchy Process • Multi-variate Logistic Regression • Least Square Method • Analysis **of** Variance (*ANOVA*)		• SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) • Statistical Software R • EQS (*Structural Equation Modeling Software*)		
Energy Assessment	**Software**				
	• DeST-Thermal, Daylighting Simulation and Energy Analysis • Trnsys- Thermal Simulation • RADIANCE-Lighting Simulation • ADELINE- Lighting Simulation and Energy Analysis • Dialux- Lighting Simulation and Energy Analysis				

شکل ۲-۳: خلاصه‌ای از پارامترها، استانداردها، نحوه برداشت داده و روش‌های ارزیابی IEQ[۳]



شکل ۲-۴: اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر IEQ مطابق با مطالعات مختلف انجام‌شده[۳]

چیانگ[1] و همکاران (۲۰۰۱) مدلی را به‌منظور ارزیابی IEQ ارائه دادند. در این روش اصول اندازه‌گیری کمّی و سنجش کیفی پارامترهای موردمطالعه، نحوه ارتباط بین داده‌های کمّی و کیفی و همچنین کلاس‌های ارزیابی IEQ آمده است[۲۸]. مشخصات این مدل ارزیابی IEQ در جدول ۲-۴ آورده شده است[۲۷]. در جدول ۲-۵ کلاس‌های ارزیابی و محدوده‌های مجاز برای پارامترهای

[1] Chiang

موردمطالعه، برای هریک از این کلاس‌ها، مطابق با مدل مطرح‌شده در جدول ۲-۴ آورده شده است[۲۷].

جدول ۲-۴: مشخصات مدل چیانگ و همکاران (۲۰۰۱) به‌منظور ارزیابی IEQ[۲۷]

Objective Measures	Subjective Measures	Subjective/Objective Relationship	Assessment Categories
IAQ: CO, CO_2, PM_{10} **Thermal Comfort:** Air Temperature (AT), Relative Humidity (RH), Air Velocity (AV) **Lighting:** Luminance (L) **Acoustics:** Sound level pressure (SL)	Simultaneous right-now survey	Linear regression	Healthy range (HR) Uncertain range (UR) Non-healthy range (NR)

جدول ۲-۵: کلاس‌های ارزیابی و محدوده‌های مجاز پارامترهای موردمطالعه[۴۴]

Assessment Class	IAQ	Thermal Comfort	Lighting	Acoustics
Healthy range (HR)	$CO_2 < 550$ ppm	$18.5 \leq AT \leq 24.5$ °C $43 \leq RH \leq 67$ % $AV < 0.45$ m/s	lux > 46	dBA < 44
Uncertain range (UR)	$550 \leq CO_2 \leq 650$ ppm	$17.5 \leq AT \leq 18.5$ °C $24.5 \leq AT \leq 25.5$ °C $37 \leq RH \leq 43$ % $67 \leq RH \leq 73$ % $0.45 \leq AV \leq 0.55$ m/s	$90 \leq lux \leq 110$	$44 \leq dBA \leq 46$
Non-healthy range (NR)	$CO_2 > 650$ ppm	AT < 17.5 °C AT > 25.5 °C RH < 37 % RH > 73 % AV > 0.55 m/s	lux < 90	dBA > 46

وونگ[1] و همکاران (۲۰۰۸) مدل "پذیرش کلی IEQ" را منطبق بر پاسخ‌های کیفی ساکنان برای هریک از پارامترهای موردمطالعه، بسط و گسترش دادند؛ همین‌طور مقادیر ثابت برازش به‌وسیله سنجش‌های ساکنان و سطح رضایت و پذیرش آن‌ها تعیین شد؛ و درنتیجه‌ی آن، برای این مدل

[1] Wong

شاخص IEQ با علامت Ø تعریف شد. بر اساس رتبه‌بندی میزان رضایت ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی، IEQ می‌تواند به سه سطح دسته‌بندی شود: IEQ خوب (٪۹۰ ≤Ø)، IEQ متوسط (٪۸۰ ≤Ø ≤ ٪۹۰) و IEQ بد (٪۴۰ ≥Ø)[۲۰].

۷-۲- مروری بر مطالعات انجام‌شده در ارتباط با ارزیابی IEQ

تمامی مدل‌ها و روش‌هایی که در تحقیقات مشابه برای ارزیابی IEQ مورداستفاده قرارگرفته‌اند، پارامترهایی را به‌منظور ارزیابی انتخاب کرده و موردمطالعه قرارداده‌اند. این پارامترها حداقل شامل IAQ، آسایش دمایی، روشنایی و آسایش صوتی است[۲۷]. پارامترهای مؤثر بر IEQ نقش به سزایی بر مصرف انرژی در مراحل تصمیمات وابسته به طراحی ساختمان و همچنین بهره‌برداری ساختمان دارند [۲۹،۳۰]؛ بنابراین سنجش و ارزیابی نحوه عملکرد ساختمان در رابطه با IEQ در تمامی سطوح ساختمان امری مهم است؛ تا درنتیجه‌ی این ارزیابی، از IEQ بالا اطمینان حاصل شود[۲۷]. در رابطه با پارامترهای تأثیرگذار بر IEQ، استاندارد اروپایی EN15251 دستورالعمل و رهنمودهای لازم برای اندازه‌گیری‌های مرتبط با IEQ، محدوده‌ی استاندارد و مقادیر ورودی جهت استفاده در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی را فراهم می‌آورد[۳۱].

با توجه به این‌که ارزیابی IEQ درواقع با ارزیابی IAQ شامل آلاینده‌های کربن دی‌اکسید (CO_2)، ترکیبات آلی فرار (VOCs) و ذرات معلق با قطر آئرودینامیک[۱] کمتر از ۲/۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$)؛ و همچنین ارزیابی دمای هوا (AT)[۲]، رطوبت نسبی (RH)، سرعت جریان هوا (AV)[۳]، روشنایی (L)[۴] و

[۱] قطر آئرودینامیک معادل قطر ذره کروی با چگالی واحد است که سرعت سقوط ثقلی آن در هوای آرام برابر ذره‌ی موردنظر باشد.
[2] Air Temperature
[3] Air Velocity
[4] Luminance

میزان صدا (SL)[1] انجام می‌گیرد؛ در ادامه به بررسی این پارامترهای تأثیرگذار، مرور مطالعات پیشین و بررسی نتایج تحقیقات مشابه انجام‌شده پرداخته شده است.

منبع اصلی آلاینده کربن دی‌اکسید (CO_2) در فضاهای داخلی، احتراق سوخت و بازدم ساکنان است. این آلاینده اغلب به‌عنوان یک شاخص برای سنجش تهویه مطبوع مناسب، مورداستفاده قرار می‌گیرد. به‌طورکلی پذیرفته شده است که در صورت عدم وجود منبع احتراق در داخل ساختمان، سطح این آلاینده نباید بیشتر از ۶۵۰ ppm نسبت به مقدار این آلاینده در فضای باز باشد[۳۲]. یون[2] و همکاران (۲۰۱۱) غلظت آلاینده کربن‌دی‌اکسید (CO_2) را در هوای داخلی و بیرونی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی در کشور کره اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که غلظت این آلاینده در هوای داخلی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی برحسب ppm به ترتیب برابر با ۳۲۸/۳±۸۴۷/۱ و ۱۰۱/۸±۶۰۷/۸ بود. همچنین غلظت این آلاینده در هوای بیرونی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی برحسب ppm به ترتیب برابر با ۳۶/۳±۴۷۸/۲ و ۱۸/۳±۴۵۴/۸ بود[۳۳].

ترکیبات آلی فرار (VOCs) در فضای داخلی از انواع مواد ساختمانی مانند فرش و مشمع کف اتاق و همچنین محصولات مصرفی مانند رنگ‌ها و چسب منتشر می‌شود. از دیگر منابع داخلی این آلاینده می‌توان به غذاهای سرخ‌کردنی، سیگار کشیدن، خوشبوکننده‌ها و آفت‌کش‌ها اشاره کرد[۳۲]. سوفوگلو[3] و همکاران (۲۰۱۵) غلظت پس‌زمینه آلاینده‌های CO_2 و VOCs را در آشپزخانه رستوران دانشکده معماری که از مارگارین برای برشته کردن استفاده می‌کرد اندازه گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که تحت شرایط عملکردی معمولی، میانگین غلظت‌های این دو آلاینده در زمان قبل از فعالیت برشته کردن برحسب ppm به ترتیب برابر ۵۶۶ و ۰/۰۱۵۱ بود[۳۴]. تساکاس[4] و همکاران (۲۰۱۱) کیفیت هوای داخلی برج کنترل فرودگاه بین‌المللی آتن را موردمطالعه قراردادند. طی این مطالعه

[1] Sound Level
[2] Yoon
[3] Sofuoglu
[4] Tsakas

مشخص شد که تمامی اندازه‌گیری‌های آلاینده VOCs مقادیر کمی را نشان دادند. همچنین مشخص شد که استعمال دخانیات و سیگار مهم بوده و بر غلظت این آلاینده اثر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که غلظت این آلاینده در اثر مصرف سیگار تقریباً ۲/۵ برابر بالاتر از اندازه‌گیری‌های بازه زمانی بدون استعمال دخانیات بود[۳۵]. کومار[1] و همکاران (۲۰۱۴) غلظت آلاینده VOCs در هوای داخلی و خطرات سلامتی وابسته به آن را در کتابخانه دانشگاه جاواهارهال نِهرو[2] در دهلی‌نو هندوستان مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آلاینده VOCs برای هوای داخلی در زمستان و تابستان برحسب $\mu g/m^3$ به ترتیب برابر ۴۶۵/۸ و ۳۲۱/۸ بوده است[۳۶]. کاشی و همکاران (۱۳۹۲) مقدار آلاینده VOCs تولیدشده در هوای داخلی تمام سالن‌های کارخانه ماست‌بندی شرکت لبن حسینی واقع در شهر شهریار را اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری برای VOCs کل برابر ppm ۳/۶۷±۲/۵۱ بوده است[۳۷]. صابریان و بیات (۱۳۹۳) اثر مصالح ساختمانی با نشت پایین مانند دیاتومیت، رنگ‌ها و آجرکاری زغالی را بر کیفیت هوای داخلی یک آپارتمان تازه‌ساخت مورد ارزیابی قراردادند. درنتیجه این اندازه‌گیری مقادیر خیلی جزئی از آلاینده VOCs کشف شد[۲۵]. مطابق با استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰)، مقدار مجاز برای آلاینده VOCs برابر ppm ۳ است[۳۸].

استنشاق ذرات معلق[3] موجود در هوای فضاهای داخلی موجب اثرات نامطلوب بهداشتی و زیان رساندن به انسان می‌شود. بر اساس برآورد سازمان بهداشت جهانی (WHO) (۲۰۰۷) ذرات معلق موجود در هوای آزاد می‌تواند علت مرگ زودرس تقریباً ۸۰۰ هزار نفر در سال باشد[۳۹]. اوه[4] و همکاران (۲۰۱۵) مشخصات غلظت ذرات معلق با منشأ معدنی و آلی (بایوآئروسل[5]) را بر روی هر طبقه از یک ساختمان در شهر سئول کشور کره جنوبی موردمطالعه قراردادند. درنتیجه این مطالعه،

[1] Kumar
[2] Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India
[3] Particulate Matter
[4] Oh
[5] Bioaerosol

میانگین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در طبقات اول، دوم، پنجم و هشتم این ساختمان در طول فصل زمستان برحسب $\mu g/m^3$ به ترتیب برابر ۴۰، ۳۵، ۴۵ و ۶۰ اندازه‌گیری شد. مطابق با استاندارد IAQ کره (۲۰۱۵)، میانگین روزانه (۲۴ ساعته) برای غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ معادل $\mu g/m^3$ ۵۰ است[۴۰]. زوزدزیاک[1] و همکاران (۲۰۱۶) غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را در مدارس شهر وروکلاو[2] کشور لهستان اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل نشان داد که میانگین روزانه برای غلظت این آلاینده برابر $\mu g/m^3$ ۲۶±۳۰ بوده است[۴۱]. مک‌نایتون[3] و همکاران (۲۰۱۷) غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را در طول سال تحصیلی در مدارس عمومی ایالت ماساچوست[4] در آمریکا موردتحقیق قراردادند؛ که برای پارامتر مذکور میانگین $\mu g/m^3$ ۰/۹۵±۷/۲۲ به دست آمد. این مقدار کمتر از حد مجاز استاندارد کیفیت هوای ملی آمریکا برای این پارامتر ($\mu g/m^3$ ۱۲) است[۴۲]. دهقانی و همکاران (۱۳۹۱) به اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق در هوای داخل بیمارستان حافظ، شهر شیراز پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که بیشینه و کمینه میانگین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ برحسب $\mu g/m^3$ به ترتیب برابر ۴/۱۱۲۵ و ۱/۷۲۹۲ بوده است[۴۳]. دهقانی و همکاران (۱۳۹۲) غلظت ذرات معلق را در هوای داخل بیمارستان دنا، شهر شیراز اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل نشان داد که بیشینه میانگین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ مربوط به هوای آزمایشگاه بیمارستان برابر $\mu g/m^3$ ۰/۸۵ بوده است[۴۴]. منصوری و همکاران (۱۳۹۱) آلودگی ذرات معلق منتشره از ترافیک شهری را بر کیفیت هوای داخل ساختمان‌های اداری شهر تهران بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین ذرات معلق $PM_{2.5}$ در طبقه همکف $\mu g/m^3$ ۷۶ و در طبقات دوم و سوم $\mu g/m^3$ ۶۴ بود[۴۵]. مطابق با استاندارد WHO (2008) میانگین روزانه (۲۴ ساعته) غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ برابر $\mu g/m^3$ ۲۵ [۳۹] و مطابق با استاندارد USEPA (2006) میانگین روزانه (۲۴ ساعته) غلظت این آلاینده برابر $\mu g/m^3$ ۳۵ است[۴۶].

[1] Zwozdziak
[2] Wroclaw
[3] MacNaughton
[4] Massachusetts

آسایش گرمایی، بصری و صوتی افراد حاضر در فضاهای داخلی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چراکه موجب راحتی و بهبود عملکرد افراد و یا نارضایتی و کاهش کارایی ساکنان فضای داخلی می‌شود. دمای فضای داخلی باید بسته به فصل در حد راحتی و آسایش باشد. میزان نور مصنوعی چراغ‌های روشنایی و همچنین نور طبیعی حاصل از تابش خورشید در طی روز باید مدیریت شود تا مانع بروز عناصر برهم زننده مانند سایه و یا نور شدید و زننده شوند. سطح صدای داخلی بسته به کاربری فضای داخلی باید کمتر از یک مقدار منطقی باشد. همچنین فضای داخلی باید به‌گونه‌ای طراحی شده باشد تا مانع ورود صداهای بیرون از فضای داخلی شود. این شاخص‌ها در IEQ حیاتی هستند، اما ارزیابی آن‌ها اغلب دشوار است. درواقع دمای مناسب و رطوبت مطلوب، حساسیت نسبت به نور و مقدار روشنایی و همچنین آستانه تحمل سروصدای محیط اطراف می‌تواند بسته به سلایق افراد متفاوت باشد. از طرفی این شاخص‌ها برای افراد به‌طور کامل وابسته به زمان بوده و در ساعات مختلفی از روز و در فصل‌های مختلفی از سال دارای معیارهای متفاوتی می‌باشند[۱،۳،۲۷].

اسدی و همکاران (۲۰۱۴) IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع را در دانشگاه تناگا ناسیونال[1] مالزی طی ماه‌های اکتبر و نوامبر مورد ارزیابی قراردادند. فضاهای داخلی ارزیابی شده شامل اتاق‌های اداری و فضاهای دانشجویی در ۶ ساختمان تحت تهویه مطبوع دانشگاه بود. پارامترهای بررسی‌شده عبارت از غلظت آلاینده کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، دمای هوای داخلی، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، روشنایی و میزان صدا بودند. این پارامترها هم به‌صورت کمی به‌وسیله‌ی دستگاه‌های اندازه‌گیری و هم به‌صورت کیفی از طریق پرسشنامه ارزیابی شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمی این پارامترها بدین قرار است: میانگین غلظت آلاینده CO_2 برابر ppm ۱۳۹/۳± ۷۴۰/۷ اندازه‌گیری گردید؛ محدوده مجاز این آلاینده در استاندارد کیفیت هوای فضاهای داخلی مالزی (۲۰۱۰)، کوچک‌تر از ppm ۱۰۰۰ است. میانگین دمای هوا برابر ^{o}C ۱/۷±۲۳/۲ بود؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۲۳ تا

[1] Universiti Tenaga Nasional, Malaysia

^{o}C ۲۶ است. میانگین رطوبت نسبی برابر ٪ ۶۷/۵±۷/۶ به دست آمد؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۴۰ تا ۷۰ درصد است. میانگین سرعت جریان هوا برابر m/s ۰/۱۲±۰/۰۴ محاسبه شد؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۰/۱۵ تا m/s ۰/۵ است. میانگین روشنایی برای اتاق‌های اداری برابر lux ۳۵۶/۱±۹۷/۱ اندازه‌گیری شد؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۳۰۰ تا lux ۴۰۰ است. میانگین روشنایی برای فضاهای دانشجویی برابر lux ۴۴۶/۷±۱۱۳/۹ بود؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۳۰۰ تا lux ۵۰۰ است. میانگین میزان صدا برای اتاق‌های اداری برابر dBa ۴۳/۶±۷/۰ به دست آمد؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی کمتر از dBa ۵۰ است. میانگین میزان صدا برای فضاهای دانشجویی برابر dBa ۵۶/۳±۸/۳ محاسبه شد؛ به‌طوری‌که محدوده آن در استانداردهای مالزی بین ۵۰ تا dBa ۷۰ است[۳۸،۴۷].

لی[1] و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ[2] به‌وسیله‌ی سنجش کیفی و اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه، ارزیابی کردند. پارامترهای موردمطالعه عبارت از غلظت آلاینده CO_2، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، روشنایی و میزان صدا بود؛ به‌طوری‌که در فضاهای تدریس موردبررسی به ترتیب مقادیر میانگین ppm ۱۰۶۵±۳۱۶، ^{o}C ۲۲/۱±۱/۴، ٪ ۵۹/۷±۷/۶، m/s ۰/۱±۰/۵، lux ۳۶۹±۱۱۵ و dBA ۶۱/۲±۲/۷ اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که وابستگی قوی بین نظرات کلی راجع به IEQ و پارامترهای زیست‌محیطی وجود دارد. همچنین این مطالعه آشکار کرد که تمامی شکایات در رابطه با IEQ، اثر یکسانی بر عملکرد یادگیری دارد و همبستگی خوبی بین عملکرد یادگیری و تعداد شکایات وجود دارد[۴۸].

[1] Lee
[2] Hong Kong Polytechnic University

در مطالعه‌ای که بر روی مدارس ابتدایی شهرستان مایا[1] در کشور پرتقال توسط ماکدو[2] و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، مشخصات IEQ مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه طی فصل گرما (ماه می تا اکتبر ۲۰۱۰) و فصل سرما (ماه ژانویه تا مارس) صورت گرفت؛ به‌طوری‌که آلاینده‌های هوا نظیر CO_2 و کل ترکیبات آلی فرار (TVOC)[3] و فاکتورهای آب‌وهوایی شامل دمای هوا و رطوبت نسبی همگی اندازه‌گیری شد. درنتیجه‌ی این مطالعه، برای فضاهای داخلی مدارس ابتدایی موردبررسی، مقادیر میانگین آلاینده‌های CO_2 و TVOC و همچنین پارامترهای دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب برابر ۴۷۷±۹۹۹ ppm، ۰/۲۸±۰/۴۱ mg/m^3، ۲/۸±۲۰/۳ ^oC و ٪ ۸/۳±۶۰/۳ اندازه‌گیری شد. مطابق با استاندارد ملاحظه می‌شود که این مقادیر تا حدودی کمتر از مقادیر بیشینه قابل‌قبول (AMV)[4] هستند. مطابق با ضوابط سیستم ملی برای گواهینامه انرژی و کیفیت هوای داخلی ساختمان‌ها (RSECE 2006) که از دستورالعمل‌های اروپایی (2002/91/CE) به قوانین پرتقالی انتقال داده شده است؛ AMV برای آلاینده‌های مطالعه شده عبارت از ۱۰۰۰ ppm برای CO_2، ۰/۶ mg/m^3 برای TVOC هستند؛ همچنین برای آسایش پارامترهای آب‌وهوایی، مقادیر پیشنهادشده برای دما ۲۵ ^oC در فصل گرما و ۲۰ ^oC در فصل سرما و همچنین برای رطوبت نسبی ٪ ۵۰ در طول سال هستند[۲۶].

[1] Maia
[2] Macedo
[3] Total Volatile Organic Compounds
[4] Acceptable Maximum Values

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۱-۳- مقدمه

در این بخش به بیان و توضیح روش‌های اندازه‌گیری کمی پارامترهای موردمطالعه، روش ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه و پرسشنامه ارائه شده، معرفی محل موردبررسی و انتخاب فضاهای داخلی، موقعیت مکانی، زمان‌بندی و نحوه‌ی برداشت داده‌های کمی و کیفی از فضاهای داخلی پرداخته شده است.

به‌منظور ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ)[۱] در دانشگاه صنعتی شاهرود، می‌باید عوامل و پارامترهایی از هوای فضای داخلی که بر روی IEQ تأثیرگذار هستند، موردمطالعه قرار گیرند؛ بدین منظور در تحقیق حاضر، پارامترهای زیر برای ارزیابی IEQ به‌منظور انتخاب شد:

- کیفیت هوای داخلی (IAQ)[۲] شامل غلظت آلاینده‌های کربن دی‌اکسید (CO_2)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)[۳] و ذرات معلّق با قطر آئرودینامیک[۴] کمتر از ۲/۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$)
- دمای هوا (AT)[۵]
- رطوبت نسبی (RH)[۶]
- سرعت جریان هوا (AV)[۷]
- روشنایی (L)[۸]
- میزان صدا (SL)[۹]

[1] Indoor Environmental Quality
[2] Indoor Air Quality
[3] Volatile Organic Compounds
[۴] قطر آئرودینامیک معادل قطر ذره کروی با چگالی واحد است که سرعت سقوط ثقلی آن در هوای آرام برابر ذره‌ی موردنظر باشد.
[5] Air Temperature
[6] Relative Humidity
[7] Air Velocity
[8] Luminance
[9] Sound Level

شایان‌ذکر است که هریک از این پارامترها به دو روش کمی و کیفی و طی دو فصل زمستان و بهار (فصول بحرانی) مورد ارزیابی قرار گرفتند؛ که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۳- معرفی محل موردبررسی و انتخاب فضاهای داخلی

شاهرود بزرگ‌ترین و سردترین شهر استان سمنان، در شمال شرق کشور ایران است که در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی (E '۵۸°۵۴) و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی (N '۲۵°۳۶) واقع شده است. اقلیم حاکم بر این منطقه گرم و خشک است. میانگین سالانه بارندگی در شاهرود برابر ۱۶۱/۱ میلی‌متر در سال و میانگین دمای سالانه ۱۴/۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۹ درصد است. از ویژگی‌های آب‌وهوایی آن می‌توان به وزش بادهای خشک، بارندگی کم، اختلاف دمای بالای بین شب و روز و میزان تعریق و تبخیر بالا نسبت به بارش سالیانه اشاره کرد. با توجه به پستی‌وبلندی‌های این منطقه، در قسمت شمالی سرد، در قسمت مرکزی معتدل و در قسمت جنوبی گرم است. محل موردتحقیق، دانشگاه صنعتی شاهرود واقع در شمال غرب شاهرود است[۴۹].

برای ارزیابی IEQ دانشگاه صنعتی شاهرود، در ابتدا نیاز به شناسایی و انتخاب فضاهای داخلی موجود در این دانشگاه جهت انجام تحقیق بود. بدین منظور با بررسی فضاهای موجود و شرایط حاکم بر آن‌ها، فضاهای داخلی مناسب جهت ارزیابی IEQ شناسایی و انتخاب شد. سپس برای هریک از فضاهای داخلی انتخاب‌شده، جهت برداشت داده‌های کمّی و توزیع هم‌زمان پرسشنامه و جمع‌آوری داده‌های کیفی زمان‌بندی شد. در جدول ۱-۳ چهارده فضای داخلی انتخاب‌شده، جهت ارزیابی IEQ آورده شده است. این چهارده فضا عبارت از سرسراهای ورودی چهار دانشکده در پردیس فنی و مهندسی و نیز سازمان مرکزی، سالن‌های غذاخوری، سالن‌های مطالعه، مخزن‌های کتابخانه و سایت‌های کامپیوتر هستند.

جدول ۳-۱: فضاهای داخلی انتخاب‌شده در دانشگاه صنعتی شاهرود جهت ارزیابی IEQ

شماره فضای داخلی	نوع کاربری
۱	سرسرای ورودی دانشکده مهندسی عمران و مکانیک
۲	سرسرای ورودی دانشکده مهندسی برق و رباتیک
۳	سرسرای ورودی دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
۴	سرسرای ورودی دانشکده علوم ریاضی
۵	سرسرای ورودی سازمان مرکزی
۶	سالن غذاخوری برادران در پردیس
۷	سالن غذاخوری مرکزی برادران
۸	سالن غذاخوری مرکزی خواهران
۹	سالن مطالعه برادران در پردیس
۱۰	سالن مطالعه مرکزی برادران
۱۱	مخزن کتابخانه در پردیس
۱۲	مخزن کتابخانه مرکزی
۱۳	سایت کامپیوتر برادران در پردیس
۱۴	سایت کامپیوتر مرکزی برادران

۳-۳- موقعیت مکانی، زمان‌بندی و نحوه برداشت داده‌های کمّی و کیفی از فضاهای داخلی

مطابق با شرایط مندرج در راهنمای هریک از دستگاه‌های اندازه‌گیری و نیز ضوابط موجود در استانداردها، موقعیت مکانی برداشت داده از فضاهای داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود بدین‌صورت اتخاذ شد که تمامی تجهیزات و دستگاه‌ها بر روی میزی در وسط سرسراهای ورودی و فضاهای داخلی به

نحوی قرار گیرد که ارتفاع نمونه‌برداری ۱/۵ متر و حداقل فاصله ۲ متر از دیوارها و ستون‌ها رعایت شود[۵۰].

با توجه به این‌که شرایط اوج بهره‌برداری و سرویس برای هریک از فضاهای داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود، در ساعات مختلفی از روز برقرار است؛ برای هریک از فضاهای داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود، دو نوبت یک‌ساعته و در هر نوبت ۶ برداشت از دستگاه‌های اندازه‌گیری با فاصله زمانی یکسان و توزیع ۶ پرسشنامه به‌طور برابر بین دو جنسیت مرد و زن در نظر گرفته شد (لازم به ذکر است که کاربری برخی از فضاها تک جنسیتی بوده است). برداشت داده‌ها از تمامی فضاهای داخلی موردتحقیق در دانشگاه صنعتی شاهرود، در دو فصل زمستان و بهار، و در هر فصل دومرتبه صورت گرفت. بدین ترتیب در طول فصل‌های زمستان و بهار در فضاهای داخلی موردبررسی، برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در مجموع ۶۷۲ برداشت صورت گرفت و ۶۷۲ پرسشنامه توزیع شد. همچنین در مجموع تعداد ۵۳۷۶ داده کمی برای پارامترها برداشت شد و به تعداد ۹۴۰۸ پرسش کیفی توسط ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی پاسخ داده شد. شایان‌ذکر است که با توجه به تعطیل بودن دانشگاه در فصل تابستان، انتخاب فصول ذکرشده به این دلیل بوده است که در این فصول بیشترین احتمال برای کاهش IEQ دانشگاه وجود دارد؛ و درنتیجه با برآورد و ارزیابی IEQ در این فصول درواقع پایین‌ترین کیفیت زیست‌محیطی احتمالی فضاهای داخلی دانشگاه موردبررسی قرار گرفته شده است. همچنین این رویکرد انتخاب فصول بحرانی برای ارزیابی، بر اساس تحقیقات مشابه[۲۶،۴۷] نیز بوده است.

