Geography and Environmental Sustainability
Homepage: http://ges.razi.ac.ir/

# Investigating the Effect of Tree Planting Patterns (Evergreen and Deciduous) on the Improvement of Urban Microclimate

**Ahmad Hami[1]| Sajjad Osan[2]| Zanyar Samadi-Todar[3]**

1. Corresponding Author, Department of Landscape Engineering, Faculty of Agriculure, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: Hami@tabrizu.ac.ir
2. Department of Landscape Engineering, Faculty of Agriculure, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. Department of Landscape Engineering, Faculty of Agriculure, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
**Received:** 12 Nov 2024
**Received in revised form:** 28 Jan 2025
**Accepted:** 03 Feb 2025
**Available online:** 21 Mar 2025

**Keywords**:
Temperature comfort,
ENVI-Met,
Tree characteristics,
Relative humidity,
CO2 concentration.

## ABSTRACT

Industrialization and urbanization have increased air pollution, making environmental sustainability a critical focus in urban planning. In this context, trees are crucial in mitigating pollution by reducing carbon dioxide (CO2) levels, increasing relative humidity, and improving urban aesthetics. This study investigates the effects of different tree planting patterns (evergreen and deciduous) on key environmental parameters: relative humidity, CO2 concentration, and ambient radiation temperature. The research was conducted near the Faculty of Agriculture of Tabriz University in East Azerbaijan Province, Iran. Using ENVI-met software, the area was modeled on October 10, 2020, at a resolution of 2 by 2 meters. The simulated data, which included climate variables such as temperature, relative humidity, and CO2 concentration, was validated using field measurements. The results showed that tree planting patterns with continuous canopy cover significantly improved environmental conditions by reducing CO2 levels, increasing relative humidity, and reducing radiant temperature. Deciduous trees, including plane trees (Platanus orientalis) and ash trees (Fraxinus excelsior), outperformed evergreen species in reducing air pollution and improving environmental quality. This superior performance is attributed to their larger leaf area and canopy diameter, which improve their ability to capture CO2 and regulate microclimatic conditions. The study highlights the critical role of strategic urban tree planting, with a particular focus on deciduous tree species with dense foliage due to their ability to improve the urban microclimate, reduce air pollution, and enhance environmental quality. By implementing these strategies, urban planners can create healthier, greener, and more sustainable cities that are better equipped to adapt to climate challenges.

**Cite this article:** Hami, A., Osan, S., & Samadi-Todar, Z. (2025). Investigating the Effect of Tree Planting Patterns (Evergreen and Deciduous) on the Improvement of Urban Microclimate. *Geography and Environmental Sustainability*, *15* (1), 115-136. https://doi.org/10.22126/GES.2025.11375.2799

© The Author (s).
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.11375.2799
Publisher: Razi University

جغرافیا و پایداری محیط
وبگاه نشریه: http://ges.razi.ac.ir/

# بررسی اثر الگوهای کاشت درختان (همیشه‌سبز و خزان‌دار) بر بهبود خرداقلیم شهری

احمد حامی[1]| سجاد اوسان[2]| زانیار صمدی تودار[3]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Hami@tabrizu.ac.ir
۲. گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳. گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**تاریخچهٔ مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۸/۲۲
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۱/۰۹
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۱۵
**دسترسی آنلاین:** ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

***کلیدواژه‌ها:***
آسایش دمایی،
ENVI-met،
ویژگی‌های درختان،
رطوبت نسبی،
غلظت دی‌اکسیدکربن.

**چکیده**

امروزه با صنعتی‌شدن شهرها و افزایش آلودگی هوا، نیاز به کاهش این آلودگی و بهبود شرایط محیطی به یکی از اولویت‌های اساسی شهرسازی تبدیل شده است. در این راستا، نقش درختان در کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش رطوبت نسبی و بهبود مناظر شهری اهمیت ویژه‌ای دارد. این مطالعه باهدف بررسی تأثیر الگوهای مختلف کاشت درختان (همیشه‌سبز و برگ‌ریز) بر رطوبت نسبی، غلظت دی‌اکسیدکربن و دمای تابشی محیط انجام شده است. منطقه تحقیق، محدوده اطراف دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در استان آذربایجان شرقی، انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met در ۱۰ اکتبر ۲۰۲۰ با دقت ۲ متر در ۲ متر (در پیکسلهای ۲*۲) مدل‌سازی شد. داده‌های شبیه‌سازی‌شده شامل متغیرهای اقلیمی مانند دما، رطوبت نسبی و غلظت $CO_2$ با اطلاعات میدانی مقایسه و صحت‌سنجی شدند. نتایج نشان داد که الگوی کاشت بدون فاصله بین تاج درختان تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش رطوبت نسبی و کاهش دمای تابشی دارد. همچنین، درختان برگ‌ریز نظیر چنار و زبان گنجشک در بهبود کیفیت محیطی و کاهش آلودگی هوا عملکرد بهتری نسبت به درختان همیشه‌سبز از خود نشان دادند. درختان پهن‌برگ با قطر و سطح برگ بزرگ‌تر، به دلیل جذب بیشتر نور خورشید و افزایش فرایندهای تبخیر و تعرق، تأثیر بیشتری بر بهبود شرایط خرداقلیمی داشتند. این تحقیق نشان می‌دهد که کاشت درختان با الگوی بدون فاصله و استفاده از گونه‌های برگ‌ریز پهن‌برگ، به ویژه در مناطقی با اقلیم مشابه تبریز، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آلودگی هوا، بهبود رطوبت نسبی و ارتقای آسایش حرارتی باشد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به طراحان شهری و برنامه‌ریزان در طراحی فضاهای سبز پایدار و کاهش اثرات منفی شهرنشینی کمک کند.

**استناد:** حامی، احمد؛ اوسان، سجاد؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۴). بررسی اثر الگوهای کاشت درختان (همیشه‌سبز و خزان‌دار) بر بهبود خرداقلیم شهری. *جغرافیا و پایداری محیط*، *۱۵* (۱)، ۱۱۵-۱۳۶. https://doi.org/10.22126/GES.2025.11375.2799

© نویسندگان.
DOI: https:// 10.22126/GES.2025.11375.2799
ناشر: دانشگاه رازی

**مقدمه**

جمعیت شهرها در حال افزایش است. در نتیجه، مساحت بیشتری برای کار و زندگی موردنیاز است؛ بنابراین شهرسازی، جاده‌سازی و توسعه شهری افزایش می‌یابد. سیستم اکولوژیکی شهری به دلیل افزایش ساختمان در شهرها و توزیع نامتعادل ساختارهای شهری آسیب می‌بیند و تأثیر جزایر گرمایی بر فضاهای شهری تشدید می‌یابد (Jin et al., 2018). شهرنشینی خارج از کنترل و خرداقلیم شهرها از عدم برنامه‌ریزی و طراحی مؤثر فضاهای باز شهری رنج می‌برد (Salata et al., 2016). با افزایش نرخ شهرنشینی، دمای شهرها نیز به دلیل جمعیت افزایش‌یافته است (Osan et al., 2023). از سوی دیگر، باتوجه‌به تمرکز بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری، موضوع سعادت و رفاه انسان به‌شدت موردتوجه پژوهشگران حوزه‌های تحقیقاتی قرار گرفته است (صمدی تودار و همکاران، ۱۴۰۳؛ حامی همکاران، ۱۴۰۳ الف؛ حامی و همکاران، ۱۴۰۴). بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها و حومه شهرها سکونت دارند و انتظار می‌رود این درصد تا سال ۲۰۳۰ به ۶۰ درصد افزایش یابد (Karakounos et al., 2018).