۴-۳- روش اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه

به‌منظور اندازه‌گیری کمی پارامترهای موردمطالعه، برای هریک از پارامترها، از دستگاه‌های قابل‌حمل و مختص کار زیست‌محیطی و مناسب برای اندازه‌گیری در فضاهای داخلی با دقت مطلوب استفاده شد. در شکل ۳-۱ میز استفاده شده به همراه تجهیزات روی آن در حال برداشت داده‌های کمی از محیط،

در یکی از فضاهای داخلی موردبررسی نشان داده شده است. در ادامه به تشریح مشخصات هریک ازاین‌دستگاه‌ها و تجهیزات پرداخته شده است.

شکل ۳-۱: تجهیزات اندازه‌گیری کمّی، در یکی از فضاهای داخلی موردبررسی

- به‌منظور اندازه‌گیری غلظت آلاینده کربن دی‌اکسید (CO_2) در هوای فضاهای داخلی، از دستگاه CO_2 متر مدل TESTO 535 ساخت کشور آلمان استفاده شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برابر ۱ ppm بوده و بازه اندازه‌گیری آن بین صفر تا ppm ۹۹۹۹ است.
- برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های VOCs و $PM_{2.5}$ در هوای فضاهای داخلی، از دستگاه سنجش کیفیت هوا مدل TES-5322 ساخت کشور تایوان استفاده شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای VOCs برابر ۱ ppm و برای $PM_{2.5}$ برابر ۱ $\mu g/m^3$ است. بازه اندازه‌گیری دستگاه برای VOCs بین صفر تا ۵۰ ppm و برای $PM_{2.5}$ بین صفر تا ۵۰۰ $\mu g/m^3$ است.
- به‌منظور اندازه‌گیری دمای هوا (AT) و رطوبت نسبی (RH) در فضاهای داخلی، از دستگاه ترمورطوبت سنج مدل TES-1365 ساخت کشور تایوان استفاده شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای دمای هوا برابر ۰/۱ ^oC یا ۰/۱ ^oF (بسته به واحد انتخاب‌شده در دستگاه برای اندازه‌گیری دما) و برای رطوبت نسبی برابر ۰/۱ ٪ است. بازه اندازه‌گیری دستگاه برای دمای هوا بین ۲۰ ^oC- تا ۶۰ ^oC یا بین ۴ ^oF- تا ۱۴۰ ^oF و برای رطوبت نسبی بین ۱۰٪ تا ۹۵٪ است.

- برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا (AV) در فضاهای داخلی، از دستگاه بادسنج هات وایر[1] مدل TES-1340 ساخت کشور تایوان استفاده شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برابر ۰/۰۱ m/s یا ft/min ۱ (بسته به واحد انتخاب‌شده در دستگاه برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا) بوده و بازه اندازه‌گیری آن بین صفر تا ۳۰ m/s یا بین صفر تا ۶۰۰ ft/min است.
- برای اندازه‌گیری روشنایی (L) در فضاهای داخلی، از نورسنج (لوکس‌متر) مدل TES-1339R ساخت کشور تایوان استفاده شد. این دستگاه دارای پنج بازه اندازه‌گیری خودکار است؛ به‌طوری‌که دستگاه بسته به میزان روشنایی، بازه اندازه‌گیری را به‌صورت خودکار انتخاب می‌کند. این بازه‌ها دقت اندازه‌گیری دستگاه را در محدوده روشنایی موجود بالا می‌برد؛ چراکه مقدار روشنایی محیط می‌تواند بسیار گسترده و متغیر باشد. کوچک‌ترین بازه اندازه‌گیری دستگاه از صفر تا ۹۹/۹۹ lux، و بزرگ‌ترین بازه اندازه‌گیری آن از ۹۹۹۹۰ تا ۹۹۹۹۰۰ lux است.
- برای اندازه‌گیری میزان صدا (SL) در فضاهای داخلی، از دستگاه صداسنج مدل TES-52A ساخت کشور تایوان استفاده شد. این دستگاه دارای شش بازه‌ی اندازه‌گیری است؛ که شامل ۸۰-۲۰ dBa، ۹۰-۳۰ dBa، ۱۰۰-۴۰ dBa، ۱۱۰-۵۰ dBa، ۱۲۰-۶۰ dBa و ۱۳۰-۷۰ dBa است. بهترین بازه اندازه‌گیری، بازه‌ای است که مقدار صدای اندازه‌گیری شده در وسط آن بازه قرار گیرد.

۵-۳- روش ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه

به‌منظور ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه، به‌وسیله‌ی پرسشنامه، از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی نظرسنجی به عمل آمد. پرسشنامه‌ی طراحی شده شامل هفت پرسش دوقسمتی است؛ بدین‌صورت که "احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترها" و "میزان رضایت‌مندی افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از

[1] Hot-wire

پارامترها" سؤال شده است. نمونه‌ای از پرسشنامه‌های طراحی‌شده در شکل ۳-۲ آورده شده است. به‌منظور تدوین این پرسشنامه از استاندارد اروپایی EN 15251 (2006) استفاده شده است[۵۱].

ارزیابی کیفیت زیست محیطی فضاهای داخلی (IEQ) دانشگاه صنعتی شاهرود												
تاریخ :		زمان :			مکان سایت:						جنسیت:	
احساس دمای هوا	خیلی گرم	گرم	کمی گرم	خنثی	کمی سرد	سرد	خیلی سرد		کاملا قابل‌قبول	تا حدودی قابل‌قبول	تا حدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس سرعت هوا	خیلی نسیم دار	نسیم دار	تا حدودی نسیم دار	متعادل	تا حدودی آرام	آرام	خیلی آرام		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس رطوبت نسبی	خیلی مرطوب	مرطوب	کمی مرطوب	متعادل	کمی خشک	خشک	خیلی خشک		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس کیفیت هوای داخلی	خیلی خوب	خوب	کمی خوب	خنثی	کمی بد	بد	خیلی بد		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس روشنایی	خیلی روشن	روشن	کمی روشن	متعادل	کمی تاریک	تاریک	خیلی تاریک		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس شنوایی	خیلی ساکت	ساکت	تاحدودی ساکت	متعادل	تاحدودی با سروصدا	با سروصدا	خیلی پر سروصدا		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
احساس کلی در مورد IEQ	خیلی خوب	خوب	کمی خوب	خنثی	کمی بد	بد	خیلی بد		کاملا قابل‌قبول	تاحدودی قابل‌قبول	تاحدودی غیرقابل‌قبول	کاملا غیرقابل‌قبول
یا تشکر از همکاری و پاسخ های صادقانه شما												

شکل ۳-۲: پرسشنامه مورداستفاده برای ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه

به‌عنوان‌مثال، پاسخ‌های کیفی برای ارزیابی احساس افراد در رابطه با کیفیت هوای داخلی عبارت‌اند از: "خیلی خوب، خوب، کمی خوب، خنثی، کمی بد، بد و خیلی بد". هریک از این پاسخ‌ها به ترتیب دارای وزنی معادل ۳+ تا ۳- هستند؛ به‌طوری‌که وزن پاسخ "خیلی خوب" برابر ۳+ و وزن پاسخ "خیلی بد" برابر ۳- است و وزن پاسخ "خنثی" برابر با صفر در نظر گرفته شده است[۵۲]. به‌علاوه پاسخ‌های کیفی برای ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در رابطه با کیفیت هوای داخلی عبارت‌اند از: "کاملاًقابل‌قبول، تاحدودی‌قابل‌قبول، تاحدودی‌غیرقابل‌قبول، کاملاًغیرقابل‌قبول".

۶-۳- روش ارزیابی کلّی IEQ

در تحقیق حاضر با تقریب خوبی مشابه با مدل چیانگ[1] و همکاران (۲۰۰۱) (معرفی‌شده در بخش ۲-۶) عمل شده است و روش ارزیابی IEQ مطابق با اصول این مدل بوده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق به‌جای پارامتر CO، پارامتر VOCs و به‌جای پارامتر PM_{10}، پارامتر $PM_{2.5}$ در فضاهای داخلی بررسی شده است. علت این تصمیم فراهم بودن تجهیزات اندازه‌گیری برای پارامترهای مطالعه‌شده (VOCs و $PM_{2.5}$) است.

پس از به دست آوردن جمعیت آماری مناسب از داده‌ها (شامل داده‌های کمّی و کیفی)، ارزیابی IEQ با ترسیم نمودارها و جداول مربوطه و با کمک مقایسه اطلاعات حاصل با استانداردهای داخلی و بین‌المللی موجود صورت پذیرفت. برای ارزیابی نتایج حاصل از اندازه‌گیری و مقایسه با مقادیر مجاز، از استانداردهای زیر استفاده شد:

- استاندارد مالزی (2010) JKKP DP(S) 127/379/4-39 [۳۸]

- استانداردهای جهانی (2008) WHO و (2006) USEPA [۳۹،۴۶]

- استاندارد آلمانی (1994) DIN 1964-2 [۵۳]

- استانداردهای اروپایی (2006) EN 15251 و (2007) EN 13779 [۵۱،۵۴]

- استاندارد آمریکایی (2013) LEED NC v.4 [۵۶]

- استاندارد ملی ایران (2016) INSO 10847-26 [۵۰]

همچنین تحلیل آماری نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های کمّی و ارزیابی‌های کیفی پارامترهای موردمطالعه انجام و درنهایت IEQ موردبررسی طی دو فصل زمستان و بهار با یکدیگر مقایسه گردید.

[1] Chiang

فصل چهارم

نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، پارامترهای موردبررسی در تحقیق حاضر که عبارت‌اند از: کیفیت هوای داخلی (IAQ)[۱] شامل غلظت آلاینده‌های کربن دی‌اکسید (CO_2)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)[۲] و ذرات معلّق $PM_{2.5}$، دمای هوا (AT)[۳]، رطوبت نسبی (RH)[۴]، سرعت جریان هوا (AV)[۵]، روشنایی (L)[۶] و میزان صدا (SL)[۷]؛ به دو روش کمّی و کیفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این بخش نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمّی و ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه که شامل اشکال و جداول مختلفی است، ارائه شده و به بحث پیرامون این نتایج و مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات پیشین در این زمینه پرداخته شده است. همچنین محدوده‌ی استاندارد و آیین‌نامه‌های مطرح در این زمینه برای هریک از پارامترهای موردمطالعه معرفی شده و به مقایسه نتایج با آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۲- نتایج حاصل از ارزیابی کمّی IEQ

۴-۲-۱- تحلیل آماری IEQ در فضاهای داخلی در فصول موردبررسی

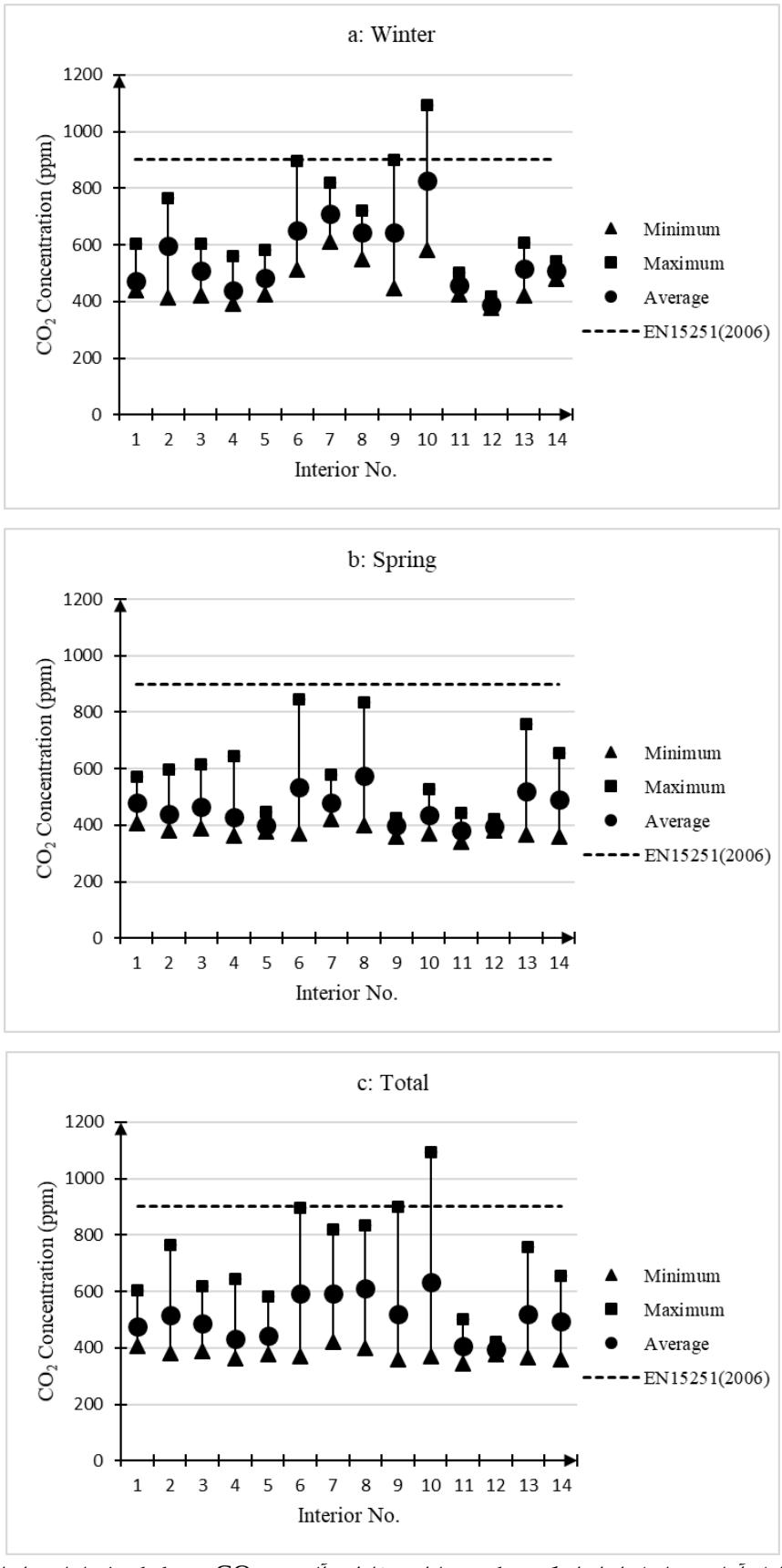
پس از اندازه‌گیری و برداشت داده‌های کمّی به‌وسیله‌ی دستگاه‌های مربوطه، مطابق با زمان‌بندی و برنامه تعیین‌شده در طول فصول زمستان و بهار سال تحصیلی ۹۵-۹۶، داده‌های کمّی هریک از پارامترها جمع‌آوری شده و به‌منظور انجام تحلیل آماری دسته‌بندی و مرتب‌سازی شد. بدین ترتیب،

[1] Indoor Air Quality
[2] Volatile Organic Compounds
[3] Air Temperature
[4] Relative Humidity
[5] Air Velocity
[6] Luminance
[7] Sound Level

برای هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، مقادیر کمینه[1]، بیشینه[2] و میانگین[3] برای هریک از پارامترهای موردمطالعه محاسبه گردید. این مقادیر به تفکیک فضاهای داخلی موردبررسی (مطابق با جدول ۳-۱) در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۸ آورده شده است. در ادامه به بحث و بررسی هریک از اشکال که مرتبط با یک پارامتر می‌شوند می‌پردازیم.

در شکل ۴-۱ نمودارهای مربوط به پارامتر غلظت آلاینده CO_2 آورده شده است. نتایج حاصل از شکل ۴-۱ نشان می‌دهند که غلظت آلاینده CO_2 در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان نسبت به فصل بهار بیشتر است؛ علت این امر می‌تواند بسته بودن درها و بازشوها مانند پنجره‌ها به علت سرمای هوای زمستان باشد و بدین ترتیب غلظت این آلاینده در فضاهای داخلی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده برای غلظت این آلاینده در هوای آزاد، تفاوت چندانی بین زمستان و بهار وجود ندارد (میانگین برابر ۳۸۸/۱ ppm±۲۰). در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سالن غذاخوری مرکزی خواهران (۵۷۴/۷ ppm)، و در فصل زمستان و مجموع دو فصل مربوط به سالن مطالعه مرکزی برادران (به ترتیب ۸۲۷ و ۶۳۱/۵ ppm) است. علت این امر می‌تواند وجود امتحانات پایان‌ترم در فصل زمستان باشد؛ از طرفی به‌طورمعمول همه‌ی دانشجویان از سالن مطالعه مرکزی استفاده می‌کنند. به‌طورکلی بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل، در فضاهای داخلیِ سالن غذاخوری برادران در پردیس، سالن غذاخوری مرکزی برادران، سالن غذاخوری مرکزی خواهران و سالن مطالعه مرکزی برادران (به ترتیب ۵۹۲/۷، ۵۹۴/۸، ۶۱۰/۱ و ۶۳۱/۵ ppm) است. ملاحظه می‌شود که در شلوغ‌ترین فضاهای داخلی که مورداستفاده اکثر دانشجویان است، غلظت این آلاینده بیشتر از سایر فضاهاست. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به مخزن کتابخانه

[1] Minimum
[2] Maximum
[3] Average

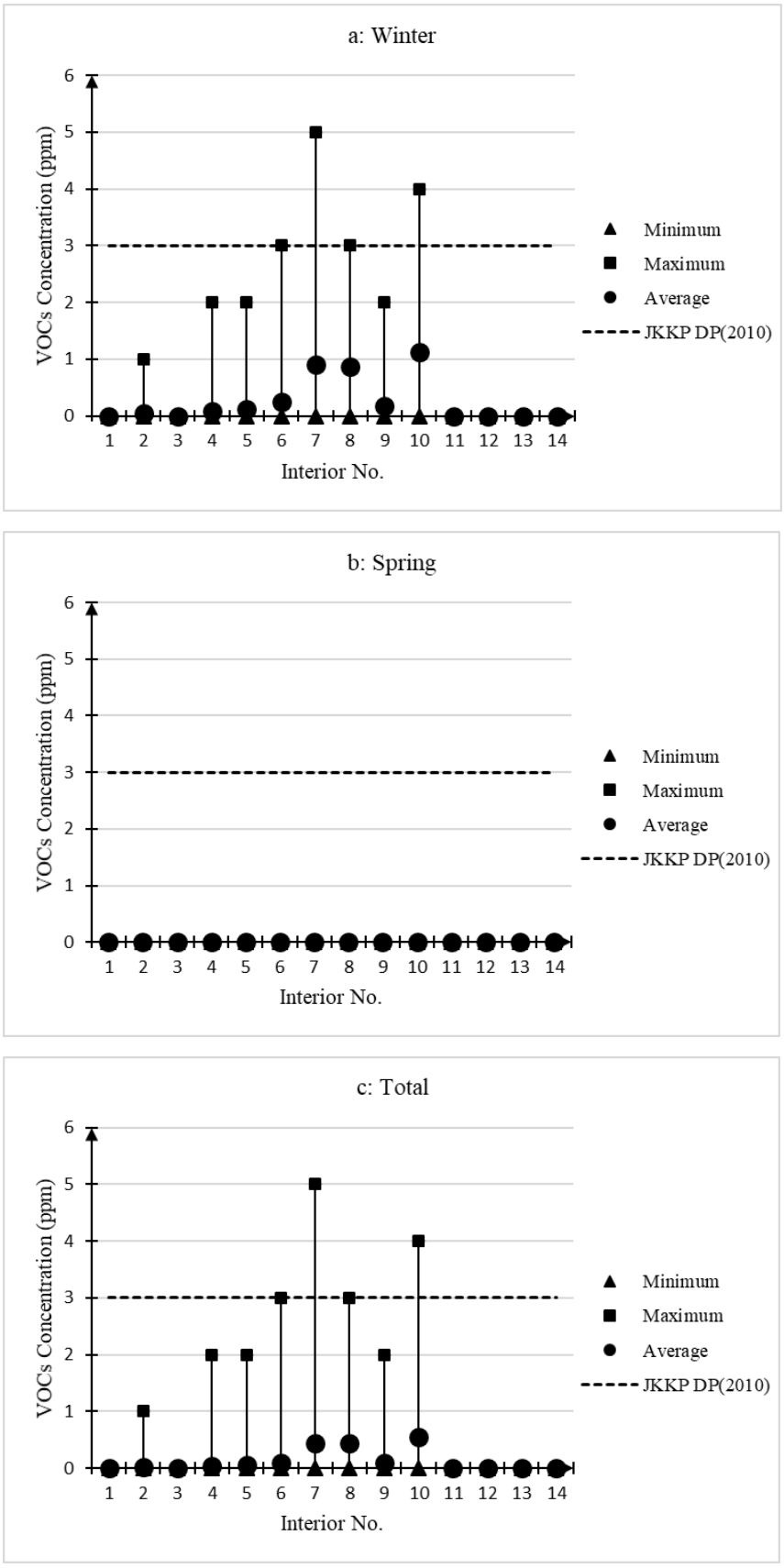


شکل ۴-۱: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامتر غلظت آلاینده CO_2 به تفکیک فضاهای داخلی موردبررسی
(a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

در پردیس (۳۸۰ ppm)، و در فصل زمستان و مجموع دو فصل مربوط به مخزن کتابخانه مرکزی است (به ترتیب ۳۸۸/۶ و ۳۹۴/۳ ppm) که می‌توان نتیجه گرفت، سیستم تهویه هوای مخازن کتابخانه از کیفیت مطلوبی برخوردار است؛ از طرفی این امر ممکن است به علت مراجعه کم دانشجویان به مخازن کتابخانه و استفاده از این فضای داخلی باشد. به‌طورکلی این پارامتر در فصل زمستان متغیرتر بوده (بین ۳۸۸/۶ تا ۸۲۷ ppm) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی متفاوت است؛ درحالی‌که این پارامتر در فصل بهار یکنواخت‌تر بوده (بین ۳۸۰ تا ۴۳۶ ppm) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی به هم نزدیک است.

در شکل ۴-۲ نمودارهای مربوط به پارامتر غلظت آلاینده VOCs آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲ ملاحظه می‌شود، مقادیر میانگین غلظت آلاینده VOCs در تمامی فضاهای داخلی موردبررسی در فصل بهار صفر است؛ درحالی‌که مقدار میانگین این پارامتر در فصل زمستان برای برخی از فضاهای داخلی موردبررسی دقیقاً برابر صفر، برای برخی فضاهای داخلی تقریباً برابر صفر و برای برخی دیگر دارای مقدار است. فضاهای داخلی که در محیط آن‌ها در فصل زمستان، مقادیر این پارامتر مشاهده شده است عبارت از سالن غذاخوری مرکزی برادران، سالن غذاخوری مرکزی خواهران و سالن مطالعه مرکزی برادران (به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۸۸ و ۱/۱۳ ppm) هستند. در سالن‌های غذاخوری به‌منظور طبخ غذا، حجم زیادی گاز شهری استفاده می‌شود و ممکن است وجود این آلاینده به علت عدم تهویه هوای مناسب سالن‌های غذاخوری مرکزی در فصل زمستان باشد. سالن مطالعه مرکزی برادران در فصل زمستان مملو از دانشجویانی است که برای امتحانات پایان‌ترم از آن استفاده می‌کنند؛ همین امر باعث وجود این آلاینده در هوای این فضای داخلی شده است. در کل مقادیر ناچیزی از این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی مشاهده شد.