مطالعات اقلیمی در حوزه معماری و شهرسازی به دلیل ارتباط مستقیم بین شرایط اقلیمی و خرداقلیمی در شهرها و سلامت انسان در سال‌های اخیر به اولویت تبدیل شده است. ساکنین شهرها در معرض استرس گرمایی هستند و افراد مسن ساکن شهرها بیشتر از سایر افراد جامعه مستعد تنش گرما هستند، این امر به ویژه در کشورهای توسعه یافته که سن جمعیت به دلایل اجتماعی و تاریخی افزایش یافته است از اهمیت بالایی برخوردار است (Salata et al., 2016). اکوسیستم شهری به دلیل افزایش ساخت‌وسازها در شهرها و توزیع نابرابر زیرساخت‌های شهری آسیب دیده است؛ بنابراین، تأثیر جزایر حرارتی شهری در حال افزایش است (Jin et al., 2018). جزایر حرارتی تنش گرمایی در مناطق شهری را تشدید می‌کنند و کاهش راحتی حرارتی به طور کلی سلامت ساکنان شهر را تهدید می‌کند (Lu et al., 2017).

الگوهای اقلیمی در محیط اطراف ما در نتیجه شهرنشینی در حال تغییر هستند. شاخص دمای منطقه، الگوی بارندگی، آلبدو، رطوبت نسبی و الگوی تشعشع همگی به دلیل این امر تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند (Osan et al., 2023). مهم‌ترین پارامترهای خرداقلیمی که آسایش حرارتی را تعیین می‌کنند عبارت‌اند از: دمای هوا، رطوبت نسبی، جابه‌جایی هوا و متوسط دمای تابشی. نسبت فشار هوا به بخار آب و فشار اشباع به‌عنوان رطوبت نسبی شناخته می‌شود که با استفاده از رطوبت نسبی، رطوبت مطلق و فشار بخار آب محاسبه می‌شود (Coccolo et al., 2016). دمای یک سطح مجازی سیاه یکنواخت که در آن یک جسم همان مقدار گرمای تابشی را در یک محیط واقعی غیریکنواخت مبادله می‌کند یکی از معیارهای قرارگرفتن در معرض تابش نور در یک محیط است (Coccolo et al., 2016). طول‌موج‌های بلند و کوتاه تابش باید در گرمای تابشی که بین بدن انسان و محیط در فضاهای باز منتقل می‌شود، از جمله نور مستقیم خورشید، پراکندگی تابش خورشید، بازتاب، تابش مادون‌قرمز از آسمان، و تابش مادون‌قرمز از محیط، موردتوجه قرار گیرد (Barakat et al., 2017). کیفیت مواد محیط و درجه آلبدوی سطح به طور مستقیم با میانگین دمای تابشی و نور جذب شده مرتبط است (Perini et al., 2018). به دلیل سطوح مختلف، تابش و انعکاس، جذب و تابش نور با طول‌موج‌های مختلف، دمای متوسط تابش در شهرها متفاوت است (Barakat et al., 2017).

ویژگی‌های مواد محیط و آلبدوی[1] سطح به طور قابل‌توجهی بر میانگین دمای تابشی و میزان نور جذب‌شده تأثیر می‌گذارند (Perini et al., 2018). این تفاوت‌ها در بازتاب، جذب و تابش نور با طول‌موج‌های متنوع، منجر به تغییرات دمای متوسط تابشی در محیط‌های شهری می‌شود (Barakat et al., 2017). نسبت فشار بخار آب در هوا به فشار اشباع که به‌عنوان رطوبت نسبی شناخته می‌شود و با استفاده از رطوبت نسبی، رطوبت مطلق و فشار بخار آب محاسبه می‌شود (Coccolo et al., 2016). آسایش دمایی در محیط اطراف تحت‌تأثیر سطوح رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۷۰ درصد قرار نمی‌گیرد (Barakat et al., 2017). پدیده تبخیروتعرق باعث افزایش رطوبت نسبی در محیط می‌شود که با فرایند فتوسنتز مرتبط است که انرژی گرمایی را جذب کرده و دمای محیط را پایین می‌آورد (Perini et al., 2018).

1. Albedo

ازآنجاکه درختان و فضاهای سبز تأثیر قابل‌توجهی در تنظیم شرایط میکرو هواشناسی دارند، تحقیق در مورد جنبه‌ها و ویژگی‌های اساسی فضاهای سبز به‌شدت ضروری است (Abdi et al., 2020). آن‌ها با جایگزینی سطوح سخت شهری با عناصر طبیعی، جذب انرژی خورشیدی را بهبود داده و انتقال تشعشعات طول‌موج بلند را محدود می‌کنند و به دام افتادن تشعشعات طول‌موج کوتاه در جو نزدیک زمین دمای جو را افزایش می‌دهد (Wu & Chen, 2017). درختان همیشه‌سبز با کاهش سرعت باد و محافظت از سطوح در برابر نور مستقیم خورشید به مدیریت و کیفیت محیط اطراف کمک می‌کنند (Zhang et al., 2018). همچنین درختان خزان‌دار با ایجاد سایه در تابستان و عبور نور خورشید در زمستان، آسایش را در طول سال فراهم می‌سازند (Perini et al., 2018). متوسط دمای تابشی[1] که به‌عنوان دمای یک سطح مجازی سیاه‌وسفید یکنواخت تعریف می‌شود که در آن یک جسم همان مقدار گرمای تابشی را در یک محیط واقعی غیریکنواخت مبادله می‌کند یکی از معیارهای قرارگرفتن در معرض تابش نور در یک محیط است (Coccolo et al., 2016).