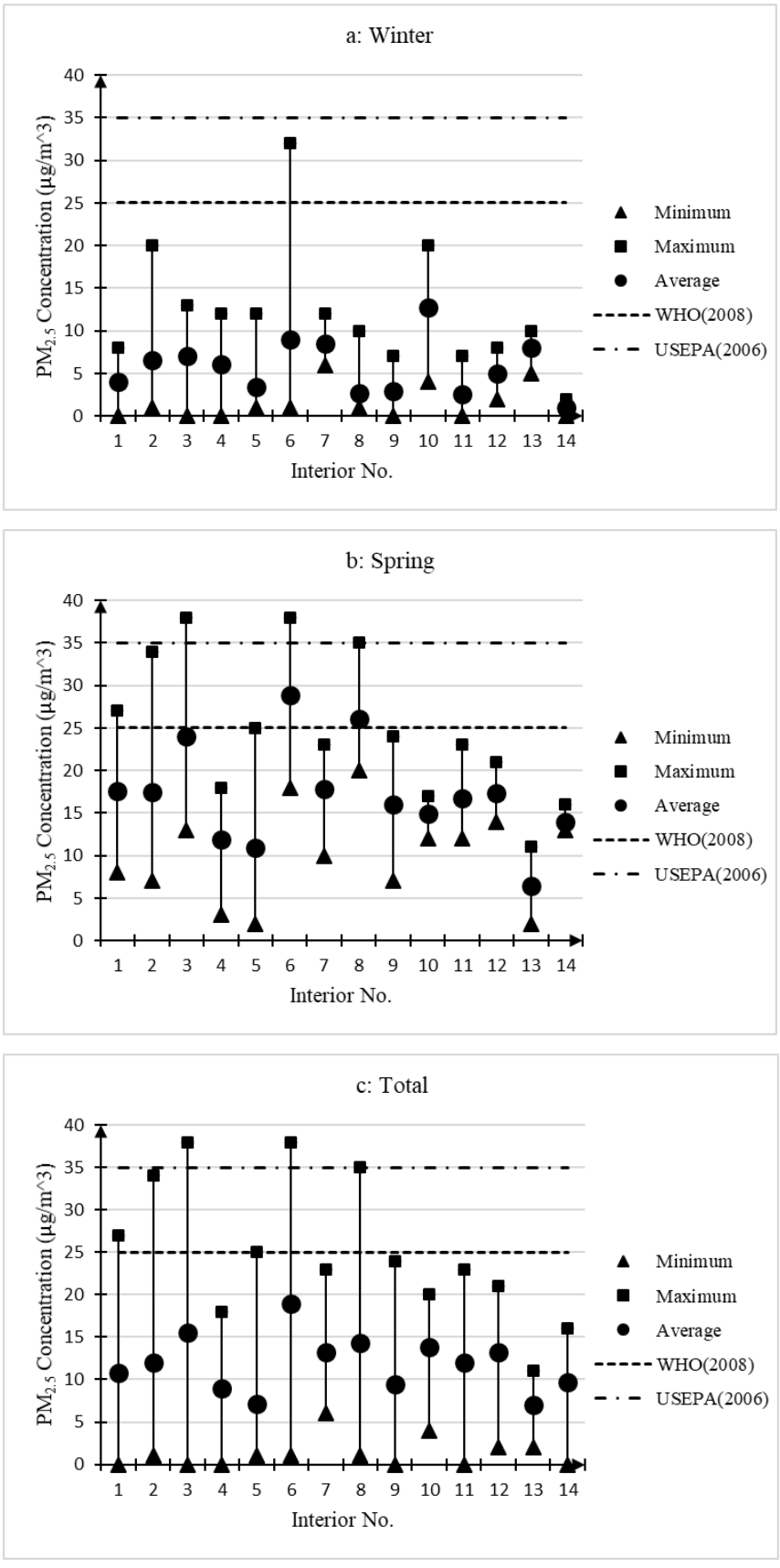
در شکل ۴-۳ نمودارهای مربوط به پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ آورده شده است. از شکل ۴-۳



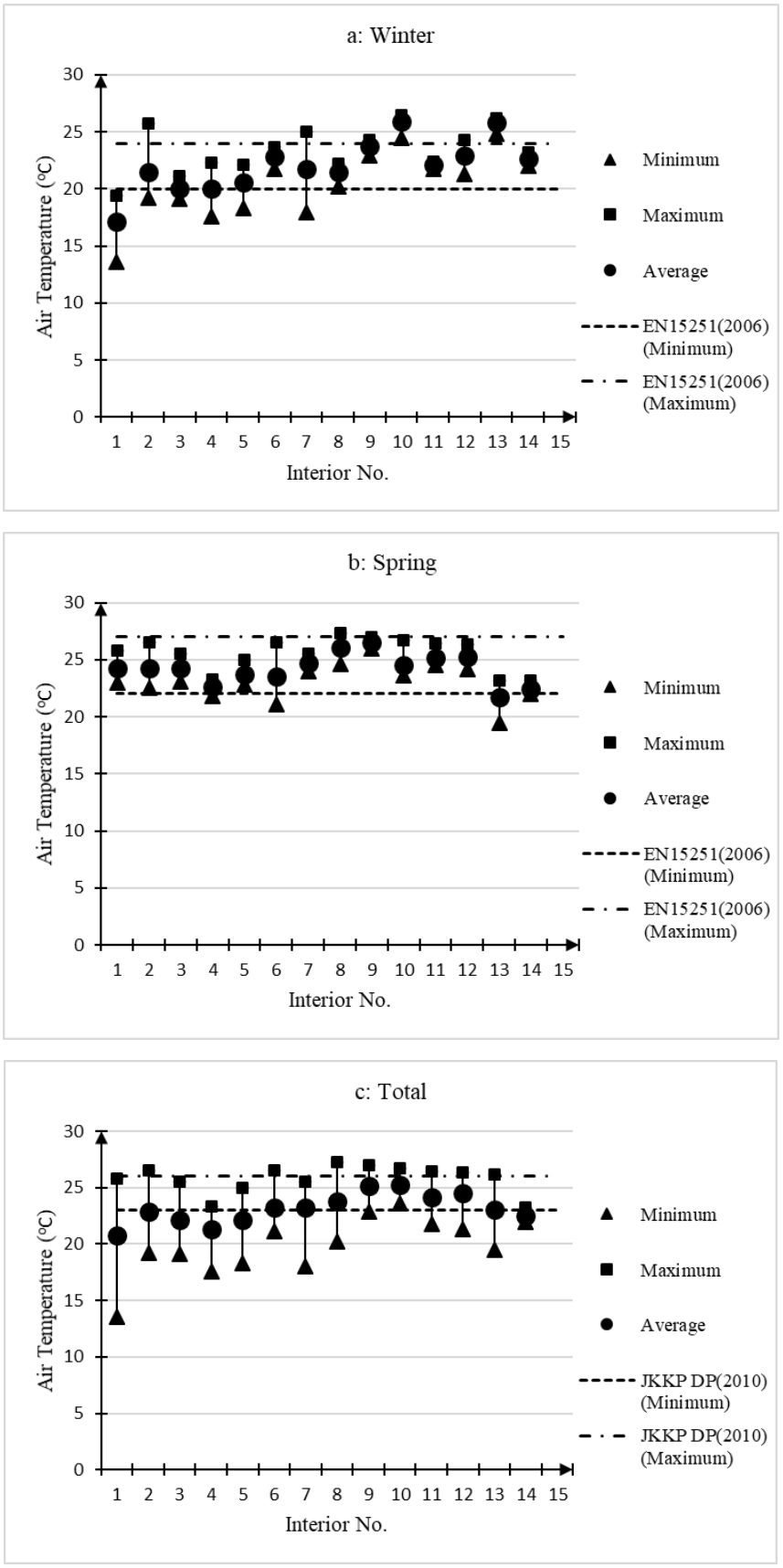
شکل ۴-۲: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر غلظت آلاینده VOCs به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

می‌توان نتیجه گرفت که غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بسیار بیشتر است؛ این امر نشان می‌دهد که در فصل بهار ذرات معلق و گردوغبار بیشتری در هوا نسبت به زمستان وجود دارد. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به سالن مطالعه مرکزی برادران (۱۲/۸ $\mu g/m^3$) و در فصل بهار و مجموع دو فصل در سالن غذاخوری برادران در پردیس (به ترتیب ۲۸/۸ و $\mu g/m^3$ ۱۸/۹) است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به سایت کامپیوتر مرکزی برادران ($\mu g/m^3$ ۱)، در فصل بهار مربوط به سایت کامپیوتر برادران در پردیس ($\mu g/m^3$ ۶/۵)، و در مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی سازمان مرکزی و سایت کامپیوتر برادران در پردیس (به ترتیب ۷/۲ و $\mu g/m^3$ ۷) است. به‌طورکلی این پارامتر در فصل بهار بسیار متغیرتر از فصل زمستان بوده (بین ۶/۵ تا $\mu g/m^3$ ۲۸/۸) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی متفاوت است؛ درحالی‌که این پارامتر در فصل زمستان یکنواخت‌تر بوده (بین ۱ تا $\mu g/m^3$ ۱۲/۸) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی به هم نزدیک‌تر است.

در شکل ۴-۴ نمودارهای مربوط به پارامتر دمای هوا (AT) آورده شده است. با توجه به شکل ۴-۴ ملاحظه می‌شود که دمای هوا در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بیشتر است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سالن مطالعه برادران در پردیس (^oC ۲۶/۶) و در فصل زمستان مربوط به سایت کامپیوتر برادران در پردیس و سالن مطالعه مرکزی برادران (به ترتیب ۲۵/۸ و ^oC ۲۵/۹) و مجموع دو فصل در سالن مطالعه مرکزی برادران (^oC ۲۵/۹) است. این امر حاکی از آن است که سالن‌های مطالعه دانشگاه نسبت به سایر فضاهای داخلی همواره دمای بالاتری دارد. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سایت کامپیوتر برادران در پردیس (^oC ۲۱/۷) و در فصل زمستان و مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی عمران و مکانیک (به ترتیب



شکل ۴-۳: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

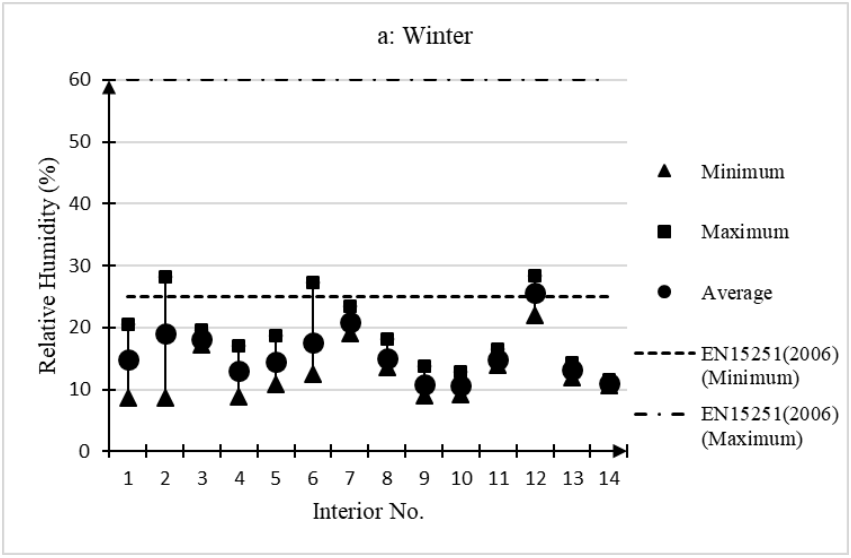


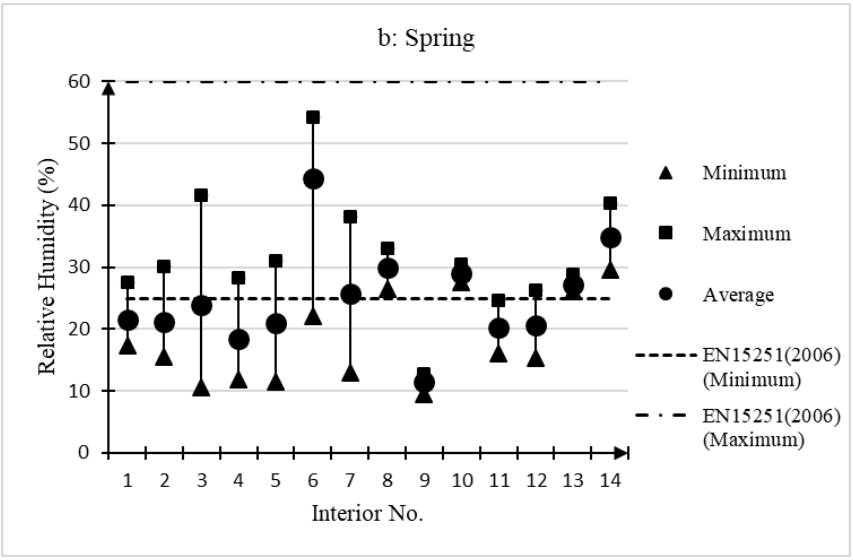
شکل ۴-۴: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر دمای هوا (AT) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

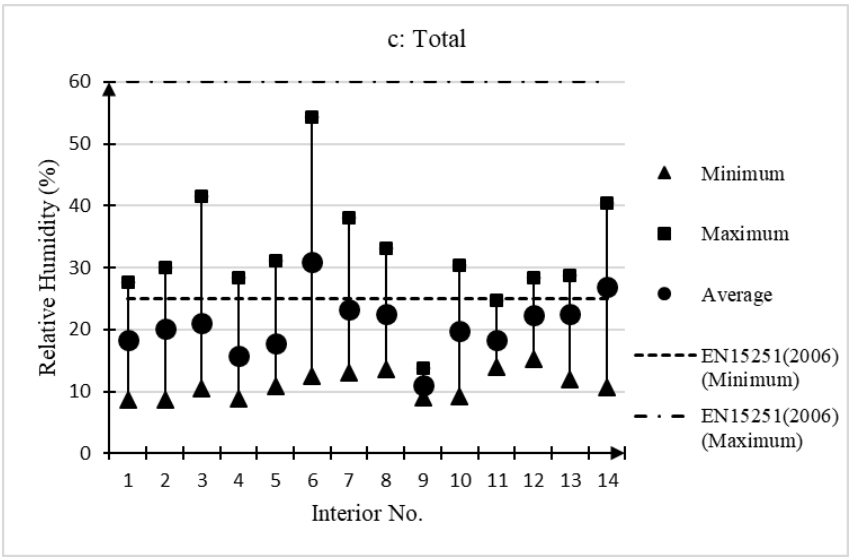
۱۷/۲ و ۲۰/۷ ^{o}C) است. در کل این پارامتر در فصل زمستان متغیرتر از فصل بهار بوده (بین ۱۷/۲ تا ۲۵/۹ ^{o}C) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی متفاوت است؛ درحالی‌که این پارامتر در فصل بهار روند یکنواختی داشته (بین ۲۱/۷ تا ۲۶/۶ ^{o}C) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی به هم نزدیک است.

در شکل ۴-۵ نمودارهای مربوط به پارامتر رطوبت نسبی (RH) آورده شده است. نتایج حاصل از شکل ۴-۵ نشان می‌دهند که رطوبت نسبی در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بیشتر است؛ که نشان‌دهنده‌ی وجود زمستان‌های سرد و خشک در منطقه شاهرود است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به مخزن کتابخانه مرکزی (۲۵/۶ درصد) و در فصل بهار و مجموع دو فصل در سالن غذاخوری برادران در پردیس (به ترتیب ۴۴/۴ و ۳۱ درصد) مشاهده شده است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به سالن مطالعه مرکزی برادران (۱۰/۷ درصد) و سالن مطالعه برادران در پردیس (۱۰/۸ درصد) و در فصل بهار و مجموع دو فصل مربوط به سالن مطالعه برادران در پردیس (به ترتیب ۱۱/۴ و ۱۱/۱ درصد) است. به‌طورکلی این پارامتر در هر دو فصل زمستان و بهار متغیر است (به ترتیب بین ۱۰/۷ تا ۲۵/۶ درصد و بین ۱۱/۴ تا ۴۴/۴ درصد)؛ اما در بهار تغییرات آن بیشتر بوده و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی متفاوت‌تر است.

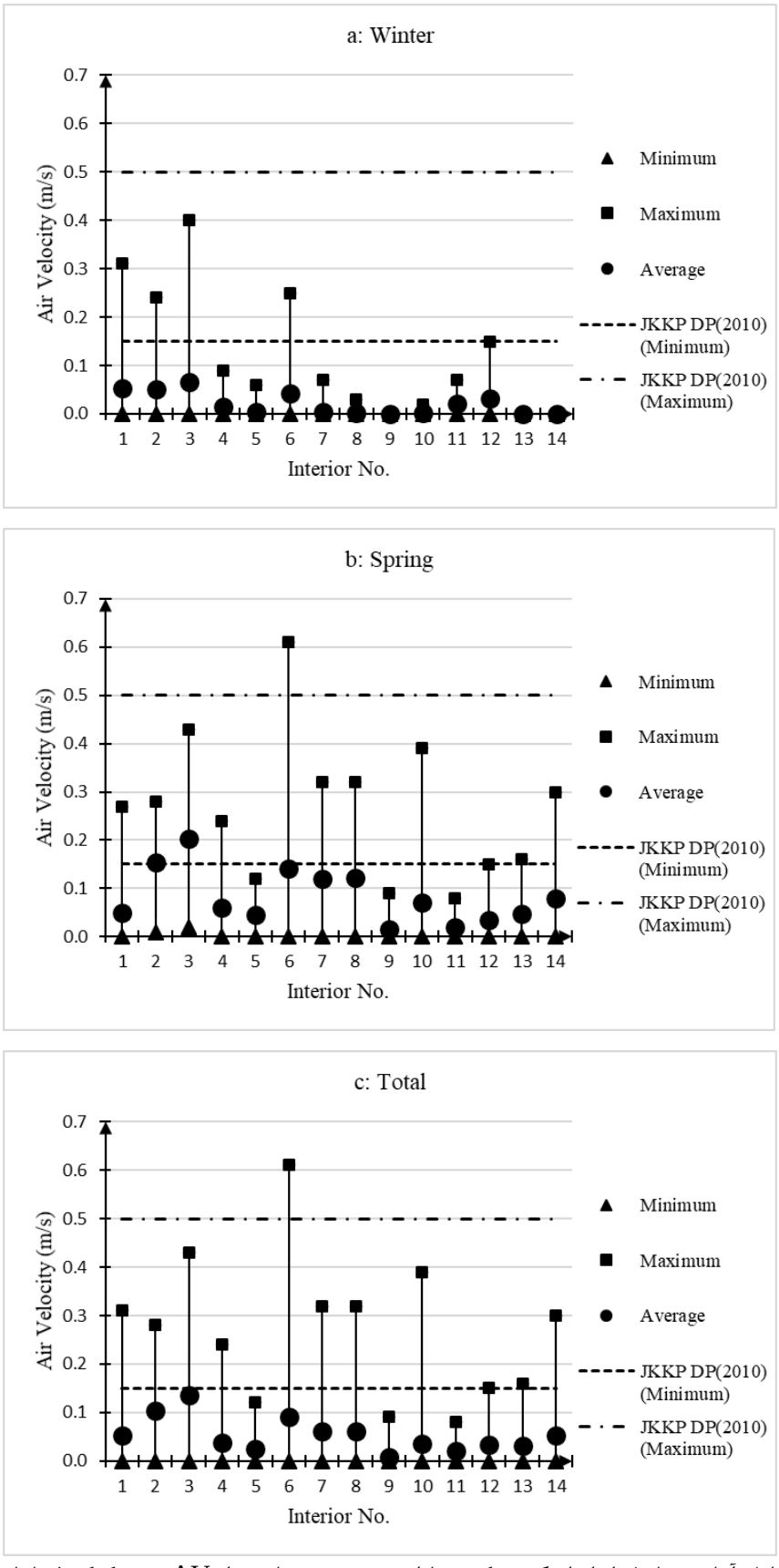
در شکل ۴-۶ نمودارهای مربوط به پارامتر سرعت جریان هوا (AV) آورده شده است. با توجه به شکل ۴-۶ ملاحظه می‌شود که سرعت جریان هوا در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بیشتر است؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین این پارامتر در فصل زمستان برای برخی از فضاهای داخلی موردبررسی دقیقاً برابر صفر، برای برخی فضاهای داخلی تقریباً برابر صفر و برای برخی دیگر دارای مقدار کمی است. علت این امر آن است که در فصل زمستان بازشوها مانند درها و پنجره‌ها عمدتاً بسته است، درنتیجه جریان هوا بین هوای خارج و داخل کمتر شکل گرفته و سرعت جریان هوا در فضای داخلی







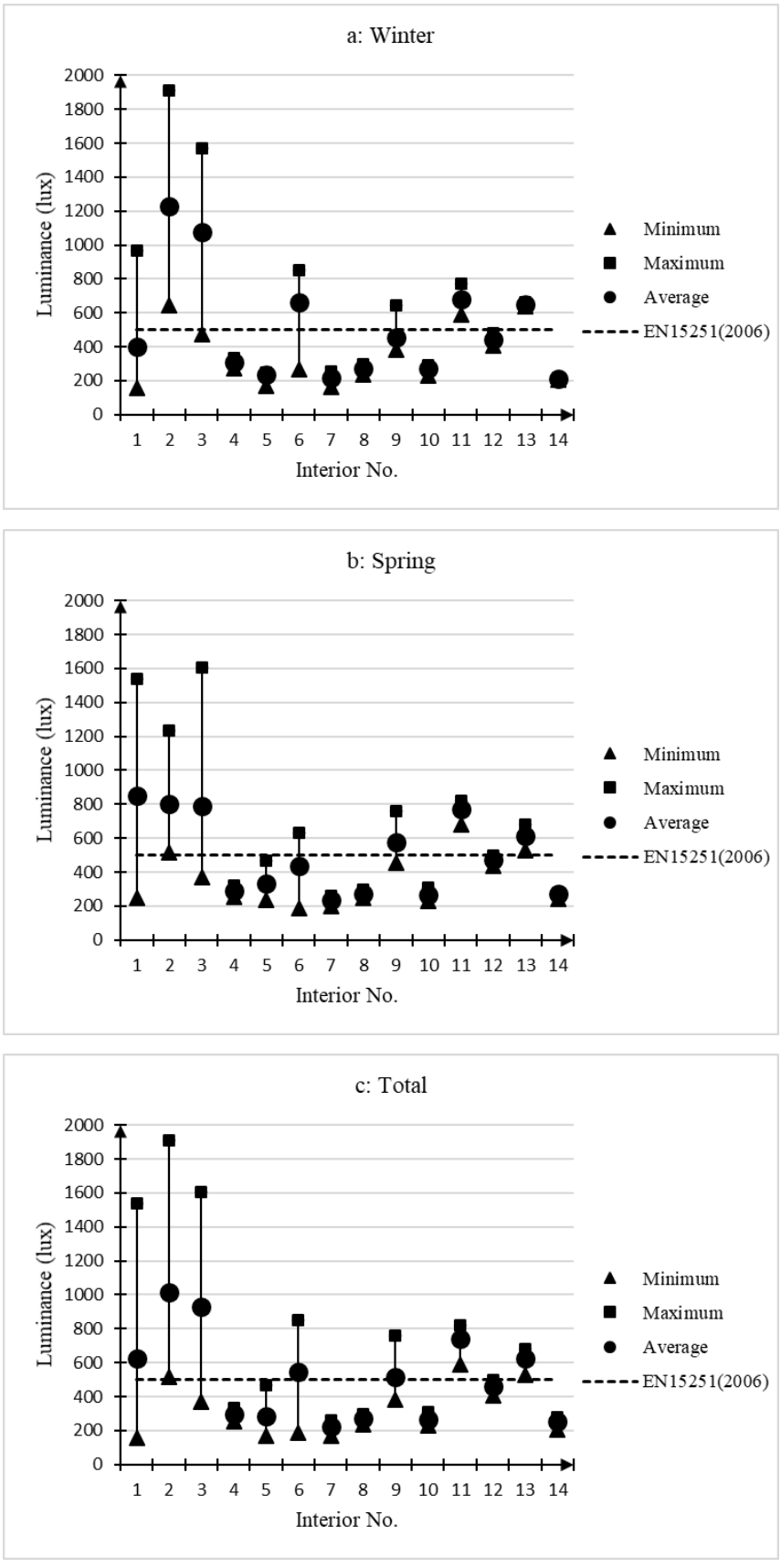
شکل ۴-۵: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر رطوبت نسبی (RH) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



شکل ۴-۶: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر سرعت جریان هوا (AV) به تفکیک فضاهای موردبررسی
(a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

نسبت به فصل بهار کمتر است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی برق و رباتیک و همچنین دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات به‌طور برابر با هم (به ترتیب ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۱ m/s) است؛ علت این امر می‌تواند وجود فضای باز گسترده در خارج از سرسرای ورودی این دو دانشکده باشد و باعث ایجاد جریان هوای بالا از خارج به داخل این فضای داخلی شود. همچنین طراحی داخلی و معماری این دو دانشکده دقیقاً یکسان است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به سالن مطالعه برادران در پردیس، سایت کامپیوتر برادران در پردیس و سایت کامپیوتر مرکزی برادران است که برابر صفر است و عملاً جریان هوایی در این فضاها برداشت نشده است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سالن مطالعه برادران در پردیس (۰/۰۱۵ m/s) و مخزن کتابخانه در پردیس (۰/۰۱۹ m/s)، و در مجموع دو فصل در سالن مطالعه برادران در پردیس (۰/۰۰۸ m/s) مشاهده شده است. در کل این پارامتر در فصل بهار متغیرتر بوده (بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۲۰۴ m/s) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی متفاوت است؛ درحالی‌که این پارامتر در فصل زمستان روند یکنواخت‌تری داشته (بین صفر تا ۰/۰۶۶ m/s) و مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی به هم نزدیک است.

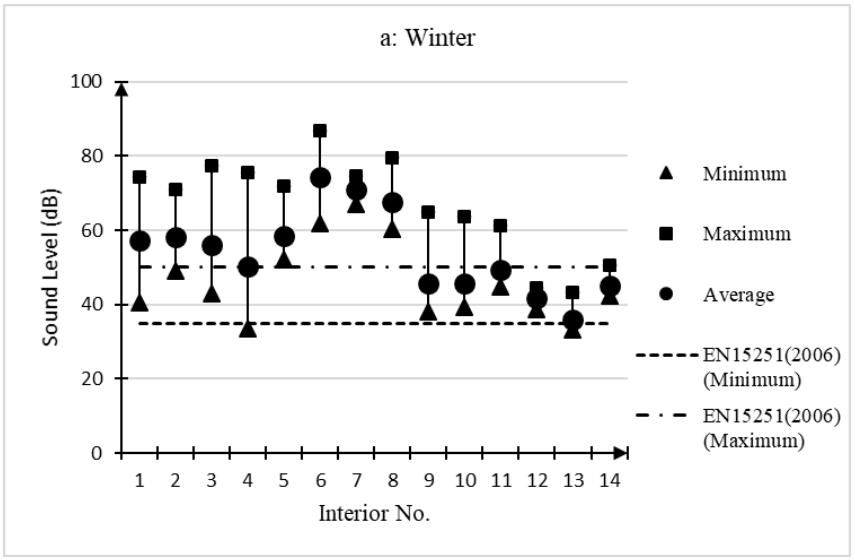
در شکل ۴-۷ نمودارهای مربوط به پارامتر روشنایی (L) آورده شده است. نتایج حاصل از شکل ۴-۷ نشان می‌دهند که روشنایی در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار و زمستان تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی بین میزان روشنایی در یک فضای داخلی در این دو فصل وجود ندارد. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی عمران و مکانیک (۸۵۰/۵ lux) و در فصل زمستان و مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی برق و رباتیک (به ترتیب ۱۲۳۰/۳ و ۱۰۱۴/۹ lux) است. طراحی دانشکده مهندسی برق و رباتیک و همچنین مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دارای نمای

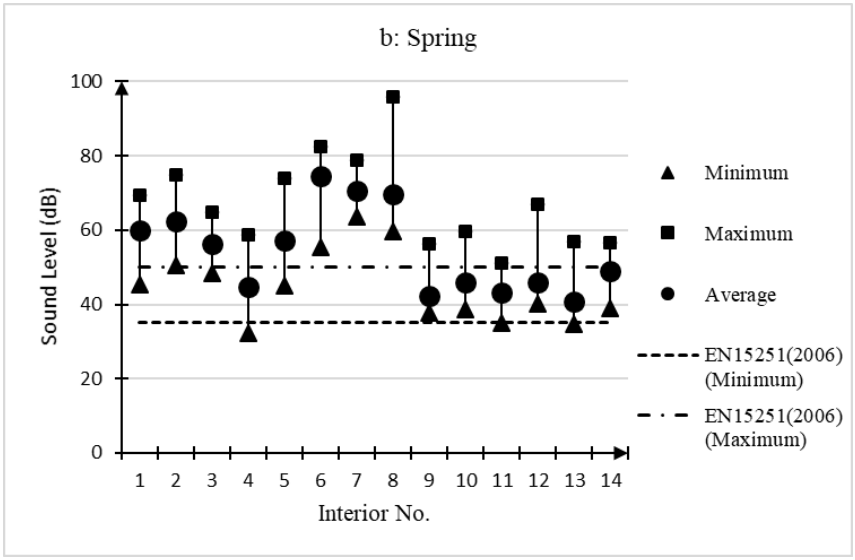


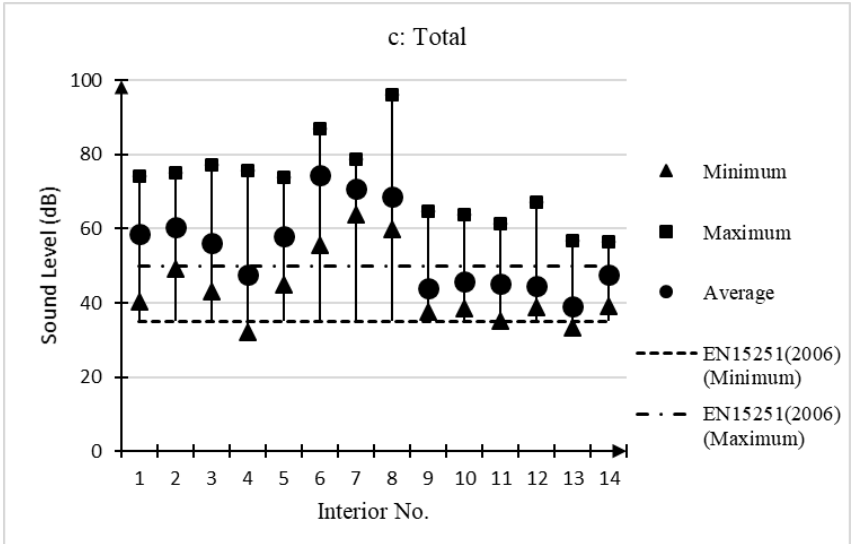
شکل ۴-۷: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر روشنایی (L) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

و نورگیر است؛ به‌گونه‌ای که روشنایی طبیعی را برای سرسراهای این دو دانشکده فراهم می‌کند. در شکل ۴-۷ نیز ملاحظه می‌شود که این دو دانشکده بهترین وضعیت روشنایی را در بین فضاهای داخلی دارند. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان مربوط به سایت کامپیوتر مرکزی برادران (۲۱۴/۴ lux) و سالن غذاخوری مرکزی برادران (lux ۲۱۵/۹)، و در فصل بهار و مجموع دو فصل در سالن غذاخوری مرکزی برادران (به ترتیب ۲۳۴ و lux ۲۲۵) مشاهده شده است؛ که نشان‌دهنده‌ی نبود نورگیری و عدم تأمین روشنایی مناسب در این فضای داخلی است. به‌طورکلی این پارامتر در هر دو فصل زمستان و بهار متغیر است (به ترتیب بین ۲۱۴/۴ تا lux ۱۲۳۰/۳ و بین ۲۳۴ تا lux ۸۵۰/۵)؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین آن‌ها در فضاهای داخلی موردبررسی نسبت به هم متفاوت است.