هنگامی که گرمای تابشی بین بدن انسان و محیط در فضاهای باز منتقل می‌شود، باید به طول‌موج‌های بلند و کوتاه تابش پرداخت: نور مستقیم خورشید، پراکندگی نور خورشید، انعکاس نور خورشید، تابش مادون‌قرمز از آسمان، اشعه مادون‌قرمز و سازگاری با محیط‌زیست (Barakat et al., 2017; Osan et al., 2023). درختان نقش مؤثرتری در کاهش دما و تغییرات اقلیمی نسبت به سایر اجزای گیاهان دارند (Lee et al., 2016). با ایجاد سایه و به حداکثر رساندن جذب تشعشعات طول‌موج کوتاه، درختان می‌توانند دمای هوا و محیط را تنظیم کرده و راحتی حرارتی را ارتقا دهند (Lee et al., 2020). مقدار سایه، تبخیروتعرق درختان همگی تحت‌تأثیر شکل و اندازهٔ برگ‌های درختان قرار می‌گیرند. نوع برگ‌های درخت (برگ‌های پهن یا سوزنی‌برگ) می‌تواند به افزایش خنک‌سازی و کاهش دمای محیط کمک کند (Hami et al., 2019). با الگوهای کاشت مناسب و مکان‌یابی صحیح درختان، می‌توان در فصل‌ها و روزهای گرم دمای هوا را کاهش داد و در فصل‌ها و روزهای سرد آن را افزایش داد (Zhang et al., 2018).

آلودگی هوا و به‌تبع آن افزایش میزان کربن‌دی‌اکسید در شهرهای بزرگ به یک معضل دائمی تبدیل شده است و امروزه شهروندان با بیماری‌های متفاوت منتج از آلودگی شهری دست‌وپنجه نرم می‌کنند. در همین زمینه فضای سبز به‌عنوان شش‌های تنفسی شهری نقش بسیاری در کاهش آلودگی و جذب دی‌اکسیدکربن دارند. بااین‌حال تأثیر گونه‌های گیاهی و الگوهای کاشت باتوجه‌به شرایط اقلیمی یکسان نمی‌باشد؛ بنابراین شناسایی گونه‌های گیاهی دارای بهترین کارکرد در این زمینه امری ضروری و حیاتی به نظر می‌رسد که کمک شایانی در بهبود هوای شهری را می‌تواند داشته باشد. از طرفی کاهش بارش‌ها و خشک‌سالی‌های متمادی باعث تغییر خرداقلیم شهرها گردیده و کمبود رطوبت در محیط‌های شهری در اغلب اوقات سال تأثیر ناگواری بر احساس راحتی تعدیل دمایی سلامت فیزیکی ساکنین (ازجمله بیماری‌های پوستی و غیره) داشته است.

شناسایی راه‌های افزایش رطوبت نسبی با تغییر الگوهای کاشت همچنین مدل‌های تاج‌های مختلفی درختان می‌تواند بر بهبود رطوبت نسبی محیط شهری کمک کند. نتایج این تحقیق می‌تواند دستورالعمل‌های کاروانی برای طراحان شهری معماران منظر، در استفاده از گونه‌های کاشت درختان و همچنین کاشت درختان با مدل‌های تاج مختلف مؤثر فراهم کند. براین‌اساس این تحقیق قصد دارد مسائل مهمی از این زمینه پاسخ دهد: ۱- کدام‌یک از الگوهای کاشت کارکرد بهتری در تحلیل دما کاهش کربن‌دی‌اکسید و افزایش رطوبت نسبی در محیط شهری ایفا می‌کنند؟ ۲- کدام‌یک از مدل‌های تاج درختان بهترین کارکرد را در بهبود آسایش دمایی کاهش کربن‌دی‌اکسید و افزایش رطوبت نسبی ایفا می‌کنند و همچنین تأثیرات درختان خزان پذیر و همیشه به سبز در شاخص‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### محدوده موردمطالعه

منطقه موردمطالعه اطراف دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران است (شکل

1. Mean Radiant Temperature (° C)

۲). تبریز با ۲۳۷۵۶ کیلومتر مربع مساحت، سومین شهر بزرگ ایران پس از تهران و مشهد است (حامی و همکاران، ۱۴۰۳ ب). تبریز بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، ۱/۶ میلیون نفر جمعیت داشته است (حامی و همکاران، ۱۴۰۳ ج). میانگین بارندگی سالانه در این شهر ۳۸۰ میلی متر است، در حالی که میانگین دمای سالانه ۱۲ درجه سلسیوس است در یک دوره ۳۰ ساله است. در فصل تابستان بادهای غالب تبریز معمولاً از سمت شرق و غرب است (حامی و همکاران، ۱۴۰۳ ب). این شبیه‌سازی در تاریخ ۱۰ اکتبر ۲۰۲۰، یکی از سردترین روزهای سال انجام شد. ایستگاه هواشناسی شرق تبریز اطلاعاتی در مورد حداقل و حداکثر دما، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و جهت باد اندازه‌گیری کرد. جدول ۱ اطلاعات ورودی نرم افزار ENVI-met را نشان می‌دهد. ایستگاه هواشناسی شرق تبریز در نزدیکی دانشگاه تبریز دمای هوا، رطوبت نسبی و فشار بخار آب را در روز شبیه‌سازی به مدت ۳ ساعت این اندازه‌گیری انجام شد.

**جدول ۱. مطالعات اقلیمی محدوده مورد مطالعه و اطلاعات ورودی ENVI-met**

| متغیرها | مقادیر |
|---|---|
| طول و عرض جغرافیایی | 46°18′E, 38°04′N |
| وضوح شبکه افقی | 2m × 2m |
| وضوح شبکه عمودی | ۲ m |
| چرخش مدل خارج از شبکه شمال | ۱۶/۶° |
| تاریخ شبیه‌سازی | ۱۴۰۳ |
| حداکثر دمای هوا | ۱۹/۶ °C |
| حداقل دمای هوا | ۹/۴ °C |
| سرعت باد ۱۰ متر | ۳/۳m/s |
| جهت باد | ۹۰° |
| طول و عرض ساختمان | ۱۰۲*۳۱ |
| فضای اطراف سایت | وجود یک نوار فضای سبز و بعد از آن وجود یک خیابان |
| طول و عرض فضای کاشت شده و شبیه‌سازی‌شده | ۱۸۰*۱۶ |
| محدوده موردمطالعه | تبریز، آذربایجان شرقی، ایران |

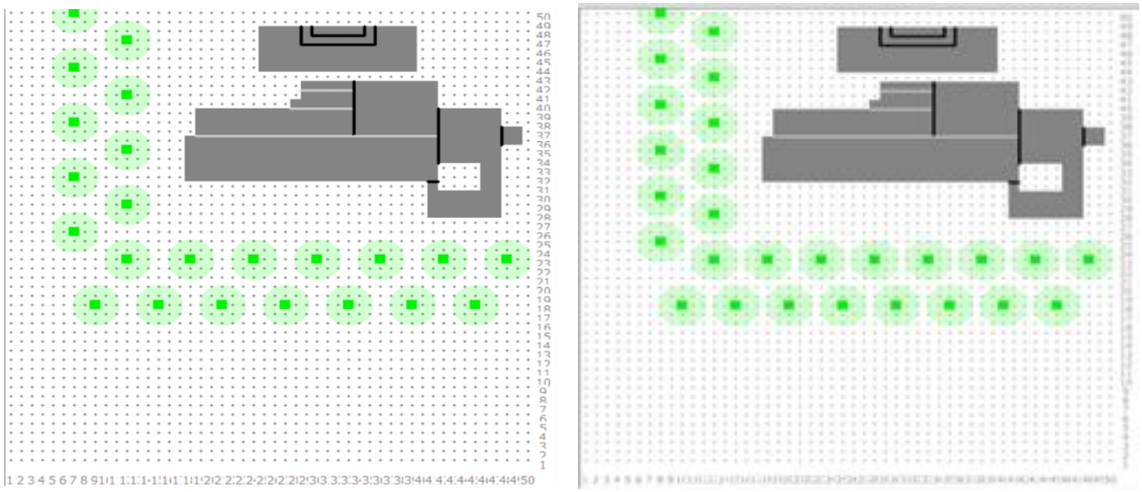
## داده‌های مورداستفاده

در این مقاله، داده‌های مورداستفاده شامل اطلاعات اقلیمی ایستگاه هواشناسی شرق تبریز بوده که در نزدیکی محل موردمطالعه (دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز) قرار دارد. این داده‌ها شامل حداقل و حداکثر دمای هوا، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد در ارتفاع ۱۰ متری است. این داده‌ها به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار ENVI-met 4.4.6 استفاده شده است.

نرم‌افزار ENVI-met یکی از ابزارهای شبیه‌سازی خرداقلیمی است که به‌صورت سه‌بعدی و با وضوح‌بالا (۲ متر افقی و ۲ متر عمودی) تغییرات اقلیمی را مدل‌سازی می‌کند. این نرم‌افزار می‌تواند سایه، جذب، و تابش امواج کوتاه و بلند را شبیه‌سازی کرده و تأثیر پوشش گیاهی را در کاهش دما، افزایش رطوبت نسبی، و کاهش آلودگی هوا تحلیل کند. برای این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها شامل ۱۲ مدل مختلف کاشت درخت در دو الگوی کاشت متفاوت بوده است: الگوی اول با فاصله یک متری بین تاج درختان و الگوی دوم با تاج‌های همپوشان و بدون فاصله. مدل‌سازی‌ها شامل ویژگی‌های فیزیکی درختان مختلف مانند ارتفاع درخت، قطر تاج، تراکم شاخ و برگ، و نوع برگ‌ها (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ) بوده است. همچنین دو نوع درخت، یعنی خزاندار و همیشه‌سبز، در الگوهای مختلف کاشت بررسی شده‌اند. خروجی نرم‌افزار شامل شاخص‌های کلیدی مانند غلظت دی‌اکسیدکربن میانگین دمای تابشی(MRT) ، و رطوبت نسبی محیط است که با داده‌های میدانی برای ارزیابی دقت مدل مقایسه شد.

با استفاده از مدل ENVI-met 4.4.6 منطقه موردنظر در مرحله اول برای این مطالعه شبیه‌سازی شد (شکل ۱). سپس، اعتبار مدل با مقایسه خروجی مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت پس از بررسی و تحلیل

سناریوهای موجود در مدل شبیه‌سازی شده برای افزایش شرایط دما و آسایش حرارتی در محیط تعیین شد. دوازده مدل با دو الگوی کاشت مختلف برای کاهش دما و افزایش آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفت (شش مدل به عنوان فاصله تاج یک متری و دو ردیف به صورت Z - شکل[1] و شش مدل به عنوان تاج‌های همپوشانی به عنوان Z) از نرم افزار ENVI-met برای شبیه‌سازی انواع جهت‌های مختلف استفاده شد.



S1 S2

**شکل ۱. طرح شبیه‌سازی اجرا شده در محیط نرم افزاری ENVI-met**

**- مدل‌های شبیه‌سازی شده**

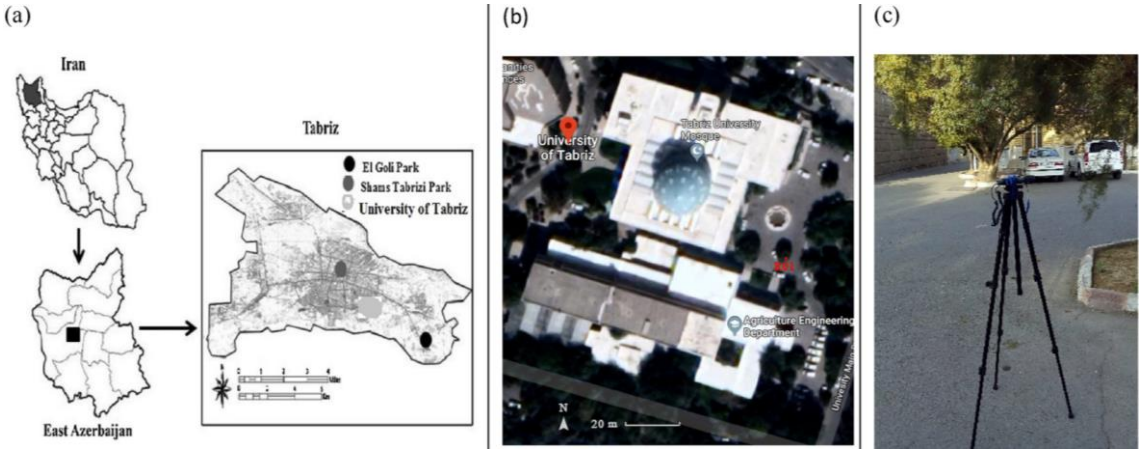
برای اجرای تمامی سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در پژوهش حاضر از نرم‌افزار ENVI-met 4.4.6 استفاده شد. این نرم‌افزار یک مدل خرداقلیمی غیرهیدرواستاتیکی است که می‌تواند اقلیم کلان‌شهرها را با وضوح شبکه ۰/۵ تا ۱۰ متر در فضا و وضوح فیزیکی ۱۰ ثانیه در سه بعدی شبیه‌سازی کند (Karakounos et al., 2018). این مدل اقلیم شهری معمولاً در معماری، طراحی ساختمان و طراحی محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش گیاهی در این مدل به عنوان یک مانع متخلخل در مقابل تابش باد و خورشید و به عنوان موجودی زنده با فعالیت‌های فیزیولوژیکی مانند تبخیروتعرق و فتوسنتز در نظر گرفته می‌شود. در این مدل می‌توان از انواع مختلف پوشش‌گیاهی با ویژگی‌های منحصر به فرد استفاده کرد. این مدل شامل یک پایگاه داده گیاهی است که می‌تواند بزرگ‌تر شود (Abdi et al., 2020). این مدل می‌تواند سایه، جذب و تابش امواج کوتاه و بلند را با در نظر گرفتن پارامترهای دیگر گیاه مانند ارتفاع و تراکم برگ تعیین کند (Morakinyo et al., 2017). تعداد ردیف درختان، فاصله بین سایبان درختان، فاصله کاشت در ردیف، ارتفاع درخت، قطر تاج پوشش، تراکم شاخ و برگ، پوشش زمین، رطوبت خاک و محیط اطراف، همه بر شاخص های اقلیمی آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارند. درختان مورد نظر در تمامی الگوها یکسان در نظر گرفته خواهند شد. وضوح فضایی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های این پژوهش ۲ متر افقی و ۲ متر عمودی بود. همچنین از مدل فرعی Leonardo V4.4.4 برای گرفتن نقشه‌های دو بعدی و داده‌های آب و هوایی نرم افزار ENVI-met4.4.6 استفاده شد.