در شکل ۴-۸ نمودارهای مربوط به پارامتر میزان صدا (SL) آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۸ ملاحظه می‌شود، میزان صدا در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار و زمستان تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی بین میزان صدا در یک فضای داخلی در این دو فصل وجود ندارد. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع دو فصل مربوط به سالن غذاخوری برادران در پردیس (به ترتیب ۷۴/۴، ۷۴/۶ و dBa ۷۴/۵) است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، کمترین میانگین این پارامتر در فصل بهار مربوط به سایت کامپیوتر برادران در پردیس (۴۰/۷ dBa) و در فصل زمستان و مجموع دو فصل در سایت کامپیوتر برادران در پردیس (به ترتیب ۳۶ و dBa ۳۹/۱) برداشت شده است. در رابطه با این پارامتر، با دقت در شکل ۴-۸ می‌توان برای مجموع دو فصل زمستان و بهار، تمامی فضاهای داخلی را به سه دسته کلی تقسیم کرد؛ به‌گونه‌ای که میزان صدا در هر دسته تقریباً یکسان باشد: دسته‌ی اول شامل سالن‌های مطالعه، مخازن کتابخانه و سایت‌های کامپیوتر است، که ساکت‌ترین فضاهای داخلی دانشگاه هستند (بین ۳۹/۱ تا dBa ۴۷/۷)؛ دسته‌ی دوم سرسراهای ورودی دانشکده‌ها و سازمان‌مرکزی است، که دارای سروصدای بیشتری نسبت‌به دسته‌ی اول هستند (بین ۴۷/۶ تا dBa ۶۰/۴)؛ دسته‌ی سوم شامل







شکل ۴-۸: تحلیل آماری حاصل از اندازه‌گیری کمی پارامتر میزان صدا (SL) به تفکیک فضاهای موردبررسی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

سالن‌های غذاخوری است، که بیشترین میزان سروصدا و آلودگی صوتی را در بین فضاهای داخلی موردبررسی دارند (بین ۶۸/۶ تا ۷۴/۵ dBa).

۲-۲-۴-تحلیل آماری کلّی IEQ

به‌منظور تحلیل آماری برای تمامی فضاهای داخلی موردبررسی به‌صورت کلی، مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار حاصل از کل داده‌های کمی برای هریک از پارامترهای موردمطالعه طی فصل زمستان، فصل بهار و مجموع دو فصل در جدول ۴-۱ آورده شده است.

به‌منظور تحلیل و ارزیابی نتایج ارائه شده در جدول ۴-۱، مقادیر مجاز و محدوده‌های ارائه شده در استانداردهای مختلف برای هریک از پارامترهای موردمطالعه، از آیین‌نامه‌های مختلف موجود استخراج گردید. در ادامه به بحث پیرامون هریک از این پارامترها و مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات پیشین پرداخته شده است.

مطابق با استاندارد EN 13779 (2007)، غلظت آلاینده کربن دی‌اکسید (CO_2) در هوای بیرونی و فضای آزاد تقریباً برابر با ۳۵۰ تا ۴۰۰ ppm است[۵۴]. مقدار میانگین غلظت این آلاینده در هوای بیرونی و فضای آزاد دانشگاه صنعتی شاهرود، در مدت‌زمان انجام تحقیق برابر با ۳۸۸/۱ ppm ±۲۰ اندازه‌گیری شد؛ که این مقدار در بازه استاندارد مذکور قرار دارد. استانداردها و محدوده مجاز ازنظر آیین‌نامه‌های مختلف برای این آلاینده در جدول ۴-۲ آورده شده است. مکس وون پتنکوفر[1] در اواسط قرن نوزدهم، پیشنهاد داد که غلظت این آلاینده در هوای داخلی معادل با ppm ۱۰۰۰ نگه‌داشته شود. این مقدار که به‌عنوان عدد پتنکوفر شناخته می‌شود، به مدت ده‌ها سال معیاری برای معرفی کیفیت هوای داخلی مطلوب محسوب گردید[۵۴].

[1] Max Von Pettenkofer

جدول ۴-۱: تحلیل آماری کلی حاصل از اندازه‌گیری کمّی داده‌ها برای هریک پارامترهای موردمطالعه در فصول زمستان و بهار و مجموع دو فصل

Parameters	Season	Minimum	Maximum	Average	S.D[1]
	Winter	379	1095	576.1	157.2
	Spring	343	846	459	102.8
	Total	343	1095	513.1	143.1
	Winter	0	5	0.29	0.82
	Spring	0	0	0	0
	Total	0	5	0.13	0.57
	Winter	0	32	5.9	5.1
	Spring	2	38	17.2	8.1
	Total	0	38	12.0	8.9
	Winter	13.6	26.5	21.8	2.6
	Spring	19.5	27.3	24.2	1.6
	Total	13.6	27.3	23.1	2.4
	Winter	8.6	28.4	15.6	5.1
	Spring	9.5	54.3	25	9.8
	Total	8.6	54.3	20.6	9.2
	Winter	0	0.40	0.02	0.06
	Spring	0	0.61	0.08	0.09
	Total	0	0.61	0.06	0.08
	Winter	154.7	1912	509.5	371.4
	Spring	188.5	1608	497.6	273.2
	Total	154.7	1912	503.1	322
	Winter	33.2	86.8	55.9	12.3
	Spring	32.1	96	54.5	12.4
	Total	32.1	96	55.1	12.3

[1] Standard Deviation

جدول ۴-۲: استانداردها و محدوده مجاز غلظت آلاینده کربن دی‌اکسید (CO_2) در فضای داخلی برحسب ppm ($CO_{2\ Outdoor}$ = 400ppm)

Standards	Limits (ppm)
[55] Max Von Pettenkofer Number (1858)	1000
[53] DIN 1946-2 (1994)	1500
[51] EN 15251 (2006)	<900
[54] EN 13779 (2007)	(800-1000)
[38] JKKP DP(S) 127/379/4-39 (2010)	<1000
[56] LEED NC v.4 (2013)	<1100
[50] INSO 10847-26 (2016)	(800-1000)

با توجه به جدول ۴-۱، مقدار میانگین غلظت آلاینده کربن‌دی‌اکسید (CO_2) برحسب ppm در فصل زمستان برابر ۱۵۷/۲±۵۷۶/۱ و در بهار برابر ۱۰۲/۸±۴۵۹ و مجموع دو فصل برابر ۱۴۳/۱±۵۱۳/۱ بوده است؛ که در مقایسه با استانداردهای غلظت این آلاینده در هوای فضای داخلی، مقادیر میانگین این پارامتر در فصل‌های زمستان و بهار و مجموع دو فصل، در حد مجاز تمامی استانداردها قرار دارد. جهت مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحقیق حاضر برای این پارامتر با دیگر تحقیقات مشابه می‌توان چنین بیان نمود که اسدی و همکاران (۲۰۱۴) کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ)[1] دارای سیستم تهویه مطبوع[2] در دانشگاه تناگا ناسیونال[3] مالزی را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج حاصل برای میانگین غلظت آلاینده کربن‌دی‌اکسید (CO_2) برحسب ppm معادل ۱۳۹/۳±۷۴۰/۷ اندازه‌گیری گردید[۴۷]؛ درنتیجه مقدار میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر کمتر از مقدار به‌دست‌آمده در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی است. از طرفی محدوده مجاز این آلاینده در استاندارد کیفیت هوای فضاهای داخلی مالزی (۲۰۱۰)، کوچک‌تر از ppm ۱۰۰۰ است[۳۸]؛ درنتیجه مقدار میانگین این پارامتر هر دو دانشگاه مطرح‌شده در حد مجاز این استاندارد است. در مطالعه‌ای دیگر

[1] Indoor Environmental Quality
[2] Air Conditioning
[3] Universiti Tenaga Nasional, Malaysia

یون[1] و همکاران (۲۰۱۱) غلظت آلاینده کربن‌دی‌اکسید (CO_2) را در هوای داخلی و بیرونی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی در کشور کره اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که غلظت این آلاینده در هوای داخلی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی برحسب ppm به ترتیب برابر با ۳۲۸/۳±۸۴۷/۱ و ۱۰۱/۸±۶۰۷/۸ بود[۳۳]؛ که از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برحسب ppm برابر ۱۴۳/۱±۵۱۳/۱) بیشتر است. همچنین غلظت این آلاینده در هوای بیرونی پیش‌دبستانی‌های شهری و روستایی برحسب ppm به ترتیب برابر با ۳۶/۳±۴۷۸/۲ و ۱۸/۳±۴۵۴/۸ بود[۳۳]. ملاحظه می‌شود که این مقادیر از مقدار میانگین این پارامتر در فضای آزاد تحقیق حاضر (برحسب ppm برابر با ۲۰/۱±۳۸۸) بیشتر است. در تحقیقی مشابه، سوفوگلو[2] و همکاران (۲۰۱۵) غلظت پس‌زمینه آلاینده CO_2 را در آشپزخانه رستوران دانشکده معماری که از مارگارین برای برشته کردن استفاده می‌کرد اندازه گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که تحت شرایط عملکردی معمولی، میانگین غلظت این آلاینده در زمان قبل از فعالیت برشته کردن برحسب ppm برابر ۵۶۶ بود[۳۴]؛ که از مقادیر این پارامتر در فضاهای سالن غذاخوری برادران در پردیس، سالن غذاخوری مرکزی برادران و سالن غذاخوری مرکزی خواهران، موردبررسی در تحقیق حاضر (به ترتیب در مجموع دو فصل برحسب ppm برابر ۱۵۲/۲±۵۹۲/۷، ۱۲۷/۷±۵۹۴/۸ و ۱۲۷/۵±۶۱۰/۱) کمتر است. در مطالعه‌ی دیگری، لی[3] و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ[4] ارزیابی کردند؛ که مقدار میانگین غلظت آلاینده CO_2 در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با ppm ۳۱۶±۱۰۶۵ اندازه‌گیری شد[۴۸]. ملاحظه می‌شود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برابر ppm ۱۴۳/۱±۵۱۳/۱) بیشتر (تقریباً دو برابر)

[1] Yoon
[2] Sofuoglu
[3] Lee
[4] Hong Kong Polytechnic University

است. در تحقیقی مشابه که بر روی مدارس ابتدایی شهرستان مایا[1] در کشور پرتقال توسط ماکدو[2] و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، مشخصات IEQ مورد ارزیابی قرار گرفت و میانگین غلظت آلاینده CO_2 در فضاهای داخلی مدارس موردبررسی برابر با ppm ۹۹۹±۴۷۷ به دست آمد[۲۶]. مشاهده می‌شود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برحسب ppm برابر ۱۴۳/۱±۵۱۳/۱) بیشتر است. در کل در رابطه با این پارامتر، از مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر با نتایج مطالعات پیشین مشابه، می‌توان بیان نمود که مقادیر میانگین غلظت آلاینده CO_2 در تحقیق حاضر، کمتر از مقادیر پارامتر مذکور در تحقیقات مشابه است.

مقدار میانگین غلظت آلاینده ترکیبات آلی فرار (VOCs) برحسب ppm در فصل زمستان برابر ۰/۰±۲۹/۸۲ و در بهار برابر صفر و در مجموع دو فصل برابر ۰/۱۳±۰/۵۷ بوده است (جدول ۴-۱)؛ درواقع مقدار ناچیزی از این آلاینده در فضاهای داخلی موردتحقیق کشف شده است. مطابق با استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰) مقدار مجاز برای این آلاینده برابر ppm ۳ است[۳۸]. درواقع در تمامی فضاهای داخلی موردبررسی در تمامی اوقات، غلظت آلاینده VOCs کمتر از حد مجاز استاندارد بوده است. در تحقیقات مشابه تساکاس[3] و همکاران (۲۰۱۱) نیز کیفیت هوای داخلی برج کنترل فرودگاه بین‌المللی آتن را موردمطالعه قراردادند. غلظت این آلاینده در فضاهای داخلی موردبررسی کمتر از مقادیر حد مجاز مشخص شد؛ که مطابق با نتایج حاصل در تحقیق حاضر برای این پارامتر است. همچنین مشخص شد که استعمال دخانیات و سیگار مهم بوده و بر غلظت این آلاینده اثر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که غلظت این آلاینده در اثر مصرف سیگار تقریباً ۲/۵ برابر بالاتر از اندازه‌گیری‌های بازه زمانی بدون استعمال دخانیات است[۳۵]. لازم به ذکر است که استعمال دخانیات و مصرف سیگار در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (دانشگاه صنعتی شاهرود) ممنوع است؛

[1] Maia
[2] Macedo
[3] Tsakas

لذا این امر هم می‌تواند دلیلی دیگر بر کیفیت مناسب فضاهای داخلی موردبررسی در دانشگاه صنعتی شاهرود ازنظر مقدار آلاینده VOCs باشد. کومار[1] و همکاران (۲۰۱۴) غلظت آلاینده VOCs در هوای داخلی و خطرات سلامتی وابسته به آن را در کتابخانه دانشگاه جاواهارهال نِهرو[2] در دهلی‌نو هندوستان مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آلاینده VOCs برای هوای داخلی در زمستان برابر ۴۶۵/۸ $\mu g/m^3$ بود[۳۶]؛ درنتیجه مقادیر بسیار ناچیزی از این پارامتر مشاهده شده است که مطابق با مطالعه انجام‌شده در تحقیق حاضر است. سوفوگلو و همکاران (۲۰۱۵) غلظت پس‌زمینه آلاینده VOCs را در آشپزخانه رستوران دانشکده معماری که از مارگارین برای برشته کردن استفاده می‌کرد اندازه گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که تحت شرایط عملکردی معمولی، میانگین غلظت این آلاینده در زمان قبل از فعالیت برشته کردن برحسب ppm برابر ۰/۰۱۵۱ بوده است[۳۴]؛ که مشابه با مقادیر این پارامتر در فضاهای سالن غذاخوری برادران در پردیس، سالن غذاخوری مرکزی برادران و سالن غذاخوری مرکزی خواهران، موردبررسی در تحقیق حاضر (به ترتیب در مجموع دو فصل برحسب ppm برابر ۰/۵±۰/۱، ۱/۰۹±۰/۴۳ و ۰/۸۷±۰/۴۴) کمتر از حد مجاز استاندارد بوده است. در مطالعه مشابهی که بر روی مدارس ابتدایی شهرستان مایا در کشور پرتقال توسط ماکدو و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، مشخصات IEQ ارزیابی شد؛ و میانگین غلظت آلاینده VOCs در فضاهای داخلی مدارس ابتدایی موردبررسی برابر با ppm ۰/۲۸±۰/۴۱ اندازه‌گیری شد[۲۶]. مشاهده می‌شود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برحسب ppm برابر ۰/۵۷±۰/۱۳) بیشتر است. به‌طورکلی در رابطه با این پارامتر، با مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج سایر تحقیقات مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر میانگین غلظت آلاینده VOCs در تحقیق حاضر و سایر مطالعات مشابه، مقادیری ناچیز و بسیار کمتر از حد مجاز است.

[1] Kumar
[2] Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India

جدول ۴-۱ نشان می‌دهد که مقدار میانگین غلظت آلاینده ذرات معلق $PM_{2.5}$ برحسب $\mu g/m^3$ در فصل زمستان برابر ۵/۱±۵/۹ و در فصل بهار برابر ۸/۱±۱۷/۲ و در مجموع دو فصل برابر ۸/۹±۱۲ بوده است. استاندارد WHO (2008) برای میانگین روزانه این آلاینده برابر ۲۵ $\mu g/m^3$[۳۹] و استاندارد USEPA (2006) برای میانگین روزانه این آلاینده برابر ۳۵ $\mu g/m^3$ است[۴۶]؛ بنابراین مقادیر میانگین این پارامتر در فصول زمستان و بهار و مجموع دو فصل، در محدوده مجاز هر دو استاندارد ذکرشده قرار دارد. در تحقیقی مشابه، اوه[1] و همکاران (۲۰۱۵) نیز غلظت ذرات معلق در طبقات مختلف از یک ساختمان در سئول کره جنوبی را موردمطالعه قراردادند. درنتیجه این مطالعه، میانگین غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در طبقات اول، دوم، پنجم و هشتم این ساختمان در طول فصل زمستان برحسب $\mu g/m^3$ به ترتیب برابر ۴۰، ۳۵، ۴۵ و ۶۰ اندازه‌گیری شد[۴۰]. ملاحظه می‌شود که این مقادیر از مقادیر میانگین این پارامتر در تحقیق حاضر بیشتر است. مطابق با استاندارد IAQ کره (۲۰۱۵)، میانگین روزانه (۲۴ ساعته) برای غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ معادل ۵۰ $\mu g/m^3$ است[۴۰]؛ درنتیجه مطابق این استاندارد، مقادیر میانگین این پارامتر در تحقیق حاضر در محدوده مجاز است. در مطالعه‌ای زوزدزیاک[2] و همکاران (۲۰۱۶) نیز غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را در مدارس شهر وروکلاو[3] کشور لهستان اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل نشان داد که میانگین روزانه (۲۴ ساعته) برای غلظت این آلاینده برابر ۲۶±۳۰ $\mu g/m^3$ بود[۴۱]؛ که بیشتر از مقدار میانگین به‌دست‌آمده برای این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برحسب $\mu g/m^3$ برابر ۸/۹±۱۲) است. در مطالعه‌ی دیگری مک‌نایتون[4] و همکاران (۲۰۱۷) نیز غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را در طول سال تحصیلی در مدارس عمومی ایالت ماساچوست[5] در آمریکا موردتحقیق قراردادند؛ که میانگین پارامتر مذکور برحسب $\mu g/m^3$ برابر ۷/۰±۲۲/۹۵ اندازه‌گیری شد[۴۲]؛ که کمتر از مقدار میانگین برای این پارامتر در تحقیق حاضر

[1] Oh
[2] Zwozdziak
[3] Wroclaw
[4] MacNaughton
[5] Massachusetts

(مجموع دو فصل برحسب $\mu g/m^3$ برابر ۸/۹±۱۲) است. مقدار استاندارد کیفیت هوای ملی آمریکا برای این پارامتر برابر $\mu g/m^3$ ۱۲ است[۴۲]؛ درنتیجه مقدار میانگین برای این پارامتر در تحقیق حاضر در حد این استاندارد است.

مقدار میانگین دمای هوا برحسب ^oC در فصل زمستان برابر ۲/۶±۲۱/۸ و در فصل بهار برابر ۲/۶±۲۴/۱ و در مجموع دو فصل برابر ۲/۴±۲۳/۱ بوده است (جدول ۴-۱). مطابق با استاندارد EN 15251 (2006)، ضوابط طراحی برای شرایط دمایی مطلوب محیط داخلی به‌گونه‌ای است که دمای هوا باید در فصل زمستان بین ۲۰ تا ^oC ۲۴ و در فصل تابستان بین ۲۲ تا ^oC ۲۷ باشد[۵۱]. مطابق با استاندارد IAQ مالزی (۲۰۱۰) محدوده‌ی مجاز برای این پارامتر بین ۲۳ تا ^oC ۲۶ است[۳۸]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دمای هوا در فضاهای داخلی موردبررسی در فصول زمستان و بهار متعارف بوده و در محدوده‌ی استانداردهای ذکرشده جای می‌گیرند. در تحقیقی مشابه، اسدی و همکاران (۲۰۱۴) IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی را مورد ارزیابی قراردادند؛ که میانگین دمای هوا ^oC ۲/۷±۲۳/۱ اندازه‌گیری گردید[۴۷]. ملاحظه می‌شود که این مقدار با مقدار میانگین برای این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل ^oC ۱/۴±۲۳/۲) تقریباً برابر است. در مطالعه‌ی دیگری، لی و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ ارزیابی کردند؛ که مقدار میانگین دمای هوا در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با ^oC ۱/۴±۲۲/۱ اندازه‌گیری شد[۴۸]. می‌توان بیان نمود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل ^oC ۲/۴±۲۳/۱) کمی کمتر است. در تحقیقی مشابه که ماکدو و همکاران (۲۰۱۳) در مدارس ابتدایی شهرستان مایا در کشور پرتقال انجام دادند، مشخصات IEQ موردمطالعه قرار گرفت؛ درنتیجه میانگین دمای هوا در فضاهای داخلی مدارس موردبررسی برابر با ^oC ۲/۸±۲۰/۳ به دست آمد[۲۶]. مشاهده می‌شود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل ^oC ۲/۴±۲۳/۱) کمتر است.

با توجه به جدول ۴-۱، مقدار میانگین رطوبت نسبی برحسب درصد در فصل زمستان برابر ۱۵/۵±۶/۱ و در فصل بهار برابر ۲۵±۹/۸ و در مجموع دو فصل برابر ۲۰/۶±۹/۲ بوده است. مطابق با استاندارد EN 15251 (2006)، ضوابط طراحی برای رطوبت نسبی محیط داخلی به‌گونه‌ای است که برای شرایط رطوبت افزایی (در هوای خشک) برابر ٪ ۲۵ و برای شرایط رطوبت‌زدایی (در هوای مرطوب) برابر ٪ ۶۰ است؛ به عبارتی رطوبت نسبی مطلوب بین ۲۵ تا ٪ ۶۰ است[۵۱]. مطابق با استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰) محدوده‌ی مجاز برای این پارامتر بین ۴۰ تا ٪ ۷۰ است[۳۸]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان رطوبت نسبی موجود در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصول زمستان و بهار کمتر از مقدار مطلوب بوده و سیستم تهویه مطبوع در این فضاها، رطوبت موردنیاز را تأمین نمی‌کنند. در تحقیقی مشابه که اسدی و همکاران (۲۰۱۴) در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی در مورد IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع انجام دادند، میانگین رطوبت نسبی برابر ٪ ۶۷/۵±۷/۶ بود[۴۷]؛ که این مقدار از مقدار میانگین این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برابر ٪ ۲۰/۶±۹/۲) بسیار بیشتر است. در مطالعه‌ی دیگری، لی و همکاران (۲۰۱۱) نیز ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ مورد ارزیابی قراردادند؛ و مقدار میانگین رطوبت نسبی را در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با ٪ ۵۹/۷±۷/۶ اندازه‌گیری کردند[۴۸]؛ که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برابر ٪ ۲۰/۶±۹/۲) بسیار بیشتر است. در تحقیقی دیگر که در مدارس ابتدایی شهرستان مایا در کشور پرتقال توسط ماکدو و همکاران (۲۰۱۳) صورت گرفت، مشخصات IEQ مطالعه شد؛ که میانگین رطوبت نسبی در فضاهای داخلی مدارس موردبررسی برابر با ٪ ۶۰/۳±۸/۳ به دست آمد[۲۶]. مشاهده می‌شود که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برابر ٪ ۲۰/۶±۹/۲) بسیار بیشتر است. به‌طورکلی در رابطه با این پارامتر، با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر با نتایج

سایر تحقیقات مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر میانگین رطوبت نسبی در تحقیق حاضر، بسیار کمتر از مقادیر پارامتر مذکور در مطالعات مشابه است.

مقدار میانگین سرعت جریان هوا برحسب m/s در فصل زمستان برابر ۰/۰۶±۰/۰۲ و در فصل بهار برابر ۰/۰۹±۰/۰۸ و در مجموع دو فصل برابر ۰/۰۸±۰/۰۶ بوده است (جدول ۴-۱). مطابق با استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰) محدوده‌ی مجاز برای این پارامتر برحسب m/s بین ۰/۱۵ تا ۰/۵ است[۳۸]؛ ازاین‌رو می‌توان گفت که سرعت جریان هوا در فضاهای داخلی موردبررسی پایین است و جریان هوا در این فضاها ملموس و قابل احساس نیست. در مطالعه‌ای مشابه که اسدی و همکاران (۲۰۱۴) IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی را مورد ارزیابی قراردادند؛ مقدار میانگین سرعت جریان هوا را m/s ۱۲/۰۴±۰/۰) مشخص نمودند[۴۷]. ملاحظه می‌شود که این مقدار از مقدار میانگین برای این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل m/s ۰۶/۰۸±۰/۰) بیشتر (تقریباً دو برابر) است. در تحقیق دیگری، لی و همکاران (۲۰۱۱) نیز ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ کنگ ارزیابی کردند؛ و مقدار میانگین سرعت جریان هوا را در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با m/s ۵/۱±۰/۰ مشخص نمودند[۴۸]؛ که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل m/s ۰۶/۰۸±۰/۰) بسیار بیشتر است. در کل در رابطه با این پارامتر، از مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر با نتایج مطالعات پیشین مشابه، می‌توان بیان نمود که مقادیر میانگین سرعت جریان هوا در تحقیق حاضر، بسیار کمتر از مقادیر پارامتر مذکور در تحقیقات مشابه است.

در جدول ۴-۱ مقدار میانگین روشنایی برحسب lux در فصل زمستان برابر ۳۷۱/۴±۵۰۹/۵ و در فصل بهار برابر ۲۷۳/۲±۴۹۷/۶ و در مجموع دو فصل برابر ۳۲۲±۵۰۳/۱ مشخص شده است. مطابق با استاندارد EN 15251 (2006)، برای ساختمان‌های آموزشی در فضاهای داخلی که از آن‌ها برای انجام

فعالیت استفاده می‌شود، باید مقدار روشنایی در حد lux ۵۰۰ نگه‌داشته شود؛ از طرفی در این استاندارد، ضوابط طراحی برای روشنایی محیط داخلی به‌گونه‌ای است که باید میزان روشنایی بیش از lux ۵۰۰ باشد[۵۱]. مطابق با استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰) محدوده‌ی مجاز برای این پارامتر برحسب lux بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ است[۳۸]؛ بنابراین می‌توان گفت که مطابق این استانداردها، روشنایی فضاهای داخلی موردبررسی در حد مطلوب است. در تحقیقی مشابه که اسدی و همکاران (۲۰۱۴) در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی درباره‌ی IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع انجام دادند، میانگین روشنایی برای اتاق‌های اداری برابر lux ۱/۱±۳۵۶/۹۷ و میانگین روشنایی برای فضاهای دانشجویی برابر lux ۷/۹±۴۴۶/۱۱۳ اندازه‌گیری شد[۴۷]. ملاحظه می‌شود که این مقادیر از مقدار میانگین این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل lux ۱±۵۰۳/۳۲۲) کمتر است. در مطالعه‌ی دیگری نیز، ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ توسط لی و همکاران (۲۰۱۱) ارزیابی شد؛ و مقدار میانگین روشنایی در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با lux ۱۱۵±۳۶۹ به دست آمد[۴۸]؛ که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل lux ۱±۵۰۳/۳۲۲) کمتر است. به‌طورکلی در رابطه با این پارامتر، با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر، با نتایج سایر تحقیقات مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر میانگین روشنایی در تحقیق حاضر، بیشتر از مقادیر پارامتر مذکور در مطالعات مشابه است.