**- روش تحلیل**

برای تحلیل داده‌های این تحقیق از نرم‌افزار ENVI-met 4.4.6 استفاده شد که یک مدل خرداقلیمی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی اثرات زیرساخت‌های سبز و پوشش گیاهی بر شرایط اقلیمی است. ابتدا منطقه موردمطالعه با استفاده از مختصات جغرافیایی و داده‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد مدل‌سازی شد. ویژگی‌های فیزیکی درختان از جمله ارتفاع، قطر تاج و نوع برگ نیز از داده‌های موجود استخراج و به مدل اضافه شدند. دو سناریوی اصلی برای الگوهای

1. Z-shaped

کاشت طراحی شدند: (۱) الگوی کاشت با فاصله ۱ متری بین تاج درختان و (۲) الگوی کاشت بدون فاصله بین تاج‌ها (همپوشانی تاج‌ها). در هر سناریو ترکیبات مختلفی از درختان خزان‌دار (مانند چنار و زبان‌گنجشک) و همیشه‌سبز (مانند سرو نقره‌ای و کاج سیاه) تعریف شد. شبیه‌سازی‌ها در یک روز سرد با دمای پایین و برای مدت ۸ ساعت (از ۱۰ صبح تا ۶ عصر) انجام شدند. خروجی‌های مدل شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، غلظت دی‌اکسیدکربن و متوسط دمای تابشی (MRT) با استفاده از مدل Leonardo V4.4.4 تحلیل و برای تولید نقشه‌های اقلیمی و نمودارهای مرتبط به کار گرفته شدند. داده‌های خروجی شبیه‌سازی با داده‌های میدانی جمع‌آوری‌شده (داده‌های هواشناسی مورد نیاز از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی، جهت و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری) از ایستگاه هواشناسی شرق تبریز مقایسه و صحت‌سنجی شدند. این مقایسه به منظور ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی محیط انجام شد. این روش تحلیل، امکان بررسی دقیق تأثیرات الگوهای مختلف کاشت درختان بر شرایط ریزاقلیمی و شناسایی بهترین ترکیبات برای بهبود شرایط زیست‌محیطی و آسایش حرارتی را فراهم کرد.




**شکل ۲. (a) تبریز؛ (b) نقشه گوگل از منطقه موردمطالعه؛ c ابزار اندازه‌گیری**

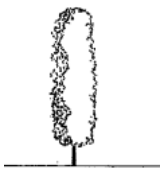
**- آماده‌سازی مدل**

به‌طورکلی در این تحقیق درختان انتخاب شده در دو الگوی کاشت مورد بررسی و تضاد قرار گرفتند. درختان چنار[1]، تبریزی[2]، زبان‌گنجشک[3]، نارون[4]، سرو نقره‌ای[5]، کاج سیاه[6] از رایج‌ترین کاشته شده در تبریز هستند (جدول ۲). در الگوی کاشت L- شکل با دو گزینه، ۱۲ مدل (با استفاده از ابزار SPACE، شش مدل با فاصله تاج یک متر و دو ردیف نامنظم، و شش موقعیت با تاج‌های روی هم قرار گرفته‌اند) به طور نامنظم در جنوب و غرب (جنوب غربی و شمال غربی) درختان دانشکده کشاورزی تبریز شبیه‌سازی شد (شکل ۲).

دو نوع الگوی کاشت به طور کلی مورد مطالعه قرار گرفت که هر کدام با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت (شش مدل با در نظر گرفتن فاصله تاج پوشش یک متری، دو ردیف به‌طور نامنظم و شش مدل به‌عنوان سایبان روی هم کاشته شدند). لازم به ذکر است که فقط یک نوع درخت در دو ردیف به عنوان الگوهای شماره ۱ و ۲ کاشته شدند و در نتیجه با مشاهده خروجی برنامه تأثیر هر درخت و الگو بررسی می‌شود. هر یک از این الگوها و ترکیب‌های درختکاری از میان الگوهای موجود در مناطق سبز شهری انتخاب شده‌اند.

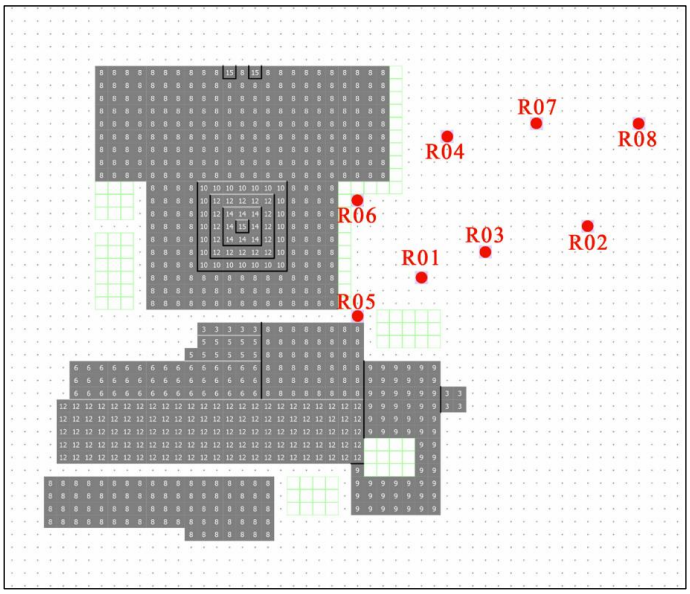
1. Platanus spp.
2. Populus nigra
3. Fraxinus excelsior
4. Ulmus minor
5. Cupressus Arizonica
6. Pinus nigra