مقدار میانگین میزان صدا برحسب dBa در زمستان برابر ۱۲/۳±۵۵/۹ و در بهار برابر ۱۲/۴±۵۴/۵ و در مجموع دو فصل برابر ۱۲/۳±۵۵/۱ بوده است (جدول ۴-۱). مطابق با استاندارد EN (2006) 15251، محدوده‌ی معمول سطح صدا برای مدارس و دانشگاه‌ها، در فضاهای داخلی که دانشجویان از آن‌ها برای انجام فعالیت استفاده می‌کنند، ۳۰ تا dBa ۴۰ و برای سرسراها و سایر فضاهای داخلی سرپوشیده ۳۵ تا dBa ۵۰ است. همچنین در این استاندارد ضوابط طراحی شنوایی برای محیط داخلی، به‌گونه‌ای است که سروصدای فضای داخلی باید کمتر از dBa ۳۵ باشد[۵۱]. مطابق با

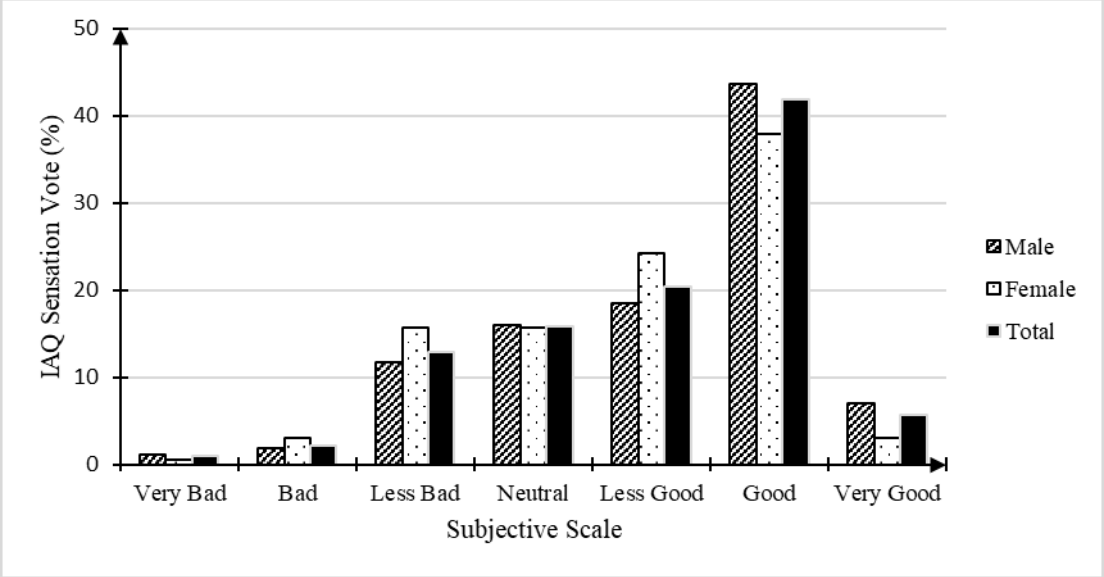
استاندارد کیفیت هوای فضای داخلی مالزی (۲۰۱۰) محدوده‌ی مجاز برای این پارامتر برای اتاق‌های اداری، کمتر از dBa ۵۰ و برای فضاهای دانشجویی، بین ۵۰ تا dBa ۷۰ است[۳۸]. با توجه به استاندارد اروپایی مطرح‌شده، میزان صدا در فضاهای داخلی موردبررسی، بیش‌ازحد معمول بوده و می‌توان گفت که در فضاهای داخلی موردبررسی با آلودگی صوتی مواجه هستیم. در مطالعه‌ای مشابه اسدی و همکاران (۲۰۱۴) نیز IEQ دارای سیستم تهویه مطبوع در دانشگاه تناگا ناسیونال مالزی را مورد ارزیابی قراردادند. در نتایج این مطالعه میانگین میزان صدا برای اتاق‌های اداری برابر ۴۳/۷±۶/۰dBa و میانگین میزان صدا برای فضاهای دانشجویی برابر dBa ۵۶/۸±۳/۳ به‌دست‌آمده بود[۴۷]. مشاهده می‌شود که میانگین صدا برای فضاهای دانشجویی با مقدار میانگین برای این پارامتر در تحقیق حاضر (مجموع دو فصل برحسب dBa برابر ۵۵/۱±۱۲/۳) تقریباً برابر است. در تحقیق دیگری، لی و همکاران (۲۰۱۱) نیز ارتباط بین عملکرد یادگیری دانشجویان با IEQ را در فضاهای تدریس دارای تهویه مطبوع دانشگاه صنعتی هنگ‌کنگ ارزیابی کردند؛ و مقدار میانگین میزان صدا را در فضاهای تدریس موردبررسی برابر با dBa ۶۱/۲±۲/۷ مشخص نمودند[۴۸]؛ که این مقدار از میانگین این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی تحقیق حاضر (مجموع دو فصل dBa ۵۵/۱۲±۱/۳) بیشتر است.

۳-۴- نتایج حاصل از ارزیابی کیفی IEQ

۱-۳-۴- ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی

به‌منظور ارزیابی کیفی، برای هریک از پارامترهای موردمطالعه، "احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی"، از طریق پرسشنامه مورد سؤال قرار گرفت (شکل ۳-۱). پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، برای هریک از پارامترهای موردمطالعه، در شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۵ آمده است.

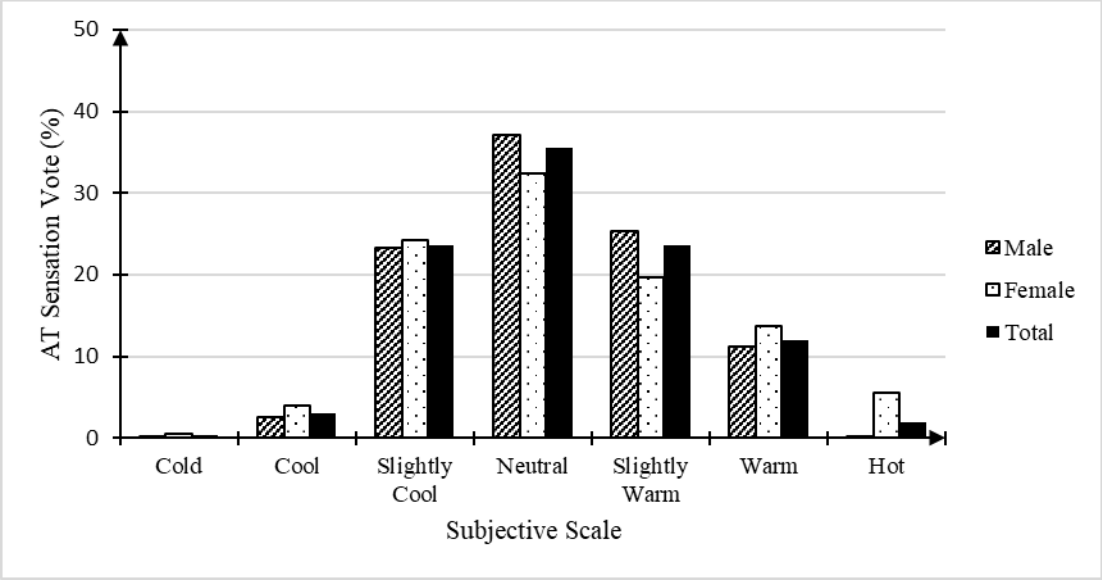
با توجه به شکل ۴-۹ ملاحظه می‌شود که در رابطه با سؤال "احساس کیفیت هوای فضای داخلی"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خوب" بوده است. از طرفی تعداد نظرات مساعد و با کیفیت بالا (کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب) نسبت به نظرات نامساعد و با کیفیت پایین (کمی‌بد، بد، خیلی‌بد) بسیار بیشتر است؛ که نشان‌دهنده‌ی رضایت‌مندی بالای ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی از IAQ است. همچنین تعداد نظرات مساعد و با کیفیت بالا (کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب) برای مردان نسبت به زنان بیشتر است؛ که نشان می‌دهد ازنظر مردان نسبت به زنان، IAQ موردبررسی بهتر است (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس کیفیت هوای فضاهای داخلی (IAQ)

با توجه به شکل ۴-۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که در رابطه با سؤال "احساس دمای هوا"، پاسخ بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خنثی" بوده است؛ که نشان‌دهنده‌ی وجود دمای متعادل و مطلوب (نه گرم و نه سرد) در فضاهای داخلی موردبررسی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در این فضاها است. از طرفی تعداد نظرات دمای بالا (کمی‌گرم، گرم، خیلی‌گرم) نسبت به نظرات دمای پایین (کمی‌سرد، سرد، خیلی‌سرد) کمی بیشتر است؛ اما به‌طورکلی می‌توان گفت که

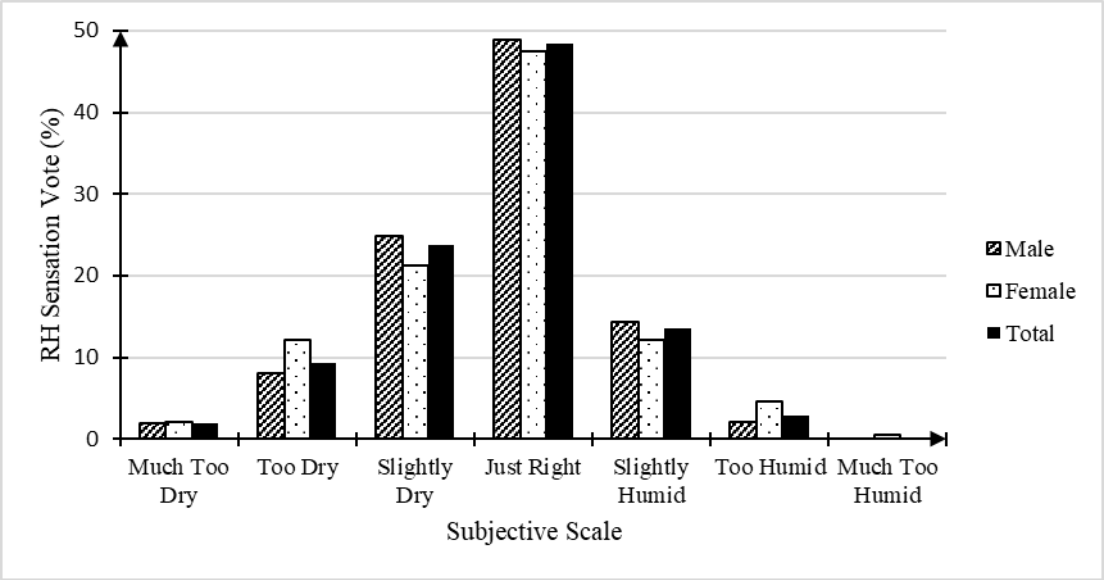
نظرات در رابطه با این سؤال از توزیع نرمال[1] پیروی می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود زنان نسبت به مردان دمای هوای گرم‌تری را در فضاهای داخلی موردبررسی احساس کرده‌اند (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس دمای هوا (AT) در فضاهای داخلی

همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ مشخص است، در رابطه با سؤال "احساس رطوبت نسبی"، پاسخ بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "متعادل" بوده است؛ که نشان‌دهنده‌ی وجود شرایط متعادل و مطلوب (نه مرطوب و نه خشک) در فضاهای داخلی موردبررسی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در این فضاها است. از طرفی تعداد نظرات رطوبت پایین (کمی‌خشک، خشک، خیلی‌خشک) نسبت به نظرات رطوبت بالا (کمی‌مرطوب، مرطوب، خیلی‌مرطوب) کمی بیشتر است؛ اما به‌طورکلی می‌توان گفت که نظرات در رابطه با این سؤال از توزیع نرمال پیروی می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که تفاوت چندانی بین احساس رطوبت نسبی در مردان و زنان دیده نمی‌شود؛ به‌طوری‌که تقریباً احساس یکسانی نسبت به این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند (شکل ۴-۱۱).

[1] Normal Distribution

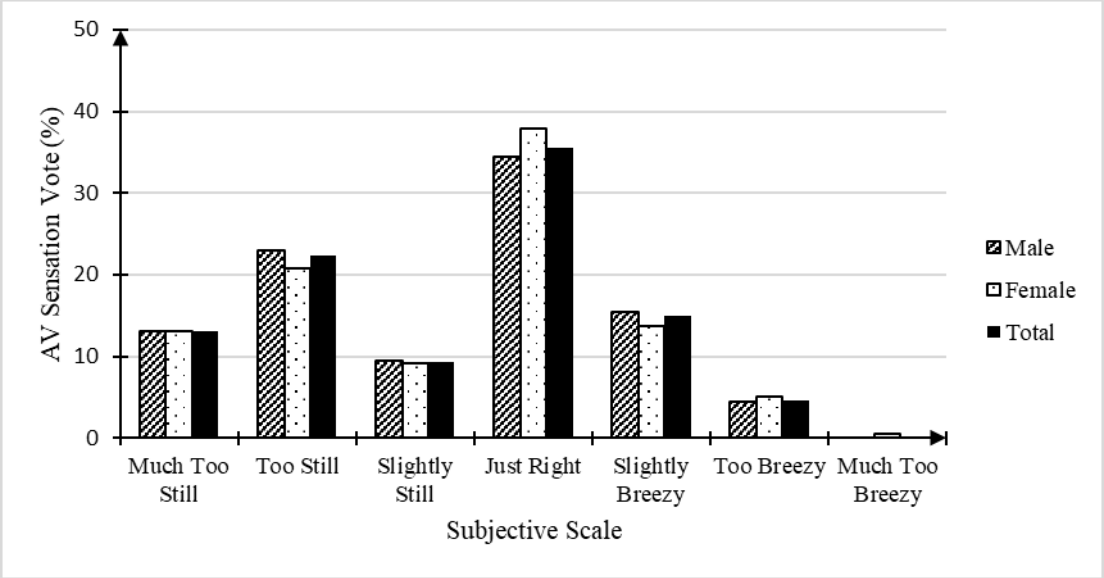


شکل ۴-۱۱: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس رطوبت نسبی (RH) در فضاهای داخلی

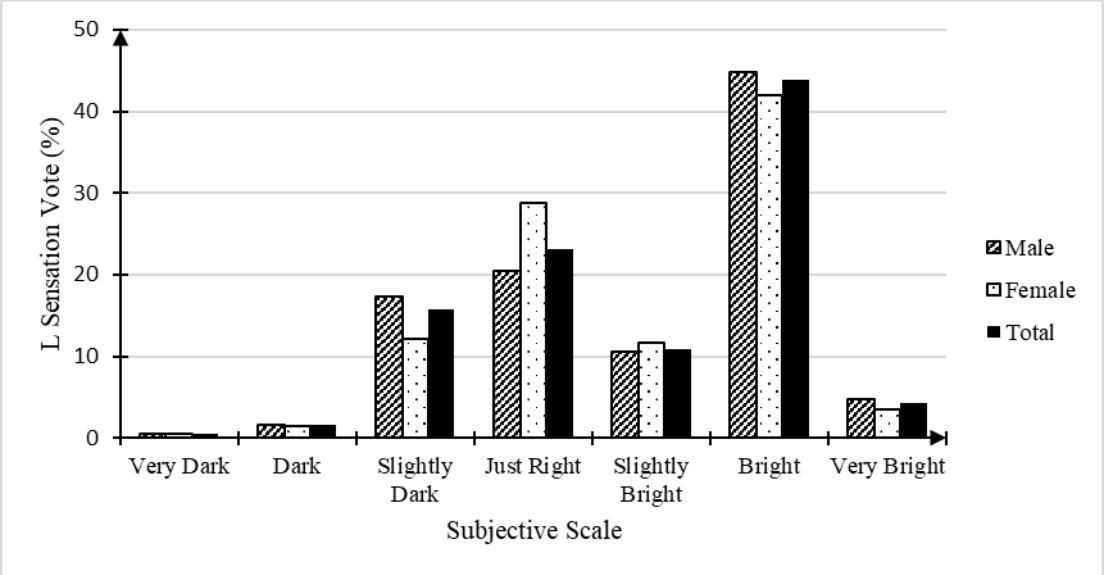
با توجه به شکل ۴-۱۲ ملاحظه می‌شود که در رابطه با سؤال "احساس سرعت جریان هوا"، پاسخ بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "متعادل" بوده است؛ که نشان‌دهنده‌ی وجود شرایط متعادل و مطلوب (نه نسیم‌دار و نه آرام) در فضاهای داخلی موردبررسی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در این فضاها است. از طرفی تعداد نظرات سرعت جریان هوای پایین (تاحدودی‌آرام، آرام، خیلی‌آرام) نسبت به نظرات سرعت جریان هوای بالا (تاحدودی‌نسیم‌دار، نسیم‌دار، خیلی‌نسیم‌دار) بیشتر است؛ یعنی اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، جریان هوا را به‌صورت ملموس احساس نمی‌کنند. همچنین بین احساس سرعت جریان هوا در مردان و زنان تفاوت چندانی دیده نمی‌شود؛ به‌طوری‌که تقریباً احساس یکسانی نسبت به این پارامتر در فضاهای داخلی داشته‌اند (شکل ۴-۱۲).

از شکل ۴-۱۳ نتیجه می‌شود که در رابطه با سؤال "احساس روشنایی"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "روشن" بوده است. از طرفی تعداد نظرات روشنایی بالا (کمی‌روشن، روشن، خیلی‌روشن) نسبت به نظرات روشنایی پایین (کمی‌تاریک، تاریک، خیلی‌تاریک) بیشتر است؛ که نشان دهنده‌ی طراحی معماری مناسب ساختمان ها و شرایط مطلوب نورگیری و

روشنایی در فضاهای داخلی موردبررسی از نظر ساکنان و افراد حاضر در این فضاها است. همچنین بین افرادی که به روشنایی بالا (کمی‌روشن، روشن، خیلی‌روشن) رأی داده‌اند، تفاوتی بین درصد مردان و زنان دیده نمی‌شود (شکل ۴-۱۳).



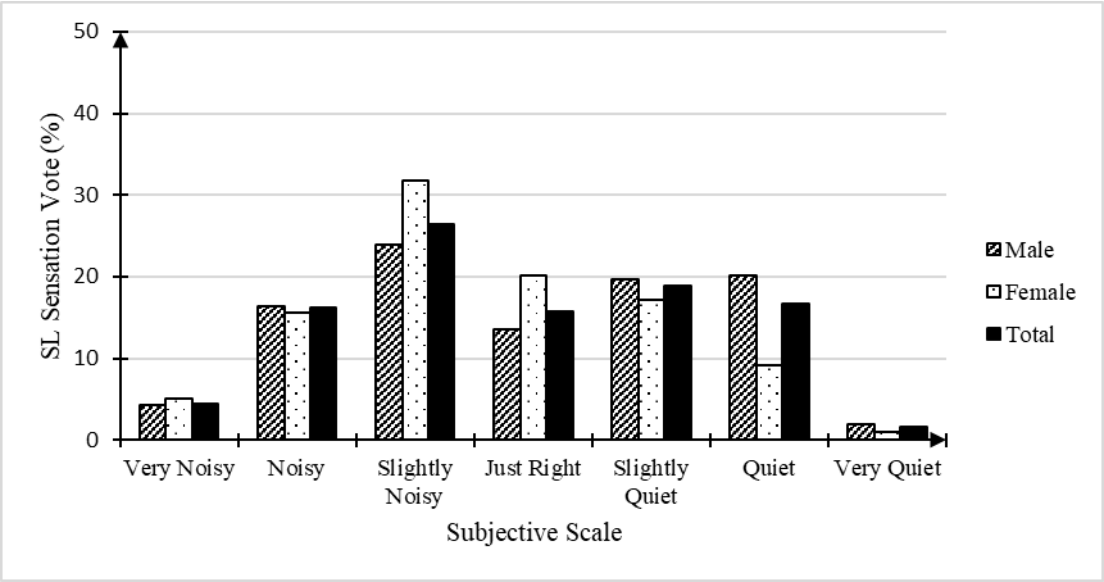
شکل ۴-۱۲: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس سرعت جریان هوا (AV) در فضاهای داخلی



شکل ۴-۱۳: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس روشنایی (L) در فضاهای داخلی

همان‌طور که در شکل ۴-۱۴ ملاحظه می‌شود، در رابطه با سؤال "احساس میزان صدا"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "تاحدودی‌باسروصدا" بوده است. از طرفی تعداد

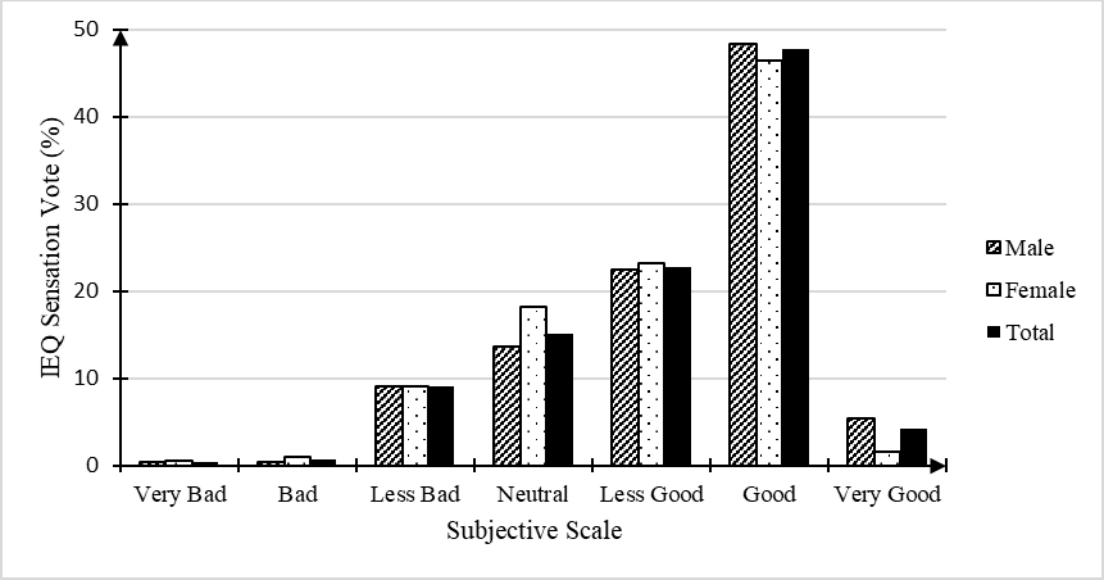
نظرات میزان صدای بالا (تاحدودی‌باسروصدا، باسروصدا، خیلی‌باسروصدا) نسبت به نظرات میزان صدای پایین (تاحدودی‌ساکت، ساکت، خیلی‌ساکت) بیشتر است؛ که نشان‌دهنده‌ی شرایط نامطلوب و میزان آلودگی صوتی بالا در فضاهای داخلی موردبررسی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در این فضاها است. همچنین بین افرادی که به میزان صدای پایین (تاحدودی‌ساکت، ساکت، خیلی‌ساکت) رأی داده‌اند، درصد مردان نسبت به زنان بیشتر است؛ این بدان معنی است که ازنظر مردان نسبت به زنان فضاهای داخلی موردبررسی ساکت‌تر است (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۴: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس میزان صدا (SL) در فضاهای داخلی

با توجه به شکل ۴-۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که در رابطه با سؤال "احساس کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی" که درواقع برآیند احساس افراد در رابطه با تمامی پارامترهای موردمطالعه است، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خوب" بوده است. از طرفی تعداد نظرات مساعد و با کیفیت بالا (کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب) نسبت به نظرات نامساعد و با کیفیت پایین (کمی‌بد، بد، خیلی‌بد) بسیار بیشتر است؛ که نشان‌دهنده‌ی رضایت‌مندی بالای ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی از IEQ است. همچنین بین نظرات مساعد و با کیفیت بالا

(کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب)، درصد مردان نسبت به زنان بیشتر است؛ به‌عبارت‌دیگر ازنظر مردان نسبت به زنان IEQ موردبررسی بهتر است (شکل ۴-۱۵).



شکل ۴-۱۵: پراکندگی نظرات ساکنان و افراد حاضر در رابطه با احساس کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ)

۲-۳-۴- استخراج مقادیر خنثی

به‌منظور ارزیابی نظرات کیفی ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، برای پاسخ‌های پرسش "احساس افراد در رابطه با هریک از پارامترها" موجود در پرسشنامه (شکل ۳-۱)، مقدار خنثی[1] محاسبه شده است. مقدار خنثی برابر است با "مقدار کمّیِ یک پارامتر کیفی با وزنِ معادلِ صفر"[۳۸].

مقادیر خنثیِ به‌دست‌آمده می‌تواند معادل با پاسخ‌های "خنثی" و "متعادل" مربوط به پرسش‌های کیفی "احساس افراد در رابطه با هریک از پارامترها" در پرسشنامه باشد (شکل ۳-۱)؛ این بدان معنی است که مقدار خنثیِ هر پارامتر نشان می‌دهد که بر اساس نظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در چه مقداری از پارامتر موردنظر، شرایط حاکم بر فضای داخلی خنثی است.

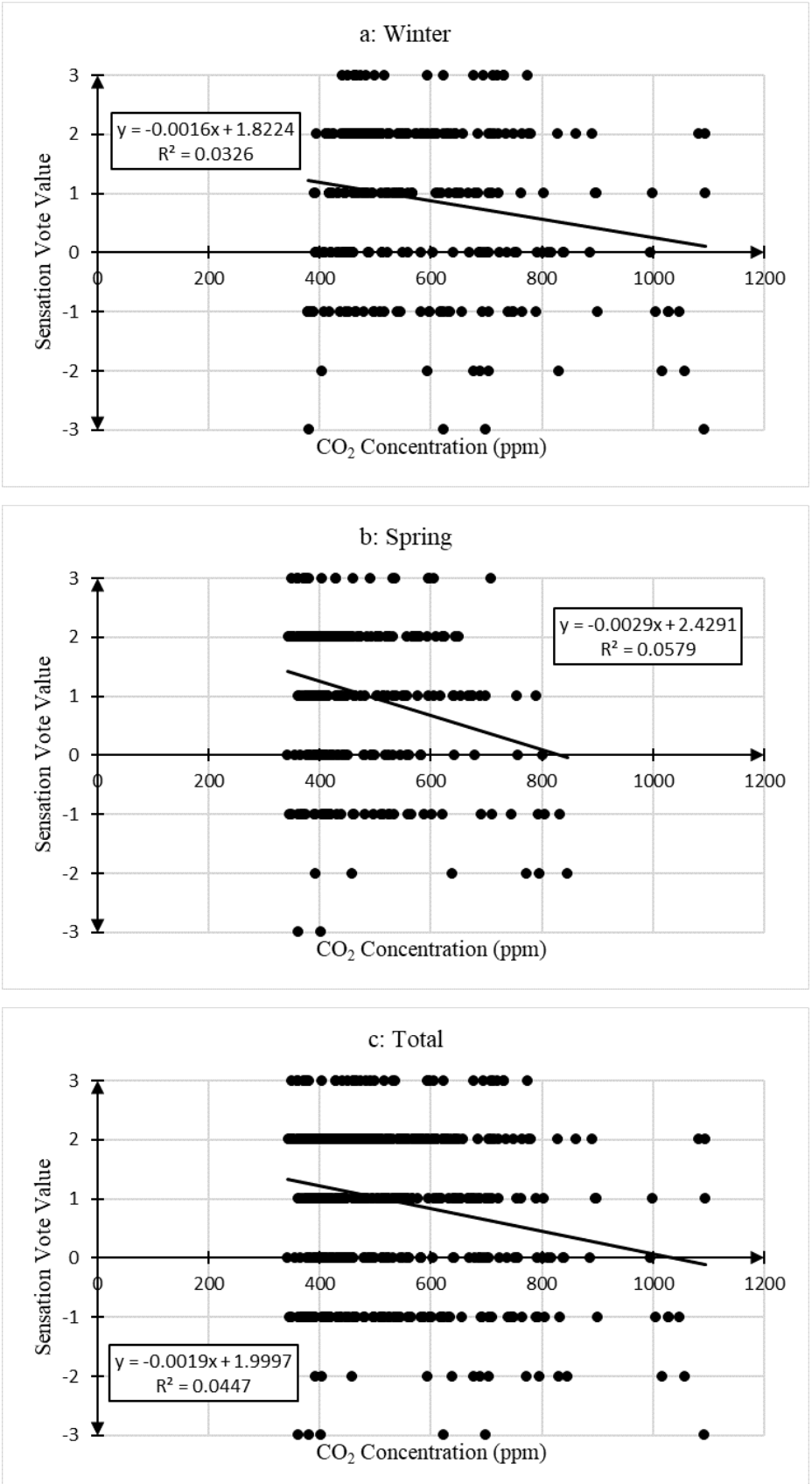
[1] Neutral Value

درواقع با محاسبه‌ی مقادیر خنثی، نظرات کیفی افراد و ساکنان حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی در رابطه با هریک از پارامترهای موردمطالعه، کمّی شده و به‌صورت یک عدد (به اسم مقدار خنثی) گزارش شده است؛ تا بتوان این مقدار را با سایر مقادیر حاصل از اندازه‌گیری کمّی مانند کمینه، بیشینه و میانگین برای هریک از پارامترهای موردمطالعه مقایسه کرده و پیرامون نتایج حاصل از این مقایسه بحث کرد.

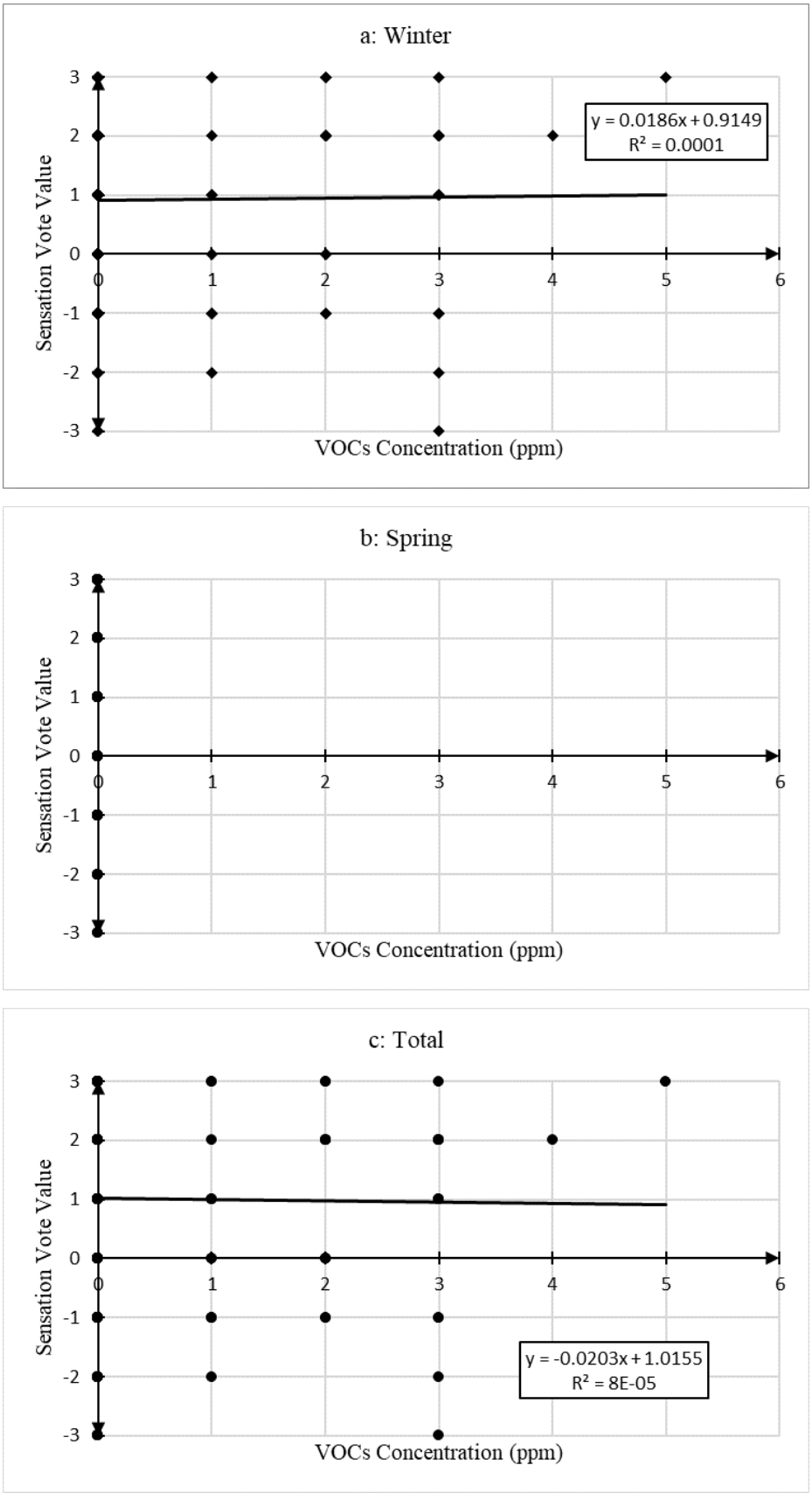
به‌منظور محاسبه‌ی مقادیر خنثی برای پارامترهای موردمطالعه، بین مقادیر کمّی حاصل از اندازه‌گیری و وزن پاسخ‌های کیفی حاصل از پرسشنامه، آنالیز برازش خطی[1] صورت گرفته است. لازم به ذکر است که هریک از زوج مقادیر کمّی و کیفی داده‌ها، دارای موقعیت مکانی و زمانی مشابه بوده و برای یک فضای داخلی و یک لحظه یکسان هستند. محل تلاقی خط برازش شده از داده‌ها با محور افقی دستگاه مختصات (محور داده‌های کمّی پارامتر موردنظر) مقدار خنثی برای پارامتر موردنظر را نشان می‌دهد.

نمودارهای ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای هریک از پارامترهای موردمطالعه به‌منظور استخراج مقادیر خنثی برای فصل زمستان، فصل بهار و مجموع دو فصل، در شکل‌های ۴-۱۶ تا ۴-۲۳ آورده شده است.

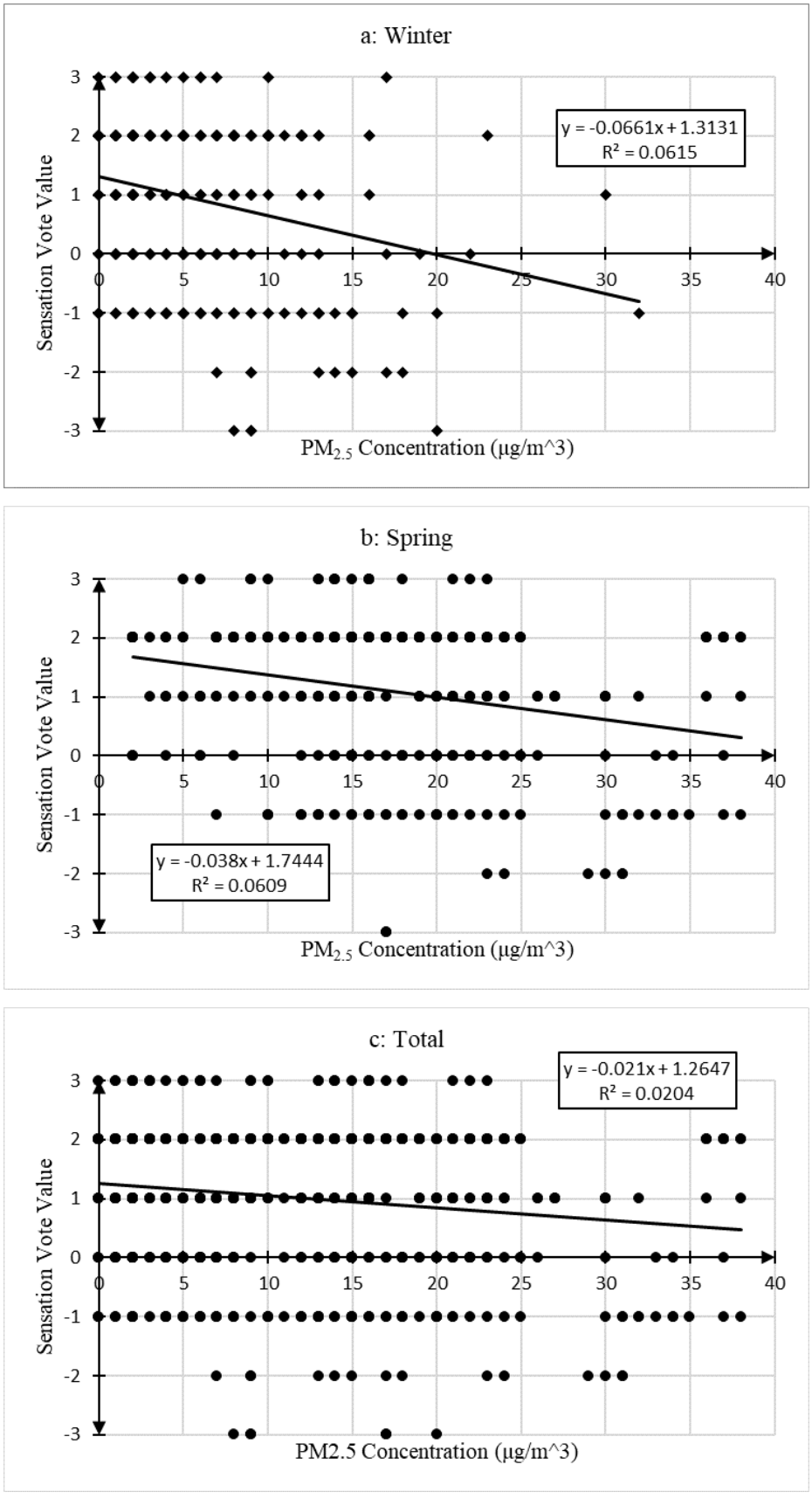
[2] Linear Regression



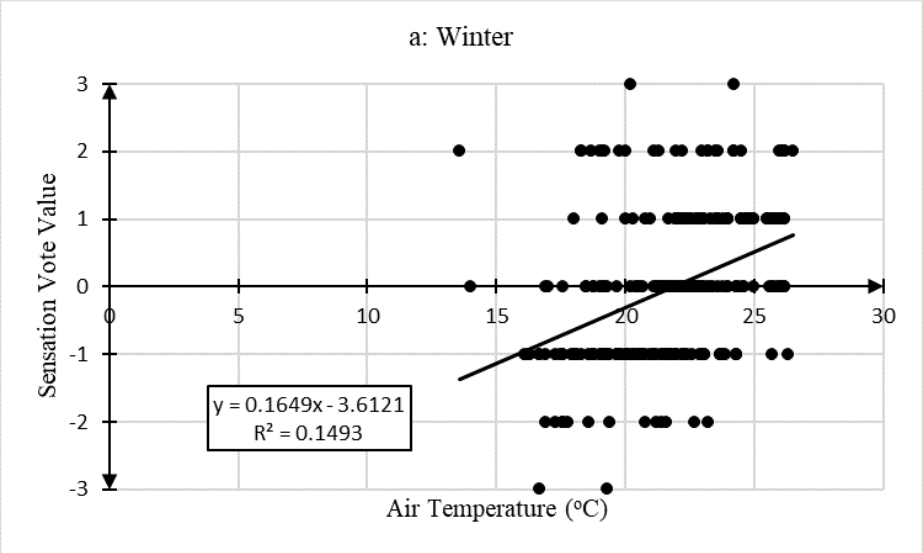
شکل ۴-۱۶: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده CO_2 به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

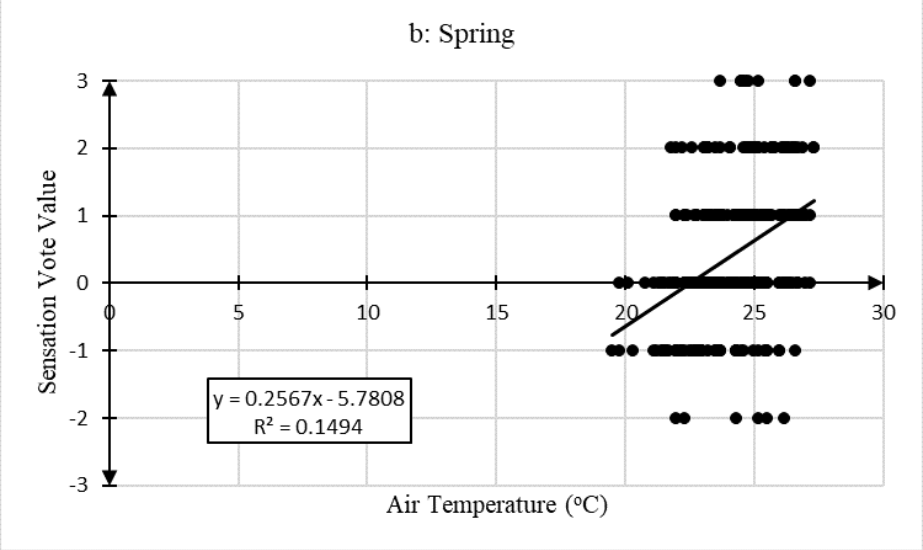


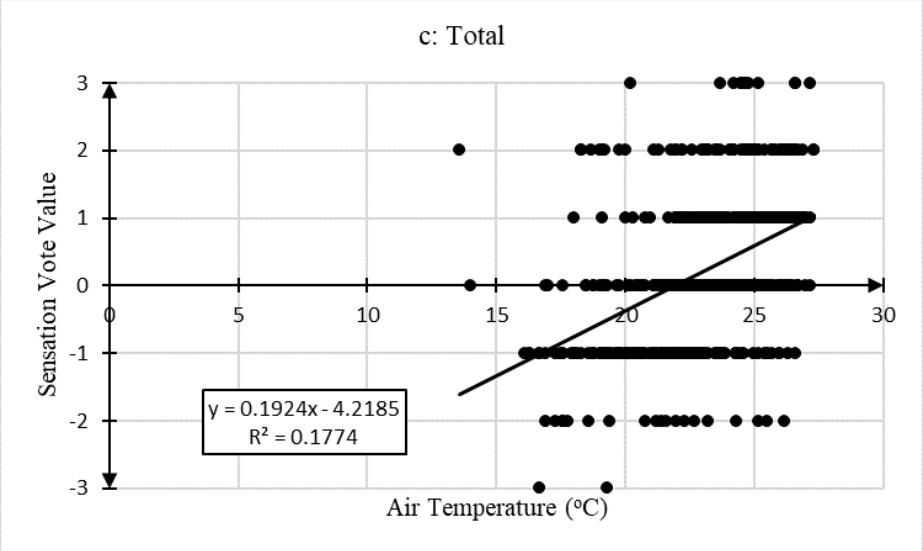
شکل ۴-۱۷: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده VOCs به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



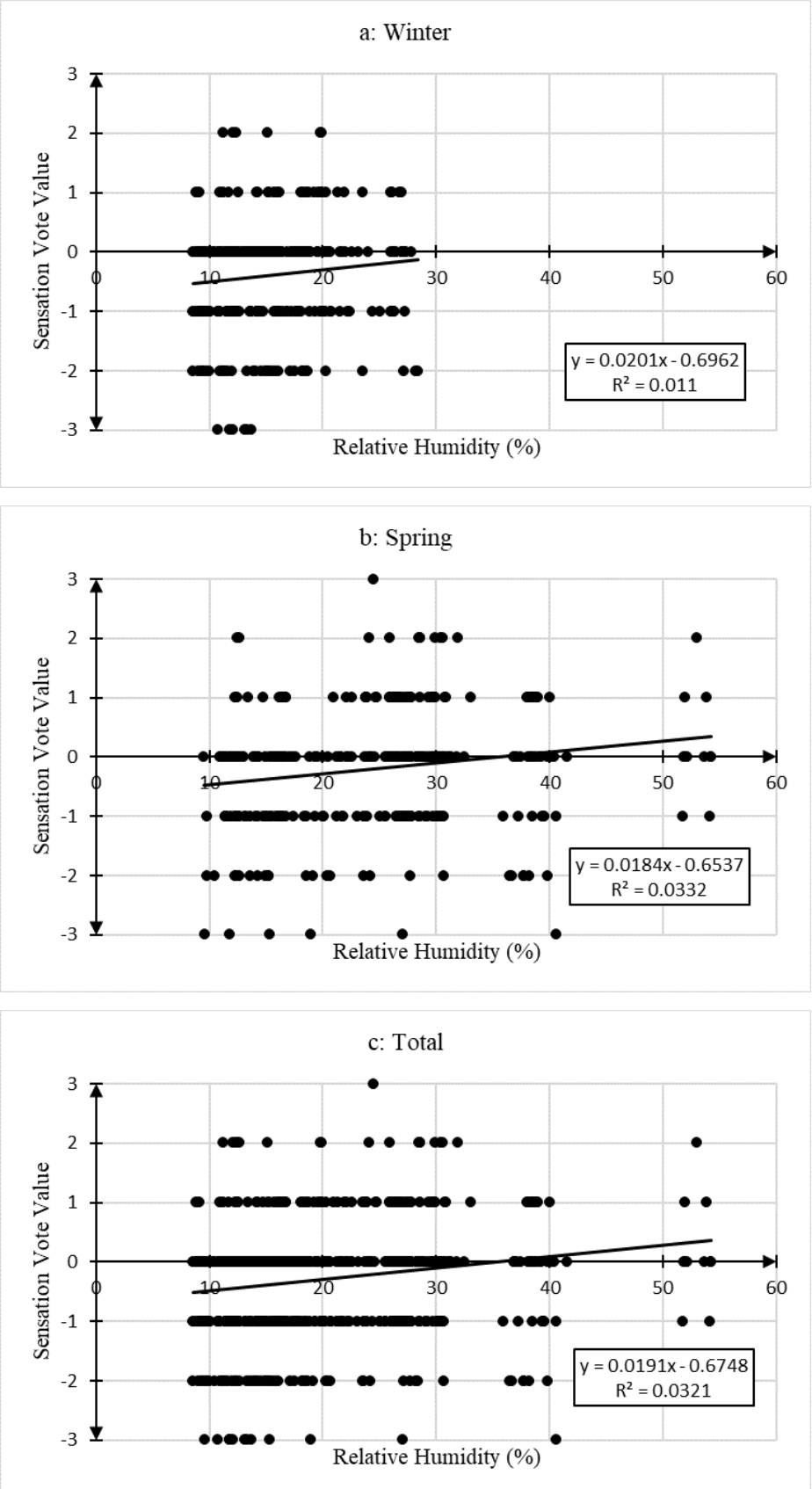
شکل ۴-۱۸: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



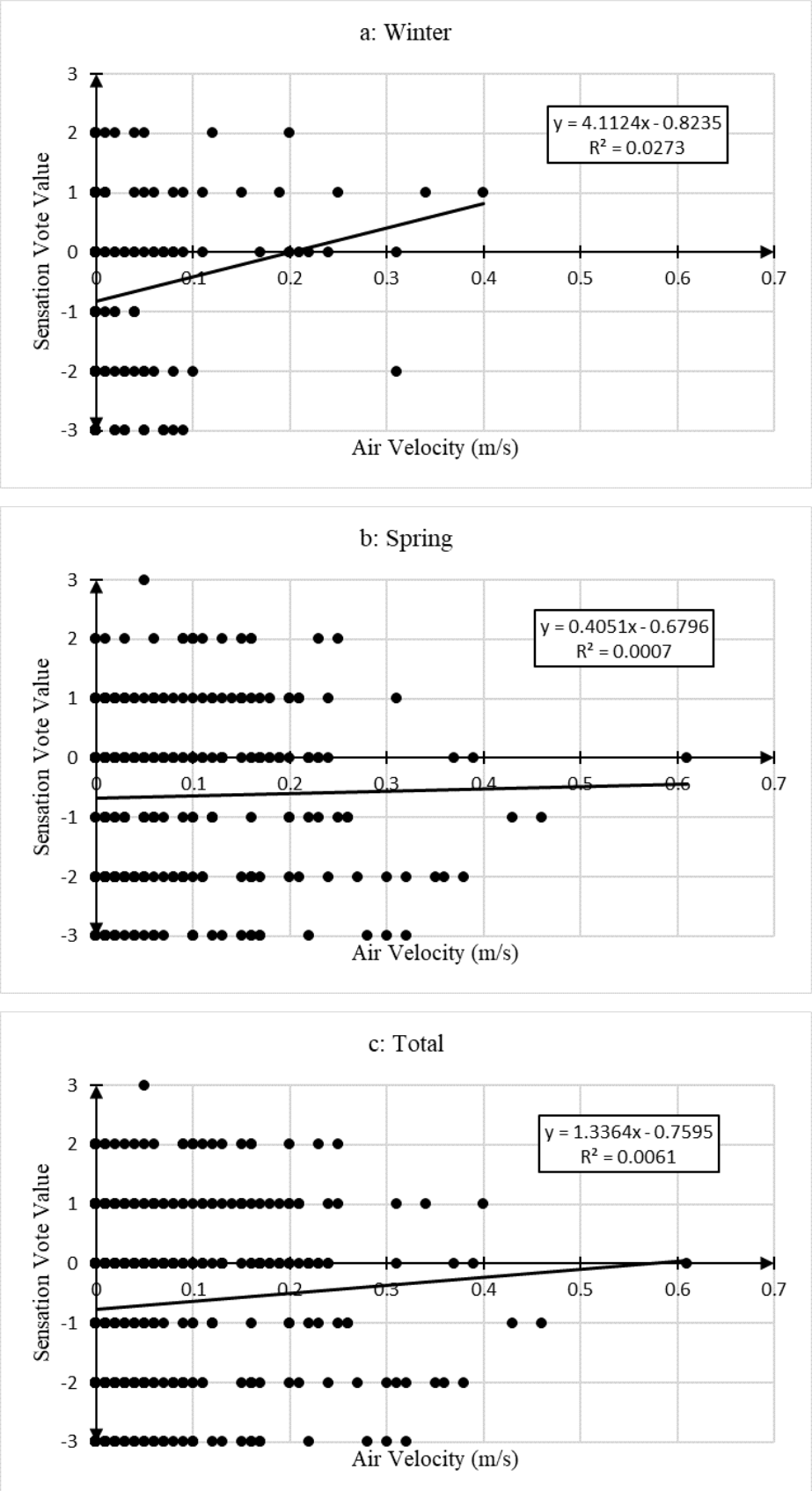




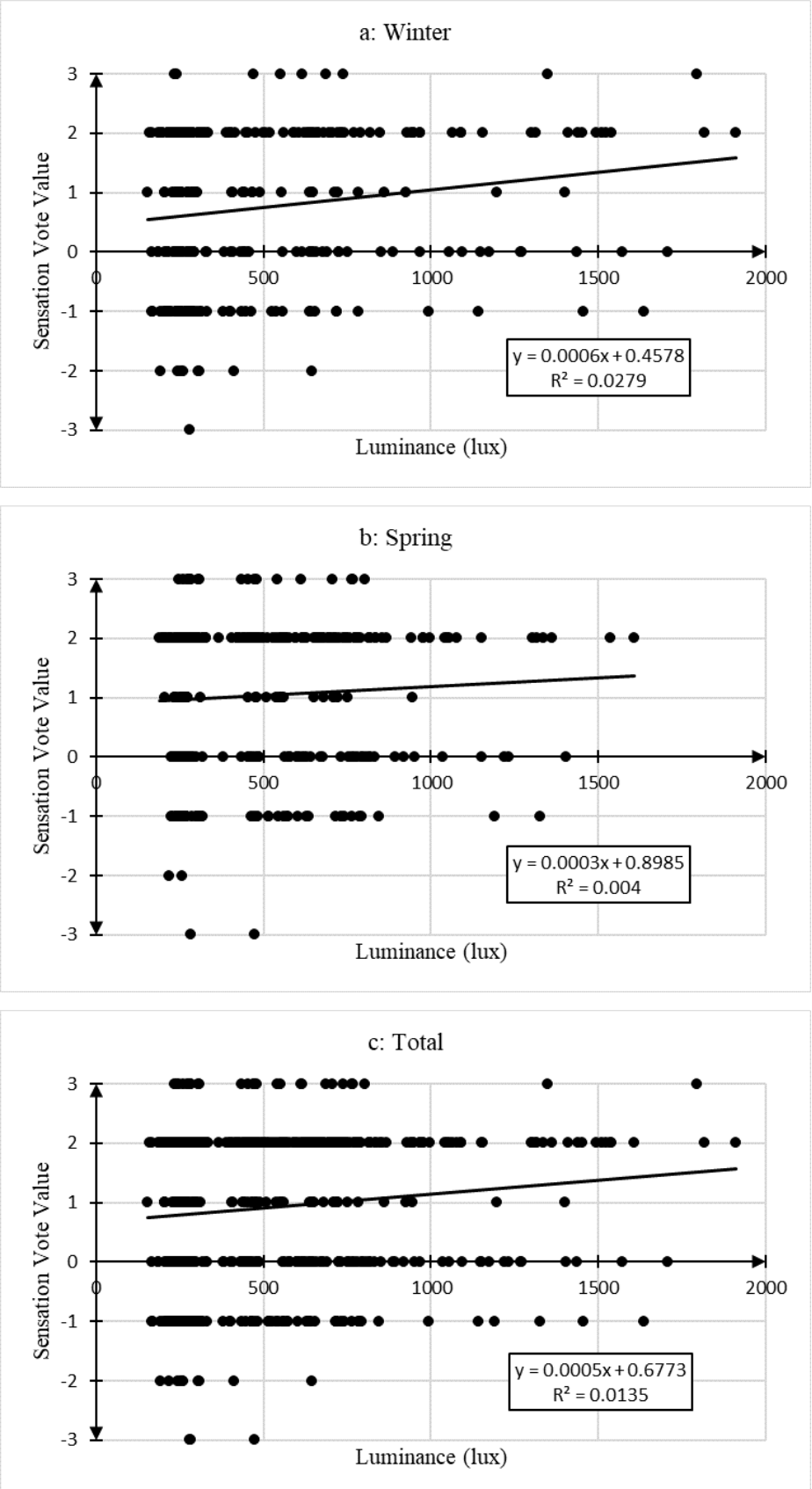
شکل ۴-۱۹: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر دمای هوا (AT) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