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی درختان (Osan et al., 2023)

| درختان | ارتفاع درخت (متر) | فرم تاج | قطر تاج (متر) |
|---|---|---|---|
| چنار | ۱۰ | گسترده | ۸ |
| تبریزی | ۱۲ |  ستونی | ۴ |
| زبان‌گنجشک | ۱۰ | بیضوی | ۸ |
| نارون | ۷ | گرد | ۶ |
| سرو نقره‌ای | ۸ | مخروطی | ۶ |
| کاج سیاه | ۷ | مخروطی | ۵ |

**- طراحی الگوهای کاشت و اندازه‌گیری‌های لازم**

در این مطالعه، هشت نقطه گیرنده (شکل ۳) بر اساس فاصله از ردیف درختان و ساختمان ها تعیین شد. برای تحلیل پارامترها در سناریوهای مختلف، R05 و R06 کمترین فاصله را از ساختمان داشتند، R07، R08 و R02 در ردیف درختان قرار داشتند که R08 در ردیف اول، R07 در ردیف آخر و R02 در ردیف درختان قرار داشتند. مرکز ردیف ها همچنین R03 در ۳ متری آخرین ردیف درختان کاشت، R04 در ۱۲ متر و R01 در ۱۸ متری آخرین ردیف درختان قرار داشت (شکل ۳). تهیه این سناریوها توسط مدل SPACE در ENVI-met انجام شد. ارزیابی اثر سرمایش هر سناریو با مقایسه شاخص‌های خرد هواشناسی در سناریوهای مختلف با یک سناریوی پایه که شامل هیچ درختی نبود، انجام شد. این الگوها و ترکیبات کاشت از الگوهای موجود در فضای سبز شهری انتخاب شدند. اثرات متفاوت هر یک از این الگوها در مطالعات قبلی بررسی نشده است.




**شکل ۳. نقشه اولیه سایت بدون کاشت و موقعیت گیرنده‌ها**

**- اعتبارسنجی داده‌ها**

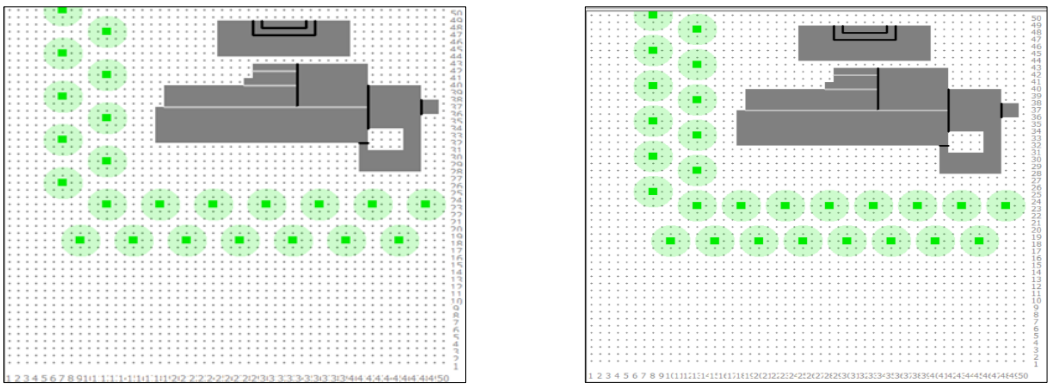
در مطالعات پیشین، اندازه‌گیری‌های میدانی برای اعتبارسنجی مدل ENVI-met انجام شده و صحت این مدل با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با داده‌های میدانی مشخص شده است (Forouzandeh, 2018; López-Cabeza et al., 2018; Salata et al., 2016). در این پژوهش، مشابه مطالعات قبلی (Zhang et al., 2018; Zhao & Fong, 2017)، تنها رطوبت نسبی اندازه‌گیری و برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی شد. به دلیل اهمیت پردیس دانشگاه و مدت‌زمان حضور دانشجویان دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، این مکان برای شبیه‌سازی انتخاب شد. اندازه‌گیری‌های میدانی دما و رطوبت نسبی در تاریخ ۱۰ اکتبر ۲۰۲۰، از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۴:۰۰، در نقطه پذیرنده R01 انجام شد و برای این منظور از دستگاه SMART SENSOR Humidity Temperature Meter مدل AR847 استفاده گردید که دقت ۱/۵± درجه سانتی‌گراد برای دما و ۳± درصد (۸۰~۴۱ ٪) ۵ ± درصد (۱۰~۴۰ ٪) برای رطوبت را دارا است (شکل ۲). داده‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، جهت باد و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از ایستگاه هواشناسی شرق تبریز جمع‌آوری و برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار ENVI-met استفاده شد.

برای ارزیابی دقت مدل ENVI-met، در مطالعات قبلی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از ضریب تعیین ($R^2$) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مقایسه شدند؛ برای اعتبار مدل، مقدار $R^2$ باید به ۱ نزدیک و مقدار RMSEبه ۰ نزدیک باشد (Salata et al., 2016). در این مطالعه، مقدار $R^2$ برای دما ۰/۹۶ و مقدار RMSE برابر ۰/۶ بود؛ برای رطوبت نسبی، مقدار $R^2$ برابر ۰/۸۹ و مقدار RMSE برابر ۳/۸۳ بود. در مطالعات پیشین، مقدار $R^2$ بین ۰/۵۲ و ۰/۹۶ و مقدار RMSE بین ۰/۲۶ و ۴/۸۳ قرار داشت (López-Cabeza et al., 2018)، بنابراین مدلENVI-met در این مطالعه معتبر ارزیابی شد.