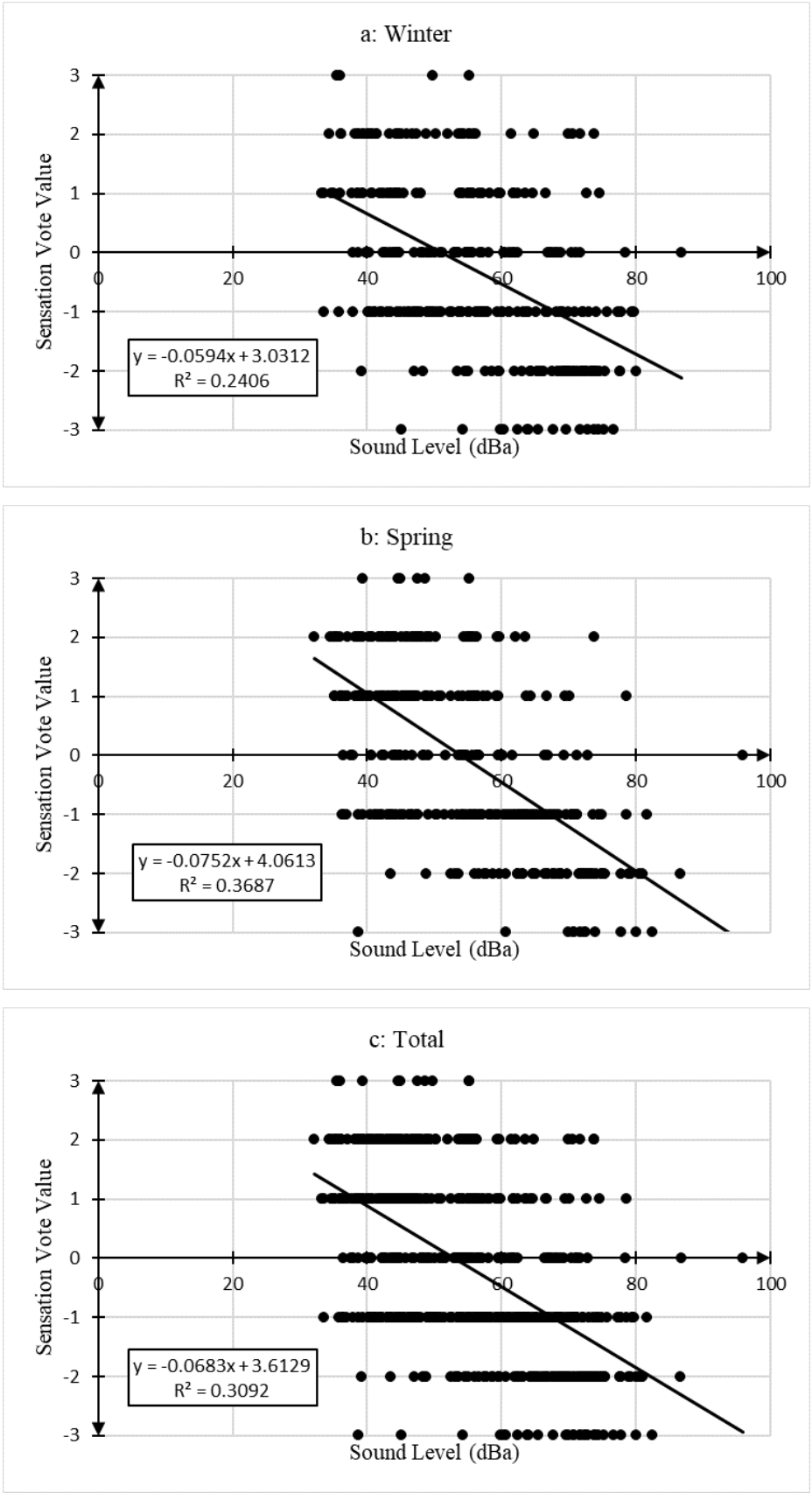
شکل ۴-۲۰: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر رطوبت نسبی (RH) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



شکل ۴-۲۱: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر سرعت جریان هوا (AV) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



شکل ۴-۲۲: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر روشنایی (L) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)



شکل ۴-۲۳: نمودار ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامتر میزان صدا (SL) به‌منظور محاسبه مقادیر خنثی (a: فصل زمستان، b: فصل بهار، c: مجموع دو فصل)

با توجه به نمودارهای موجود در اشکال ۴-۱۶ تا ۴-۲۳، جمع‌بندی نتایج حاصل از استخراج مقادیر خنثی برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در فصول زمستان، بهار و مجموع دو فصل در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳: مقادیر خنثی حاصل از ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامترهای موردمطالعه در فصول زمستان و بهار و مجموع دو فصل

Parameters	Season	Neutral Value
	Winter	1138.8
	Spring	839.3
	Total	1053.2
	Winter	22.0
	Spring	45.9
	Total	60.2
	Winter	21.9
	Spring	22.5
	Total	21.9
	Winter	34.6
	Spring	35.5
	Total	35.3
	Winter	0.2
	Spring	1.68
	Total	0.57
	Winter	51.0
	Spring	54.0
	Total	52.9

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴-۱۶ و جدول ۴-۳، مقدار خنثی برای پارامتر غلظت آلاینده CO_2 در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۱۱۳۸/۸، ۸۳۹/۳ و ppm

۱۰۵۳/۲ محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار خنثی در فصل زمستان بیشتر از فصل بهار است؛ این بدان معنی است که ازنظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان کیفیت هوای داخلی پایین‌تر از فصل بهار است؛ به‌طوری‌که مطابق با نظرات افراد، در فصل زمستان اگر غلظت CO_2 کمتر از ۱۱۳۸/۸ ppm باشد، کیفیت هوای داخلی "خوب" احساس می‌شود؛ درصورتی‌که در فصل بهار اگر غلظت CO_2 کمتر از ۸۳۹/۳ ppm باشد، کیفیت هوای داخلی "خوب" در نظر گرفته می‌شود.

مقدار خنثی برای پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۲۲، ۴۵/۹ و ۶۰/۲ $\mu g/m^3$ حاصل شده است (شکل ۴-۱۸ و جدول ۴-۳). ملاحظه می‌شود که برای این پارامتر، مقدار خنثی در فصل زمستان و بهار اختلاف زیادی دارند؛ به‌طوری‌که مقدار خنثی در فصل بهار بیش از دو برابر مقدار آن در فصل زمستان است.

مقدار خنثی برای پارامتر دمای هوا (AT) در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۲۱/۹، ۲۲/۵ و ۲۱/۹ ^oC به‌دست‌آمده است (شکل ۴-۱۹ و جدول ۴-۳)؛ به عبارتی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در مجموع فصول زمستان و بهار، دمای بیشتر از ۲۱/۹ ^oC "گرم" و دمای کمتر از آن "سرد" محسوب می‌شود. از طرفی مقدار خنثی برای این پارامتر، در فصل بهار بیشتر از فصل زمستان است؛ اما اختلاف فاحشی بین این مقادیر در دو فصل وجود ندارد؛ یعنی ازنظر افراد، دمای هوای فضاهای داخلی موردبررسی در فصول زمستان و بهار متعادل بوده و یکنواخت احساس می‌شود؛ علت این امر آن است که در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان سیستم سرمایش و در فصل بهار سیستم گرمایش فعال بوده و دمای هوای داخلی را متعادل می‌سازد.

مقدار خنثی برای پارامتر رطوبت نسبی (RH) در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۳۴/۶، ۳۵/۵ و ۳۵/۳ درصد محاسبه شده است (شکل ۴-۲۰ و جدول ۴-۳)؛ این بدان

معنی است که ازنظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در مجموع فصول زمستان و بهار، هوای داخلی دارای رطوبت بیشتر از ۳۵/۳ درصد "مرطوب" و کمتر از آن "خشک" محسوب می‌شود. همچنین مقدار خنثی برای این پارامتر، در فصل بهار بیشتر از فصل زمستان است؛ ولی اختلاف فاحشی بین مقادیر آن طی دو فصل بررسی شده وجود ندارد و تقریباً برابر به‌دست‌آمده است؛ یعنی ازنظر افراد، رطوبت نسبی فضاهای داخلی موردبررسی در فصول زمستان و بهار یکنواخت احساس می‌شود. علت این امر می‌تواند فعالیت سیستم تهویه مطبوع در فضاهای داخلی موردبررسی باشد؛ درنتیجه رطوبت نسبی را در فضاهای داخلی موردبررسی متعادل می‌سازد.

مقدار خنثی برای پارامتر سرعت جریان هوا (AV) در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۰/۲، ۱/۶۸ و ۰/۵۷ m/s حاصل شده است (شکل ۴-۲۱ و جدول ۴-۳). ملاحظه می‌شود که برای این پارامتر، مقادیر خنثی طی فصول زمستان و بهار اختلاف فاحشی دارند؛ به‌طوری‌که مقدار خنثی در فصل بهار بیش از هشت برابر مقدار آن در فصل زمستان است. علت این امر می‌تواند روشن بودن سیستم‌های تهویه مطبوع در فصل بهار و در مقابل بسته بودن درها و بازشوهای فضاهای داخلی در فصل زمستان باشد؛ درنتیجه افراد در فصل بهار سرعت جریان هوای بیشتر از ۱/۶۸ m/s را "نسیم دار" و کمتر از آن را "آرام" احساس می‌کنند؛ درصورتی‌که در فصل زمستان سرعت جریان هوای بیشتر از ۰/۲ m/s را "نسیم دار" و کمتر از آن را "آرام" تلقی می‌کنند.

مقدار خنثی برای پارامتر میزان صدا (SL) در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب برابر با ۵۱، ۵۴ و ۵۲/۹ dBa به‌دست‌آمده است (شکل ۴-۲۳ و جدول ۴-۳)؛ به عبارتی ازنظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در مجموع فصول زمستان و بهار، میزان صدای بالاتر از ۵۲/۹ dBa "باسروصدا" و میزان صدای پایین‌تر از ۵۲/۹ dBa "ساکت" محسوب می‌شود. همچنین مقدار خنثی برای این پارامتر، در فصل بهار بیشتر از فصل زمستان است؛ ولی اختلاف فاحشی بین مقادیر آن طی فصول بررسی شده وجود ندارد و تقریباً برابر محاسبه شده است؛ یعنی

ازنظر افراد، میزان صدای فضاهای داخلی موردبررسی در فصل‌های زمستان و بهار یکنواخت احساس می‌شود. علت این امر می‌تواند ثابت بودنِ تقریبیِ تعداد ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، طی فصول زمستان و بهار باشد؛ چراکه این دو فصل در یک نیمسال تحصیلی دانشگاه قرار دارند و تعداد کارمندان، دانشجویان و اساتید تقریباً ثابت است.

لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۴-۱۷ برای پارامتر غلظت آلاینده VOCs، در هیچ‌یک از فصول زمستان، بهار و مجموع دو فصل، مقادیر خنثیِ منطقی و قابل‌قبول به دست نیامده است؛ چراکه اکثر مقادیر داده‌های کمّی برداشت شده برای این پارامتر طی این فصول برابر صفر بوده است. همچنین با توجه به شکل ۴-۲۲، ملاحظه می‌شود که برای پارامتر روشنایی، در هیچ‌یک از فصول زمستان، بهار و مجموع دو فصل، مقادیر خنثی‌ای که منطقی، مثبت و قابل‌قبول باشد حاصل نشده است. علت این امر عدم انطباق نظرات کیفی با مقادیر کمی اندازه‌گیری شده است؛ به‌طوری‌که ساکنان و افراد حاضر در فضاها غالباً درک صحیحی از میزان روشنایی فضا نداشته و برای مقادیر کمی پایین روشنایی، نظر به احساس روشنایی در حد متعادل تا خیلی روشن داده‌اند.

۳-۳-۴- ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط‌موجود در سایت‌های موردبررسی

به‌منظور ارزیابی کیفی، "میزان رضایت‌مندی ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترهای موردمطالعه"، به‌وسیله پرسشنامه بررسی شد (شکل ۳-۱). به‌منظور ارزیابی نظرات ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی، برای پاسخ‌های حاصل از سؤال "میزان رضایت از شرایط موجود" در پرسشنامه، تعداد و درصد هریک از پاسخ‌های موجود (کاملاًغیرقابل‌قبول، تاحدودی‌غیرقابل‌قبول، تاحدودی‌قابل‌قبول و کاملاًقابل‌قبول) نسبت به تعداد کل پرسشنامه‌ها به تفکیک مردان و زنان و همچنین فصول زمستان و بهار و مجموع این دو فصل برای هریک از پارامترهای موردمطالعه محاسبه و در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴: توزیع میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترها

Parameters	Season	Clearly Unacceptable		Just Unacceptable		Just Acceptable		Clearly Acceptable	
		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
	Winter	8	3	26	18	98	46	66	23
	Percent	2.78	1.04	9.03	6.25	34.03	15.97	22.92	7.99
	Spring	4	4	28	22	122	49	74	33
	Percent	1.19	1.19	8.33	6.55	36.31	14.58	22.02	9.82
	Total	12	7	54	40	220	95	140	56
	Percent	1.92	1.12	8.65	6.41	35.26	15.23	22.44	8.97
	Winter	3	1	27	14	97	51	71	24
	Percent	1.04	0.35	9.38	4.86	33.68	17.71	24.65	8.33
	Spring	3	9	28	18	111	50	86	31
	Percent	0.89	2.68	8.33	5.36	33.04	14.88	25.60	9.23
	Total	6	10	55	32	208	101	157	55
	Percent	0.96	1.61	8.81	5.13	33.33	16.19	25.16	8.81
	Winter	5	3	31	13	86	45	76	29
	Percent	1.74	1.04	10.74	4.51	29.86	15.63	26.39	10.07
	Spring	6	6	32	20	101	60	89	22
	Percent	1.79	1.79	9.52	5.95	30.06	17.86	26.49	6.55
	Total	11	9	63	33	187	105	165	51
	Percent	1.76	1.44	10.10	5.29	29.97	16.83	26.44	8.17
	Winter	7	4	18	6	83	44	90	36
	Percent	2.43	1.39	6.25	2.08	28.82	15.28	31.25	12.50
	Spring	6	2	27	18	81	59	114	29
	Percent	1.79	0.60	8.04	5.36	2.41	17.56	33.93	8.63
	Total	13	6	45	24	164	103	204	65
	Percent	2.08	0.96	7.21	3.85	26.28	16.51	32.69	10.42
	Winter	5	1	32	13	82	32	79	44
	Percent	1.74	0.35	11.11	4.51	28.47	11.11	27.43	15.28
	Spring	6	1	28	11	86	42	108	54
	Percent	1.79	0.30	8.33	3.27	25.60	12.50	32.14	16.07
	Total	11	2	60	24	168	74	187	98
	Percent	1.76	0.32	9.62	3.85	26.92	11.85	29.97	15.71

Sound Level	Winter	18	5	47	20	80	41	53	24
	Percent	6.25	1.74	16.32	6.94	27.78	14.24	18.40	8.33
	Spring	17	4	53	20	95	52	63	32
	Percent	5.06	1.19	15.77	5.95	28.27	15.48	18.75	9.52
	Total	35	9	100	40	175	93	116	56
	Percent	5.61	1.44	16.03	6.41	28.04	14.91	18.59	8.97
	Winter	4	1	21	8	118	60	55	21
	Percent	1.39	0.35	7.29	2.78	40.97	20.83	19.10	7.29
	Spring	1	1	16	14	158	70	53	23
	Percent	0.30	0.30	4.76	4.17	47.02	20.83	15.77	6.85
	Total	5	2	37	22	276	130	108	44
	Percent	0.80	0.32	5.93	3.53	44.23	20.83	17.31	7.05

با توجه به جدول ۴-۴ می‌توان نتیجه گرفت که برای پارامتر کیفیت هوای داخلی (IAQ) در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب ۸۰/۹۱، ۸۲/۷۳ و ۸۱/۹ درصد از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، رضایتمندی خود را از شرایط حاکم بر فضاهای داخلی موردبررسی اعلام کرده‌اند؛ که نشان‌دهنده‌ی میزان بالای رضایتمندی افراد از کیفیت هوای داخلی در تمامی فصول موردبررسی است. همچنین در مورد این پارامتر مشاهده می‌شود که برای تمامی فصول موردبررسی، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان بیشتر از زنان است. به‌طور مثال برای مجموع دو فصل، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان و زنان به ترتیب برابر ۵۷/۷ و ۲۴/۲ درصد است؛ این بدان معنی است که مردان بیش از دو برابر زنان احساس رضایت بیشتری از کیفیت هوای داخلی داشته‌اند.

در رابطه با پارامتر دمای هوا، شرایط حاکم در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل، به ترتیب برای ۸۴/۳۷، ۸۲/۷۵ و ۸۳/۴۹ درصد از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، قابل‌قبول بوده است (جدول ۴-۴). ملاحظه می‌شود که درصد بالایی از افراد از شرایط دمایی حاکم بر فضاهای داخلی موردبررسی رضایت داشته‌اند و ازنظر آن‌ها آسایش دمایی فضاهای داخلی موردبررسی مطلوب بوده است. همچنین در مورد این پارامتر ملاحظه می‌شود که برای تمامی فصول موردبررسی،

درصد رضایتمندی مردان بیشتر از زنان است. به‌عنوان‌مثال برای مجموع دو فصل، درصد رضایتمندی مردان و زنان به ترتیب برابر ۵۸/۴۹ و ۲۵ درصد است؛ به عبارتی مردان نسبت به زنان بیش از دو برابر احساس رضایت نسبت به دمای هوا و آسایش دمایی فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند.

مطابق با نظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب ۸۱/۹۵، ۸۰/۹۶ و ۸۱/۴۱ درصد نسبت به پارامتر رطوبت نسبی رضایت داشته‌اند (جدول ۴-۴)؛ که نشان‌دهنده‌ی میزان بالای رضایتمندی افراد از رطوبت نسبی موجود در تمامی فصول موردبررسی است. همچنین برای تمامی فصول موردبررسی، در رابطه با این پارامتر، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان نسبت به زنان بیشتر است. به‌عنوان‌مثال برای مجموع دو فصل، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان و زنان به ترتیب برابر ۵۶/۴۱ و ۲۵ درصد است؛ یعنی مردان نسبت به زنان بیش از دو برابر احساس رضایت از رطوبت نسبی موجود در فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند.

برای پارامتر سرعت جریان هوا در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب ۸۷/۸۵، ۶۲/۵۳ و ۸۵/۹ درصد از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، رضایتمندی خود را از شرایط حاکم بر فضاهای داخلی موردبررسی اعلام کرده‌اند (جدول ۴-۴)؛ درنتیجه میزان رضایتمندی از این پارامتر در فصل زمستان نسبت به فصل بهار بیشتر است. علت رضایت کمتر از این پارامتر در فصل بهار می‌تواند روشن شدن سیستم‌های تهویه مطبوع به‌منظور تأمین آسایش دمایی و رطوبت نسبی محیط و ایجاد جریان هوا در محیط باشد. همچنین در مورد این پارامتر مشاهده می‌شود که برای تمامی فصول موردبررسی، درصد رضایتمندی مردان بیشتر از زنان است؛ به‌عنوان‌مثال برای مجموع دو فصل، درصد رضایتمندی مردان و زنان به ترتیب برابر ۵۸/۹۷ و ۲۶/۹۳ درصد است؛ این بدان معنی است که مردان نسبت به زنان بیش از دو برابر احساس رضایت نسبت به سرعت جریان هوای فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند.

در رابطه با پارامتر روشنایی، شرایط حاکم در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل، به ترتیب برای ۸۲/۲۹، ۸۶/۳۱ و ۸۴/۴۵ درصد از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، قابل‌قبول بوده است (جدول ۴-۴). ملاحظه می‌شود که درصد بالایی از افراد از شرایط روشنایی حاکم بر فضاهای داخلی موردبررسی رضایت داشته‌اند و ازنظر آن‌ها روشنایی در فضاهای داخلی موردبررسی مطلوب بوده است. همچنین در مورد این پارامتر ملاحظه می‌شود که برای تمامی فصول موردبررسی، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان بیشتر از زنان است. به‌عنوان‌مثال برای مجموع دو فصل، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان و زنان به ترتیب برابر ۵۶/۸۹ و ۲۷/۵۶ درصد است؛ به عبارتی مردان نسبت به زنان بیش از دو برابر احساس رضایت نسبت به روشنایی در فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند.

مطابق با نظر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل به ترتیب ۶۸/۷۵، ۷۲/۰۲ و ۷۰/۵۱ درصد نسبت به پارامتر میزان صدا رضایت داشته‌اند (جدول ۴-۴). مشاهده می‌شود که رضایتمندی در رابطه با این پارامتر نسبت به سایر پارامترهای موردمطالعه در تمامی فصول موردبررسی پایین‌تر است؛ که نشان‌دهنده‌ی لزوم توجه به مسئله‌ی آلودگی صوتی و تأمین آسایش صوتی در فضاهای داخلی موردبررسی است. همچنین برای تمامی فصول موردبررسی، در رابطه با این پارامتر، درصد میزان رضایت مردان نسبت به زنان بیشتر است. به‌عنوان‌مثال برای مجموع دو فصل، درصد رضایتمندی مردان و زنان به ترتیب برابر ۴۶/۶۳ و ۲۳/۸۸ درصد است؛ یعنی مردان نسبت به زنان تقریباً دو برابر احساس رضایت از آسایش صوتی و میزان صدای موجود در فضاهای داخلی موردبررسی داشته‌اند.

در فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل، به ترتیب ۸۸/۱۹، ۹۰/۴۷ و ۸۹/۴۲ درصد از ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، رضایتمندی خود را از کیفیت زیست‌محیطی این فضاها و شرایط زیست‌محیطی حاکم بر آن‌ها اعلام کرده‌اند (جدول ۴-۴)؛ که میزان بسیار بالای رضایتمندی افراد از کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی را در تمامی فصول موردبررسی نشان

می‌دهد. همچنین در مورد این پارامتر مشاهده می‌شود که برای تمامی فصول موردبررسی، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان بیشتر از زنان است. به‌طور مثال برای مجموع دو فصل، درصد پاسخ‌های قابل‌قبول مردان و زنان به ترتیب برابر ۶۱/۵۴ و ۲۷/۸۸ درصد است؛ به‌عبارت‌دیگر مردان نسبت به زنان بیش از دو برابر احساس رضایت از کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی داشته‌اند.

به‌طورکلّی با توجه به نتایجی که از جدول ۴-۴ حاصل شد، در مجموع می‌توان چنین بیان نمود که ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، نسبت به تمامی پارامترهای موردمطالعه و شرایط زیست‌محیطی حاکم بر این فضاها رضایت بالایی دارند و برای آن‌ها شرایط موجود در این فضاها قابل‌قبول است. همچنین در رابطه با تمامی پارامترهای موردمطالعه، مردان تقریباً دو برابر نسبت به زنان رضایت بیشتری را اعلام کرده‌اند؛ این بدان معنی است که برای تمامی پارامترهای موردمطالعه، اکثر افراد ناراضی با نظرات غیرقابل‌قبول را زنان شامل می‌شوند.

در جدول ۴-۵ به‌منظور ارزیابی صحت پاسخ‌های کیفی حاصل از پرسشنامه، تعداد آرای حاصل از پرسشنامه‌ها به تفکیک مردان و زنان و مجموع آن‌ها، به همراه درصد هریک از آن‌ها، برای هریک از پارامترهای موردمطالعه، طی فصول زمستان و بهار و مجموع این دو فصل، آورده شده است. به‌طور مثال با توجه به جدول ۴-۴ برای پارامتر IAQ، تعداد آرای ارائه شده در ارتباط با "میزان رضایت از شرایط موجود" (کاملاًغیرقابل‌قبول، تاحدودی‌غیرقابل‌قبول، تاحدودی‌قابل‌قبول و کاملاًقابل‌قبول) در رابطه با این پارامتر، در فصل زمستان جمع شده (مجموع چهار عدد ۸، ۲۶، ۹۸ و ۶۶) و در ستون مردان و ردیف زمستان برای این پارامتر در جدول ۴-۵ آورده شده است (عدد ۱۹۸)؛ به همین ترتیب برای تعداد آرای مربوط به مردان و زنان در سایر فصول مربوطه عمل شده است تا جدول ۴-۵ تکمیل شود. برابر بودن مجموع‌های حاصل (به ترتیبی که در بالا توضیح داده شد) برای تمامی پارامترهای موردبررسی در هریک از فصول موردبررسی (فصل زمستان، فصل بهار و مجموع این دو فصل)، حاکی

از صحت تعداد پرسشنامه توزیع‌شده و یکسان بودن تعداد پاسخ‌های دریافتی از افراد و ساکنان حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی برای هریک از پارامترهای موردمطالعه است.

جدول ۴-۵: تعداد آرا و درصد حاصل از پرسشنامه‌ها به تفکیک مرد و زن و مجموع آن‌ها برای هریک از پارامترها

Parameters	**Season**	**Total Votes**		
		Male	Female	Total
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	199	624
	Percent	68.27	31.73	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.26	31.74	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.27	31.73	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.26	31.74	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.27	31.73	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.27	31.73	100
	Winter	198	90	288
	Spring	228	108	336
	Total	426	198	624
	Percent	68.27	31.73	100

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این فصل به جمع‌بندی کلّی نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمّی پارامترهای موردمطالعه (شامل نتایج تحلیل آماری برای فضاهای موردبررسی و نتایج تحلیل آماری کلّی) و همین‌طور نتایج حاصل از ارزیابی کیفی پارامترهای موردمطالعه (شامل نتایج ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود، نتایج استخراج مقادیر خنثی و نتایج ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود) در فضاهای داخلی موردبررسی پرداخته شده است. همچنین پیشنهادات مدنظر، به‌منظور ادامه و تکمیل مطالعات صورت گرفته در تحقیق حاضر در خصوص ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضای داخلی (IEQ)[1] ارائه‌شده‌است.

۵-۲- جمع‌بندی نتایج حاصل از ارزیابی کمّی IEQ

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های کمّی پارامترهای موردمطالعه در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی طی فصول موردبررسی (زمستان و بهار)، و همچنین نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل آماری صورت گرفته بر روی این داده‌های کمّی، جمع‌بندی شده و در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

۵-۲-۱- نتایج کلّی تحلیل آماری IEQ در فضاهای داخلی در فصول موردبررسی

نتایج نشان داد که غلظت آلاینده CO_2 در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل زمستان از فصل بهار بیشتر بود (شکل ۴-۱). در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل، در سالن مطالعه مرکزی برادران (۶۳۱/۵ ppm) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل، مربوط به مخزن کتابخانه مرکزی (۳۹۴/۳ ppm) اندازه‌گیری شد. در کل این پارامتر در فضاهای

[1] Indoor Environmental Quality

داخلی موردبررسی در فصل زمستان (بین ۳۸۸/۶ تا ۸۲۷ ppm) نسبت به بهار (بین ۳۸۰ تا ppm ۴۳۶) تغییرات بیشتری را نشان داد. همچنین مقدار میانگین غلظت این آلاینده در هوای بیرونی و فضای آزاد دانشگاه صنعتی شاهرود، در مدت‌زمان انجام تحقیق برابر با ppm ۳۸۸/۱±۲۰ مشخص شد.

مقادیر میانگین غلظت آلاینده VOCs در تمامی فضاهای داخلی موردبررسی در فصل بهار صفر به دست آمد؛ درحالی‌که مقدار میانگین این پارامتر در فصل زمستان برای برخی از فضاهای داخلی موردبررسی برابر صفر، و برای برخی دیگر دارای مقدار بود (شکل ۴-۲). بیشترین میانگین این پارامتر در فصل زمستان، در فضای داخلی سالن مطالعه مرکزی برادران (ppm ۱/۱۳) ملاحظه شد. به‌طورکلی مقادیر ناچیزی از این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی مشاهده شد.

همان‌طور که در شکل ۴-۳ ملاحظه شد، غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بسیار بیشتر بود. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل، در سالن غذاخوری برادران در پردیس ($\mu g/m^3$ ۱۸/۹) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل، مربوط به سایت کامپیوتر برادران در پردیس ($\mu g/m^3$ ۷) برداشت شد. در کل این پارامتر در بین فضاهای داخلی موردبررسی در فصل بهار بسیار متغیرتر (بین ۶/۵ تا $\mu g/m^3$ ۲۸/۸) و در فصل زمستان یکنواخت‌تر بود (بین ۱ تا $\mu g/m^3$ ۱۲/۸).