در این پژوهش از اندازه‌گیری تجربی برای اعتبارسنجی نرم‌افزار استفاده شد، اما برای ارزیابی پتانسیل خنک‌کنندگی هر یک از الگوهای کاشت که در محیط واقعی وجود نداشتند و به‌صورت سناریو طراحی شده بودند، از روش شبیه‌سازی مشابه مطالعات قبلی (El-Bardisy et al., 2016; Sodoudi et al., 2018) استفاده شد که به بررسی تأثیرات چیدمان و آرایش‌های مختلف درختان بر راحتی حرارتی پرداختند. همچنین سایر مطالعات (Unal et al., 2018; Wang & Akbari, 2016) اثرات خردااقلیمی پوشش گیاهی را با شبیه‌سازی سناریوهایی با پیکربندی‌های مختلف که از محیط اعتبارسنجی‌شده متفاوت بودند، ارزیابی کردند. عواملی از قبیل جریان باد می تواند بر مدل ها تأثیر داشته باشد که در این مطالعه تأثیر این عوامل در همه مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

## نتایج

نتایج نشان می‌دهد که در شرایط دمای پایین، همه مدل‌های کاشت باعث کاهش دمای تابشی و سطح دی‌اکسیدکربن و افزایش رطوبت نسبی محیط می‌شوند. الگوی شماره ۲ (دو ردیف درخت با همپوشانی تاج‌ها) عملکرد بهتری نسبت به الگوی شماره ۱ (دو ردیف درخت با فاصله ۱ متر بین تاج‌ها) دارد. این برتری به دلیل افزایش سطح برگ و کاهش بیشتر دی‌اکسیدکربن و همچنین افزایش رطوبت نسبی در الگوی شماره ۲ است. فاصله بین تاج‌ها در الگوی شماره ۱ باعث افزایش دمای محیط در روزهای سرد می‌شود. با توجه به برتری شاخص‌های محیطی در الگوی شماره ۲، تحلیل‌های تکمیلی روی این الگو انجام شده است (شکل ۴).

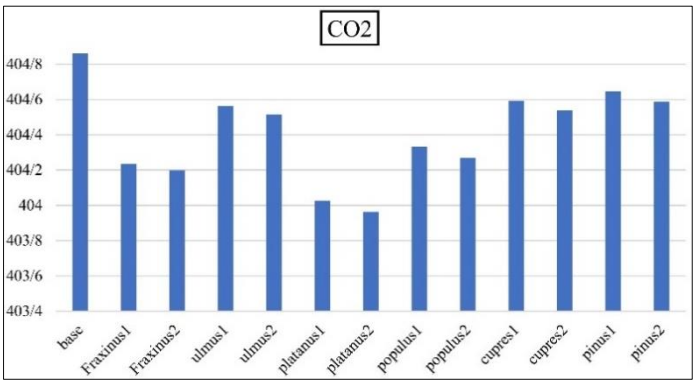


الگوی شماره ۲[1] الگوی شماره ۱[2]

**شکل ۴. الگوی ۱ کاشت درختان با فاصله تاج پوشش یک متر در دو ردیف به صورت نامنظم و الگوی ۲ کاشت درختان بدون فاصله تاج در دو ردیف به صورت نامنظم.**

### - اثر بر دی‌اکسیدکربن

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد (شکل ۵) که درختان در کاهش سطح دی‌اکسیدکربن محیط مؤثر هستند و این اثر در الگوی کاشت ۲ (بدون فاصله بین تاج‌پوش‌ها) بیشتر از الگوی ۱ است. درختان خزاندار (چنار، تبریزی، زبان گنجشک، نارون) نسبت به درختان همیشه سبز مخروطی (سرو نقره‌ای، کاج سیاه) تأثیر بیشتری در کاهش دی‌اکسیدکربن دارند. این اثر در روزهای خنک با دمای پایین و در محیط‌های شهری و مسکونی بیشتر مشاهده می‌شود. همچنین، هرچه سطح برگ و ارتفاع درختان بیشتر باشد، کاهش دی‌اکسیدکربن قابل‌توجه‌تر است. به‌طور کلی، الگوی کاشت ۲ و استفاده از درختان خزان‌دار مؤثرترین راه‌حل برای کاهش دی‌اکسیدکربن در روزهای سرد است.




**شکل ۵. میانگین $CO_2$ (ppm) در هر یک از الگوهای کاشت درخت در محیط نسبت به محیط بدون درخت (پایه). (میانگین بیش از LST ۱۰:۰۰–۱۸:۰۰).**

1. Pattern 2 (P2)
2. Pattern 1 (P1)

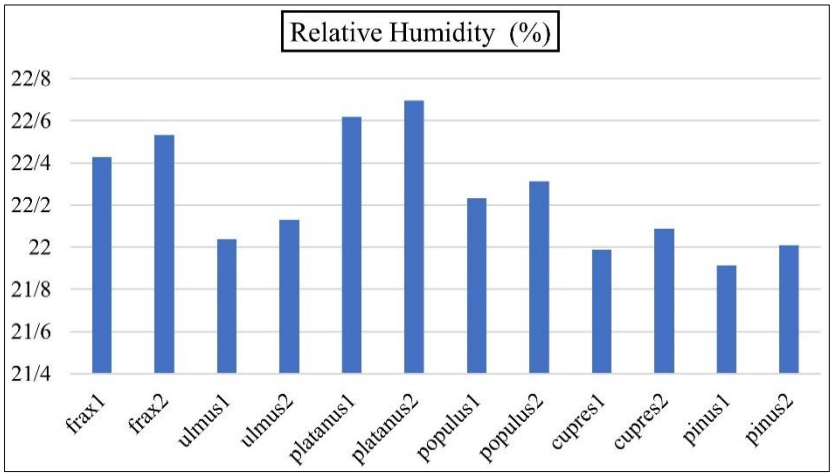
### رطوبت نسبی (٪)

نتایج نشان داد که رطوبت نسبی محیط بین مدل‌های با درخت و بدون درخت متفاوت است. علاوه بر این، یافته‌ها نشان داد که کاشت درختان در الگوی ۲ بدون فاصله بین تاج پوشش، رطوبت نسبی محیط را بیشتر از کاشت درختان مشابه در الگوی ۱ با فاصله یک متری بین تاج پوشش، بهبود می‌بخشد. در مقایسه با درختان همیشه‌سبز، درختان خزان‌دار (۵۹/۴۸۵ درصد) تأثیر قوی‌تری بر افزایش رطوبت نسبی در بافت‌های شهری و فضاهای باز دارند (۵۹/۱۲۳ درصد) (جدول ۳).

**جدول ۳. نتایج رطوبت نسبی (٪) الگوی درختان کاشته شده برای الگوهای شبیه‌سازی شده شماره ۱و ۲**

| الگو | پایه | زبان‌گنجشک | نارون | چنار | تبریزی | سرو نقره‌ای | کاج سیاه | میانگین رطوبت نسبی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳۹/۰۳۳ | ۵۹/۵۴۱ | ۵۹/۱۶۴ | ۵۹/۷۲۶ | ۵۹/۳۲۲ | ۵۹/۱۱۴ | ۵۹/۰۳۰ | خزان‌دار | همیشه‌سبز |
| ۲ | | ۵۹/۶۵۰ | ۵۹/۲۵۷ | ۵۹/۸۱۳ | ۵۹/۴۰۴ | ۵۹/۲۱۶ | ۵۹/۱۳۱ | ۵۹/۴۸۵ | ۵۹/۱۲۳ |

در تمام ترکیبات کاشت درخت، بهترین عملکرد در حدود ساعت ۱۲:۰۰ بعد از ظهر و پس از آن در ساعت ۱۸:۰۰ و ۱۶:۰۰ رخ می دهد؛ هر چه عملکرد بیشتر باشد، رطوبت نسبی محیط با کاشت درخت بیشتر از رطوبت نسبی بدون درخت (پایه) است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که کاشت درختان در مدل ۲ تأثیر قوی‌تری بر بهبود رطوبت نسبی فضاهای باز در روزهای سرد نسبت به کاشت درختان معادل در مدل ۱ دارد. درختان خزان‌دار در روزهای سرد و کم دما (زبان گنجشک، نارون، چنار، تبریزی) رطوبت نسبی را بیشتر از درختان همیشه سبز و سوزنی برگ (کاج سیاه، سرو نقره‌ای) افزایش می‌دهند (شکل ۶).