دمای هوا در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار از فصل زمستان بیشتر بود (شکل ۴-۴). در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل مربوط به سالن مطالعه مرکزی برادران (^oC ۲۵/۹) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل در سرسرای ورودی دانشکده مهندسی عمران و مکانیک (^oC ۲۰/۷) اندازه‌گیری شد. به‌طورکلی این پارامتر در بین فضاهای داخلی موردبررسی در فصل زمستان متغیرتر بود (بین ۱۷/۲ تا ^oC ۲۵/۹)، درحالی‌که در فصل بهار روند یکنواخت‌تری داشت (بین ۲۱/۷ تا ^oC ۲۶/۶).

از شکل ۴-۵ نتیجه شد که رطوبت نسبی در فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار نسبت به فصل زمستان بیشتر است. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل در سالن غذاخوری برادران در پردیس (۳۱ درصد) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل مربوط به سالن مطالعه برادران در پردیس (۱۱/۱ درصد) ملاحظه شد. در کل این پارامتر در بین فضاهای داخلی موردبررسی در هر دو فصل زمستان و بهار روند متغیری داشت (به ترتیب بین ۱۰/۷ تا ۲۵/۶ درصد و بین ۱۱/۴ تا ۴۴/۴ درصد)؛ اما در فصل بهار تغییرات آن بیشتر بود.

سرعت جریان هوا در فصل بهار از فصل زمستان بیشتر بود (شکل ۴-۶). مقدار میانگین این پارامتر در فصل زمستان برای برخی از فضاهای داخلی موردبررسی برابر صفر، و برای برخی دیگر دارای مقدار کمی بود. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی برق و رباتیک و همچنین دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات به‌طور برابر با هم (۰/۱ m/s) و کمترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل در سالن مطالعه برادران در پردیس (۰/۰۰۸ m/s) برداشت شد. به‌طورکلی این پارامتر در بین فضاهای داخلی موردبررسی در فصل بهار متغیرتر بود (بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۲۰۴ m/s)، درحالی‌که در فصل زمستان روند یکنواخت‌تری داشت (بین صفر تا ۰/۰۶۶ m/s).

با توجه به شکل ۴-۷ مشخص شد که روشنایی در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار و زمستان تقریباً یکسان بود و تفاوت چندانی بین میزان روشنایی در یک فضای داخلی در این دو فصل وجود نداشت. در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل مربوط به سرسرای ورودی دانشکده مهندسی برق و رباتیک (۱۰۱۴/۹ lux) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل در سالن غذاخوری مرکزی برادران (۲۲۵ lux) اندازه‌گیری شد. در کل این پارامتر در بین فضاهای داخلی موردبررسی در هر دو فصل زمستان و بهار متغیر بود (به ترتیب بین ۲۱۴/۴ تا ۱۲۳۰/۳ lux و بین ۲۳۴ تا ۸۵۰/۵ lux).

میزان صدا در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، در فصل بهار و زمستان تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی بین میزان صدا در یک فضای داخلی در این دو فصل وجود نداشت (جدول ۴-۸). در بین فضاهای داخلی موردبررسی، بیشترین میانگین این پارامتر در مجموع دو فصل مربوط به سالن غذاخوری برادران در پردیس (۷۴/۵ dBa) و کمترین میانگین آن در مجموع دو فصل در سایت کامپیوتر برادران در پردیس (۳۹/۱ dBa) مشاهده شد. در رابطه با این پارامتر، برای مجموع دو فصل، تمامی فضاهای داخلی به سه دسته کلی تقسیم شد؛ به‌گونه‌ای که میزان صدا در هر دسته تقریباً یکسان بود: دسته‌ی اول شامل ساکت‌ترین فضاهای داخلی دانشگاه (بین ۳۹/۱ تا ۴۷/۷ dBa)؛ دسته‌ی دوم دارای سروصدای بیشتری نسبت به دسته‌ی اول (بین ۴۷/۶ تا ۶۰/۴ dBa)؛ دسته‌ی سوم شامل بیشترین میزان سروصدا و آلودگی صوتی (بین ۶۸/۶ تا ۷۴/۵ dBa).

۲-۲-۵- نتایج کلّی تحلیل آماری کلّی IEQ

به‌منظور جمع‌بندی نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمّی برای مقادیر میانگین به‌دست‌آمده برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی، و درنهایت تحلیل آماری کلّی طی فصول موردبررسی (زمستان و بهار)، جدول ۵-۱ ارائه شده است. در این جدول مقادیر میانگین کلّی هریک از پارامترهای موردمطالعه، در مجموع دو فصل موردبررسی، آورده شده است.

جدول ۵-۱: تحلیل آماری کلّی حاصل از اندازه‌گیری کمّی داده‌ها برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار)

Parameters	Average ± S.D[1]
CO_2 Concentration (ppm)	513.1 ± 143.1
VOCs Concentration (ppm)	0.13 ± 0.57
$PM_{2.5}$ Concentration ($\mu g/m^3$)	12.0 ± 8.9

[1] Standard Deviation

Air Temperature (ºC)	23.1 ± 2.4
Relative Humidity (%)	20.6 ± 9.2
Air Velocity (m/s)	0.06 ± 0.08
Luminance (lux)	503.1 ± 322
Sound Level (dBa)	55.1 ± 12.3

۳-۵- جمع‌بندی نتایج حاصل از ارزیابی کیفی IEQ

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از توزیع پرسشنامه و سنجش کیفی پارامترهای موردمطالعه در هریک از فضاهای داخلی موردبررسی طی فصول موردبررسی (زمستان و بهار)، و همچنین نتایج حاصل از ارزیابی صورت گرفته بر روی این داده‌های کیفی، جمع‌بندی شده و در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

۱-۳-۵- نتایج کلّی ارزیابی احساس افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی

در شکل ۴-۹ ملاحظه شد که برای پرسش "احساس کیفیت هوای فضای داخلی"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خوب" بود. تعداد نظرات مساعد و با کیفیت بالا (کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب) نسبت به نظرات نامساعد و با کیفیت پایین (کمی‌بد، بد، خیلی‌بد) بسیار بیشتر ثبت شد. همچنین ازنظر مردان نسبت به زنان، کیفیت هوای فضاهای داخلی (IAQ)[1] موردبررسی بهتر بود.

[1] Indoor Air Quality

در مورد سؤال "احساس دمای هوا"، پاسخ بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خنثی" بود (شکل ۴-۱۰). تعداد نظرات دمای بالا (کمی‌گرم، گرم، خیلی‌گرم) از نظرات دمای پایین (کمی‌سرد، سرد، خیلی‌سرد) کمی بیشتر مشاهده شد؛ اما به‌طورکلی می‌توان گفت که نظرات در رابطه با این سؤال از توزیع نرمال[1] پیروی می‌کردند. همچنین مشخص شد که زنان نسبت به مردان دمای هوای گرم‌تری را در فضاهای داخلی موردبررسی احساس کردند.

با توجه به شکل ۴-۱۱، ملاحظه شد که در رابطه با سؤال "احساس رطوبت نسبی"، پاسخ بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "متعادل" بود. تعداد نظرات رطوبت پایین (کمی‌خشک، خشک، خیلی‌خشک) نسبت به نظرات رطوبت بالا (کمی‌مرطوب، مرطوب، خیلی‌مرطوب) کمی بیشتر ثبت شد؛ اما در کل می‌توان گفت که نظرات در رابطه با این سؤال از توزیع نرمال پیروی می‌کردند. همچنین مشاهده شد که مردان و زنان تقریباً احساس یکسانی نسبت به این پارامتر در فضاهای داخلی موردبررسی داشتند.

بیشتر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی برای سؤال "احساس سرعت جریان هوا" به "متعادل" پاسخ دادند (شکل ۴-۱۲). تعداد نظرات سرعت جریان هوای پایین (تاحدودی‌آرام، آرام، خیلی‌آرام) از نظرات سرعت جریان هوای بالا (تاحدودی‌نسیم‌دار، نسیم‌دار، خیلی‌نسیم‌دار) بیشتر بود. همچنین بین احساس سرعت جریان هوا در مردان و زنان تفاوت چندانی دیده نشد.

از شکل ۴-۱۳ نتیجه شد که در رابطه با سؤال "احساس روشنایی"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "روشن" بود. تعداد نظرات روشنایی بالا (کمی‌روشن، روشن، خیلی‌روشن) نسبت به نظرات روشنایی پایین (کمی‌تاریک، تاریک، خیلی‌تاریک) بیشتر مشاهده شد. همچنین بین افرادی که به روشنایی بالا (کمی‌روشن، روشن، خیلی‌روشن) رأی دادند، تفاوتی محسوسی بین درصد مردان و زنان ملاحظه نشد.

[1] Normal Distribution

در مورد سؤال "احساس میزان صدا"، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "تاحدودی‌باسروصدا" بود (شکل ۴-۱۴). تعداد نظرات میزان صدای بالا (تاحدودی‌باسروصدا، باسروصدا، خیلی‌باسروصدا) از نظرات میزان صدای پایین (تاحدودی‌ساکت، ساکت، خیلی‌ساکت) بیشتر ثبت شد. همچنین مشخص شد که ازنظر مردان نسبت به زنان فضاهای داخلی موردبررسی ساکت‌تر بودند.

در شکل ۴-۱۵ ملاحظه شد که برای سؤال "احساس کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی" که درواقع برآیند احساس افراد در رابطه با تمامی پارامترهای موردمطالعه بود، پاسخ اکثر ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی "خوب" بود. تعداد نظرات مساعد و با کیفیت بالا (کمی‌خوب، خوب، خیلی‌خوب) نسبت به نظرات نامساعد و با کیفیت پایین (کمی‌بد، بد، خیلی‌بد) بسیار بیشتر مشاهده شد. همچنین ازنظر مردان نسبت به زنان IEQ موردبررسی بهتر بود.

۲-۳-۵- نتایج کلّی استخراج مقادیر خنثی

به‌منظور جمع‌بندی نتایج حاصل از آنالیز برازش خطی[1] بین مقادیر کمّی حاصل از اندازه‌گیری و وزن پاسخ‌های کیفی حاصل از پرسشنامه (شکل ۳-۱ و اشکال ۴-۱۶ تا ۴-۲۳) و درنهایت استخراج مقادیر خنثی[2] برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در فضاهای داخلی موردبررسی طی فصول موردبررسی (زمستان و بهار)، جدول ۵-۲ ارائه شده است. در این جدول مقادیر خنثیِ هریک از پارامترهای موردمطالعه در مجموع دو فصل، آورده شده است. با توجه به شکل ۴-۱۷ برای پارامتر غلظت آلاینده VOCs، در هیچ‌یک از فصول زمستان، بهار و مجموع دو فصل، مقادیر خنثیِ منطقی و قابل‌قبول به دست نیامد. همچنین با توجه به شکل ۴-۲۲، ملاحظه شد که برای پارامتر روشنایی، در

[1] Linear Regression
[2] Neutral Values

هیچ‌یک از فصول زمستان، بهار و مجموع دو فصل، مقادیر خنثی‌ای که منطقی، مثبت و قابل‌قبول باشد حاصل نشد.

جدول ۵-۲: مقادیر خنثی حاصل از ارتباط داده‌های کمّی و کیفی برای پارامترهای موردمطالعه در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار)

Parameters	Neutral Value
CO_2 Concentration (ppm)	1053.2
$PM_{2.5}$ Concentration ($\mu g/m^3$)	60.2
Air Temperature (^oC)	21.9
Relative Humidity (%)	35.3
Air Velocity (m/s)	0.57
Sound Level (dBa)	52.9

۳-۳-۵- نتایج کلّی ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی

به‌منظور جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی میزان رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی موردبررسی برای هریک از پارامترهای موردمطالعه طی فصول موردبررسی (زمستان و بهار)، جدول ۵-۳ ارائه شده است. در این جدول درصد هریک از پاسخ‌های موجود (کاملاًغیرقابل‌قبول، تاحدودی‌غیرقابل‌قبول، تاحدودی‌قابل‌قبول و کاملاًقابل‌قبول) نسبت به تعداد کل پرسشنامه‌ها به تفکیک مردان و زنان برای هریک از پارامترهای موردمطالعه در مجموع دو فصل آورده شده است.

به‌طورکلّی ساکنان و افراد حاضر در فضاهای داخلی موردبررسی، نسبت به تمامی پارامترهای موردمطالعه و شرایط زیست‌محیطی حاکم بر این فضاها رضایت بالایی داشتند و برای آن‌ها شرایط

موجود در این فضاها قابل‌قبول بود. همچنین در رابطه با تمامی پارامترهای موردمطالعه، مردان تقریباً دو برابر نسبت به زنان رضایت بیشتری را اعلام کردند.

جدول ۵-۳: توزیع درصد رضایت افراد از شرایط موجود در فضاهای داخلی در رابطه با هریک از پارامترها در مجموع فصول موردبررسی (زمستان و بهار)

Parameters	Clearly Unacceptable		Just Unacceptable		Just Acceptable		Clearly Acceptable	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
IAQ	1.92	1.12	8.65	6.41	35.26	15.23	22.44	8.97
Air Temperature	0.96	1.61	8.81	5.13	33.33	16.19	25.16	8.81
Relative Humidity	1.76	1.44	10.10	5.29	29.97	16.83	26.44	8.17
Air Velocity	2.08	0.96	7.21	3.85	26.28	16.51	32.69	10.42
Luminance	1.76	0.32	9.62	3.85	26.92	11.85	29.97	15.71
Sound Level	5.61	1.44	16.03	6.41	28.04	14.91	18.59	8.97
Overall IEQ	0.80	0.32	5.93	3.53	44.23	20.83	17.31	7.05

۵-۴- پیشنهادات جهت مطالعات آتی

با توجه به مطالعات صورت گرفته در تحقیق حاضر و همچنین نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت زیست‌محیطی فضاهای داخلی (IEQ) دانشگاه صنعتی شاهرود، موارد ذیل جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود:

- انجام مطالعات جامع درزمینه‌ی ساختمان های سبز[1] در ایران

[1] Green Building

- انجام تحقیقات یکپارچه جهت تدوین آیین‌نامه ساختمان سبز ایران، مطابق با آیین‌نامه‌های بین‌المللی موجود
- تدوین استاندارد داخلی IEQ شامل ضوابط طراحی و محدوده‌های مجاز جهت ارزیابی مباحث مرتبط با IEQ نظیر IAQ، آسایش دمایی، آسایش بصری و آسایش صوتی
- انجام مطالعات و ارزیابی سایر ویژگی‌های مطرح در ساختمان سبز نظیر سایت پایدار (SS)[1]، انرژی و اتمسفر (EA)[2]، کارآمدی آب (WE)[3] و مصالح و منابع (MR)[4]، به‌ویژه با مطالعه موردی در محیط و فضاهای دانشگاهی
- بررسی دیگر پارامترهای مؤثر بر IEQ نظیر چشم‌انداز فضاهای داخلی، عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع، مصالح به‌کار رفته در فضاهای داخلی، آلاینده‌های بیولوژیکی هوای فضای داخلی مانند قارچ‌ها، کپک‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها و سایر آلاینده‌های هوای فضای داخلی چون مونواکسید کربن (CO) و ذرات معلّق با قطر آئرودینامیک[5] کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10})
- ارزیابی IEQ با مطالعه موردی در سایر فضاهای داخلی نظیر مدارس ابتدایی و دبیرستان‌ها، هتل‌ها، رستوران‌ها، بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، ادارات، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، ایستگاه‌های راه‌آهن، فرودگاه‌ها و پایانه‌های اتوبوس‌رانی
- ارزیابی IEQ در بازه زمانی بلندمدت (سالانه) و مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از تحقیق حاضر
- انجام مطالعات در رابطه با سایر مدل‌های ارزیابی IEQ و به‌کارگیری روش‌های مختلف در تحقیقات مشابه تحقیق حاضر

[1] Sustainable Site
[2] Energy and Atmosphere
[3] Water Efficiency
[4] Materials and Resources
[5] قطر آئرودینامیک معادل قطر ذره کروی با چگالی واحد است که سرعت سقوط ثقلی آن در هوای آرام برابر ذره‌ی موردنظر باشد.

منابع و مراجع

[1] Kubba S. (2010), "*LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook*", Butterworth-Heinemann Elsevier, USA.

[2] LEED v3 (2009), "*Reference Guide for Green Building Design and Construction*", U. S. Green Building Council, USA.

[3] Sakhare V. V. and Ralegaonka R. V. (2014) "Indoor environmental quality: review of parameters and assessment models" *Architectural Science Review*, 57, 2, pp 147-154.

[4] Fisk WJ. (2000) "Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency" *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, pp 537-566.

[5] Wargocki P., Wyon DP., Sundell J., Clausen G. and Fanger PO. (2000) "The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity" *Indoor Air*, 10, pp 222-236.

[6] Bakke J. V., Norbäck D., Wieslander G., Hollund B. E., Florvaag E. and Haugen E. N. (2008) "Symptoms, complaints, ocular and nasal physiological signs in university staff in relation to indoor environment temperature and gender interactions" *Indoor Air*, *18*, pp 131-143.

[7] Yudelson J. (2007), "*Green Building A to Z Understanding of Green Building*", New Society, Canada.

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Green_building

[9] Ching F. D. K. and Shapiro I. M. (2014), "*Green Building Illustrated*", John Wiley & Sons, USA.

[10] Woolley T. (1997), "*Green Building Handbook*" Vol. 1, E & FN Spon, UK.

[11] Grumman D. L. (2006), "*ASHRAE GreenGuide The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings*", Ed. 2, Butterworth-Heinemann Elsevier, USA.

[12] Yudelson J. (2008), "*The Green Building Revolution*", Island Press, USA.

[13] LEED v4 (2016), "*Reference Guide for Building Design and Construction*", U. S. Green Building Council, USA.

[14] Sarbu I. and Sebarchievici C. (2013) "Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings" *Energy and Buildings*, 60, pp 410-419.

[15] Di Giulio M., Grande R., Di Campli E., Di Bartolomeo S. and Cellini L. (2010) "Indoor air quality in university environments" *Environ Monit Assess*, 170, pp 509-517.

[16] Kats G., Alevantis L., Berman A., Mills E. and Perlman J. (2003), "*The costs and financial benefits of green buildings*", California's sustainable building task force, USA.

[17] Pyke C., McMahon S. and Dietsche T. (2010), "*Green building & human experience testing green building strategies with volunteered geographic information*", U.S. Green Building Council, USA.

[18] Wilson A. (2004) "Productivity and green buildings" *Environmental Building News*, 13, 10.

[19] Dales R., Liu L., Wheeler A. J. and Gilbert N. L. (2008) "Quality of indoor residential air and health" *Canadian Medical Association Journal*, 179, pp 147-152.

[20] Wong L. T., Mui K. W. and Hui P. S. (2008) "A Multivariate-Logistic Model for Acceptance of Indoor Environmental Quality (IEQ) in Offices" *Building and* Environment, 43, 1, pp 1-6.

[21] Frontczak M. and Wargocki P. (2011) “Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments” *Building and Environment*, 46, pp 922-937.

[22] Wong N. H. and Jan W. L. S. (2003) “Total building performance evaluation of academic institution in Singapore” *Building and Environment*, 38, 1, pp 161-176.

[23] Śmiełowska M., Marć M. and Zabiegała B. (2017) “Indoor air quality in public utility environments a review” *Environ Sci Pollut Res*, 24, pp 11166-11176.

[24] Binggeli C. (2003), “*Building Systems for Interior Designers*”, John Wiley & Sons, USA.

[۲۵] صابریان ا و بیات پ، (۱۳۹۳)، "بررسی اثر مصالح ساختمانی با نشت پایین بر روی کیفیت هوای داخلی خانه های آپارتمانی تازه ساخت"، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، موسسه آموزش عالی مهر اروند تهران، ایران.

[26] Macedo A., Magalhães O., Brito A. and Mayan O. (2013) “Characterization of Indoor Environmental Quality in Primary Schools in Maia: A Portuguese Case Study” *Human and Ecological Risk Assessment*, 19, pp 126-136.

[27] Heinzerling D., Schiavon S., Webster T. and Arens E. (2013) “Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme” *Building and Environment*, 70, pp 210-222.

[28] Chiang CM., Chou PC., Lai CM. and Li YY. (2001) “A methodology to assess the indoor environment in care centers for senior citizens” *Building and Environment*, 36, pp 561-568.

[29] Olesen B. W. (2012) “Revision of EN 15251: indoor environmental criteria” *REHVA European HVAC Journal*, pp 6-12.

[30] REHVA (2011), "*Indoor climate quality assessment*", Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations, Belgium.

[31] Sunikka M. (2003), "*Energy performance of buildings directive (EPBD) improving the energy efficiency of the existing housing stock*", European Parliament and Council. Europe.

[32] Zhang J. and Smith K. R. (2003) "Indoor air pollution: a global health concern" *British Medical Bulletin*, 68, 1, pp 209-225.

[33] Yoon C., Lee K. and Park D. (2011) "Indoor air quality differences between urban and rural preschools in Korea" *Environ Sci Pollut Res*, 18, pp 333-345.

[34] Sofuoglu S. C., Toprak M., Inal, F. and Cimrin A. H. (2015) "Indoor air quality in a restaurant kitchen using margarine for deep-frying" *Environ Sci Pollut Res*, Published online.

[35] Tsakas M. P. and Siskos P. A. (2011) "Indoor Air Quality in the Control Tower of Athens International Airport, Greece" *Indoor Built Environ*, 20, 2, pp 284-289.

[36] Kumar A., Singh B. P., Punia M., Singh D., Kumar K. and Jain V. K. (2014) "Assessment of indoor air concentrations of VOCs and their associated health risks in the library of Jawaharlal Nehru University, New Delhi" *Environ Sci Pollut Res*, 21, pp 2240-2248.

[۳۷] کاشی گ، پورکبیری ب و خالصی م، (۱۳۹۲)، "اندازه گیری ترکیبات آلی فرار تولید شده در فرآیند ماست بندی و هوای داخلی ماست بندی مطالعه موردی"، سومین همایش ملی امنیت غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی سوادکوه، ایران.

[38] JKKP DP(S) 127/379/4-39 (2010), "*Industry Code of Practice on Indoor Air Quality*", Department of Occupationally Safety and Health Ministry of Human Resources, Malaysia.

[39] Krzyzanowski M. and Cohen A. (2008) “Update of WHO Air Quality Guidelines” *Air Qual Atmos Health*, 1, pp. 7-13.

[40] Oh H. J., Jeong N. N., Chi W. B., Seo J. H. and Jun SM. (2015) “Characterization of particulate matter concentrations and bioaerosol on each floor at a building in Seoul, Korea” *Environ Sci Pollut Res*, Published online

[41] Zwozdziak A., Sówka I., Willak-Janc E., Zwozdziak J., Kwiecińska K. and Balińska-Miśkiewicz W. (2016) “Influence of PM1 and PM2.5 on lung function parameters in healthy schoolchildren-a panel study” *Environ Sci Pollut Res*, 23, pp 23892-23901.

[42] MacNaughton P., Eitland E., Kloog I., Schwartz J. and Allen J. (2017) “Impact of Particulate Matter Exposure and Surrounding Greenness on Chronic Absenteeism in Massachusetts Public Schools” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14, pp 207-217.

[۴۳] دهقانی م، شمس‌الدینی ن، سعیدی ابواسحاقی ا و زمانیان ز، (۱۳۹۱)، "بررسی ارتباط بین غلظت ذرات معلق درهوای خارج و هوای داخل بیمارستان حافظ شیراز"، سومین همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی، دانشگاه صنعتی شریف تهران، ایران.

[۴۴] دهقانی م، کمالی ی، داوودی س و شمس‌الدینی ن، (۱۳۹۲)، "بررسی ارتباط بین غلظت ذرات معلق در هوای خارج و داخل بیمارستان دنا شیراز"، شانزدهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، ایران.

[۴۵] منصوری ن، کاکاوند م و کاکاوند م، (۱۳۹۱)، "بررسی تاثیر آلودگی ذرات معلق (PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_1) منتشره از ترافیک شهری بر کیفیت هوای داخل ساختمان های اداری شهر تهران"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، ایران.

[46] Esworthy R. (2013), "*The National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particulate Matter (PM) EPA's 2006 Revisions and Associated Issues*", Congressional Research Service, USA.

[47] Asadi I., Hussein I. and Palanisamy K. (2014) "Indoor Environmental Quality (IEQ) Acceptance of Air Conditioned Buildings in Malaysia Case Study of Universiti Tenaga Nasional" *Advanced Materials Research*, 953-954, pp 1513-1519.

[48] Lee M. C., Mui K. W., Wong L. T., Chan W. Y., Lee E. W. M. and Cheung C. T. (2012) "Student learning performance and indoor environmental quality (IEQ) in air-conditioned university teaching rooms" *Building and Environment*, 49, pp 238-244.

[49] http://irimo.ir/far/index.php

[50] INSO 10847-26 (2016), "*Indoor air Part 26 Sampling strategy for carbon dioxide*", Ed. 1, Iranian National Standardization Organization, Iran.

[51] EN 15251 (2006), "*Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality thermal environment lighting and acoustics*", Ver. 2.1c, European Standard, Europe.

[52] Lee Y. S. and Guerin D. A (2009) "Indoor Environmental Quality Related to Occupant Satisfaction and Performance in LEED-certified Buildings" Indoor Built Environ, 18, pp 293-300.

[53] DIN 1946-2 (1994), "*Ventilation and air conditioning Part 2 Technical health requirements*", German Institute for Standardization, Germany.

[54] EN 13779 (2007), "*Ventilation for non-residential buildings Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*", Ed. E, European Standard, Europe.

[55] Pettenkofer M. (1858) “Air change in dwellings” *Munich J.G. Cotta’sche Buchhandlung*.

[56] Xiong Y., Krogmann U., Mainelis G., Rodenburg L. A. and Andrews C. J. (2015) “Indoor air quality in green buildings: A case-study in a residential high-rise building in the northeastern United States” *Journal of Environmental Science and Health*, 50, pp 225-242.

Abstract

Most people around the world spend more than 90% of the day time in indoors such as houses, offices, factories, schools and universities. Therefore, assessment of indoor environmental quality (IEQ) in high population density indoors is required and there is lack of such these studies in Iran. The present study was carried out to evaluate the IEQ at Shahrood University of Technology via objective measurement and subjective assessment. This study was conducted in winter and spring due to the indoors service conditions and its critical time period and it was scheduled data collecting from indoors. To assessment of IEQ, parameters including concentration of carbon dioxide (CO_2), volatile organic compounds (VOCs) and particulate matter $PM_{2.5}$, air temperature, relative humidity, air velocity, luminance and sound level were measured. Also it was surveyed occupants' sensation votes by subjective assessment through questionnaires. The results showed that the average values of the parameters in indoors in total of seasons were 513.1±143.1 ppm, 0.13±0.57 ppm, 12±8.9 μg/m^3, 23.1±2.4 ^oC, 20.6±9.2 %, 0.06±0.08 m/s, 503.1±322 lux and 55.1±12.3 dBa respectively. Also according to the results, the average values for all parameters are within the related standard limits. The results stated that for the "indoor environmental quality feeling" question in the questionnaire, the number of good quality votes were much more than the number of bad quality votes. Also, men felt better IEQ than women. Generally according to the occupants' sensation in the indoors of Shahrood university of technology, IEQ were acceptable and men satisfaction were more than women (approximately twice as much).

Keywords: Indoor environmental quality, Indoor air quality, Objective measurement, Subjective assessment, Shahrood University of Technology

Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Environmental Engineering

Assessment of Indoor Environmental Quality (IEQ) (Case Study of Shahrood University of Technology)

By: Ashkan Kazemi

Supervisor
Dr. Behnaz Dahrazma

Advisor
Dr. Mohammad Zamen

June 2018