**شکل ۶. درصد افزایش رطوبت نسبی (٪) محیط با کاشت درخت نسبت به محیط بدون کاشت در سه ساعت با ایجاد و افزایش رطوبت نسبی (ساعت ۱۲، ۱۶ و ۱۸).**

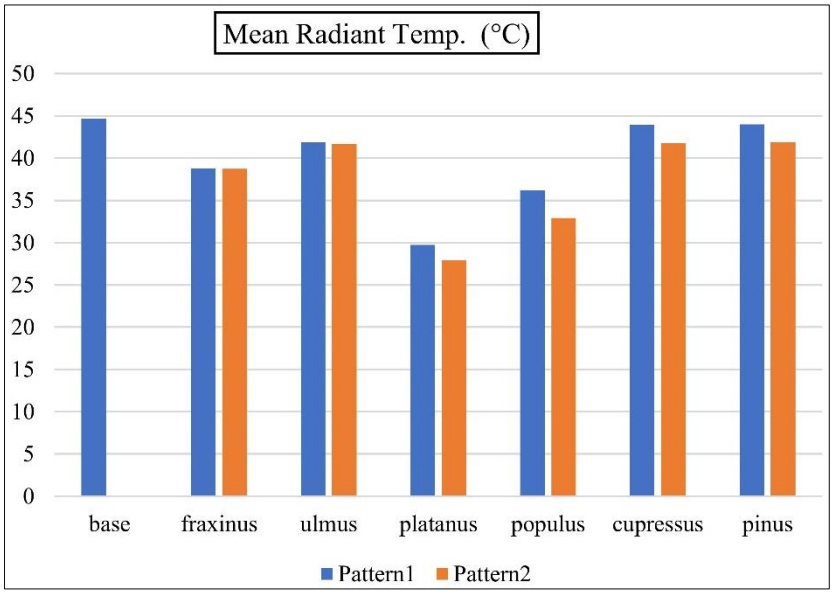
### متوسط دمای تابشی (درجه سلسیوس)

نتایج نشان داد که میانگین دمای تابشی (درجه سلسیوس) بین مدل‌های با درخت و بدون درخت تفاوت معنی‌داری دارد. براین‌اساس، کاشت درختانی بدون فاصله بین تاج‌پوش‌ها (فاصله بین تاج‌پوش‌ها= ۰ متر) تأثیر قوی‌تری در کاهش متوسط دمای تابشی نسبت به کاشت درختان با یافته‌های فاصله بیشتر (فاصله بین تاج‌پوش‌ها= ۱ متر) تفاوت دارد. همچنین درختان خزاندار (۸/۶۸۷) تأثیر بیشتری در کاهش متوسط دمای تابشی (درجه سلسیوس) نسبت به درختان همیشه سبز (۱/۷۷۰) و به طور متوسط عملکرد بهتری داشتند (جدول ۴).

**جدول ۴. متوسط دمای تابشی (درجه سلسیوس) الگوی درختان کاشته شده برای الگوهای شبیه‌سازی شده شماره ۱ و ۲**

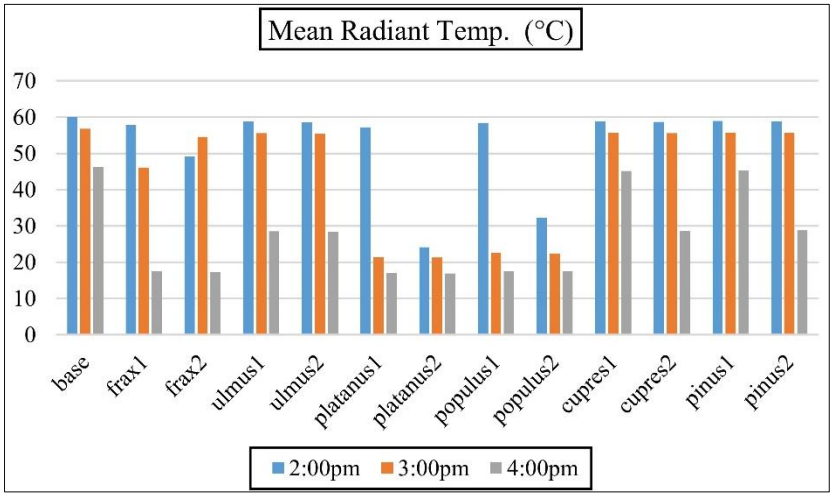
| الگو | پایه | زبان‌گنجشک | نارون | چنار | تبریزی | سرو نقره‌ای | کاج سیاه | میانگین رطوبت نسبی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۴۴/۶۵۷ | ۳۸/۸۱۱ | ۴۱/۸۳۴ | ۲۹/۷۳۹ | ۳۶/۱۹۸ | ۴۳/۹۰۶ | ۴۴/۰۰۶ | خزان‌دار | همیشه‌سبز |
| ۲ | | ۳۸/۷۳۱ | ۴۱/۶۹۱ | ۲۷/۹۰۸ | ۳۲/۹۱۶ | ۴۱/۷۶۴ | ۴۱/۸۷۱ | ۳۵/۹۷۹ | ۴۲/۸۸۷ |

نتایج شبیه‌سازی‌شده همچنین نشان می‌دهد که درختان بیشترین تأثیر را بر کاهش و تفاوت متوسط دمای تابشی (درجه سلسیوس) در ساعت‌های ۱۴:۰۰، ۱۵:۰۰ و ۱۶:۰۰ داشتند. به عبارت دیگر درختان در این ساعات بیشترین نور خورشید را جذب می‌کنند و متوسط دمای تابشی محیط را نسبت به حالت پایه و محیط بدون درخت پایین می‌آورند (شکل ۷).




**شکل ۷. میانگین دمای تابشی (درجه سلسیوس) در هشت ساعت مورد نظر (۱۰ صبح تا ۶ بعد از ظهر) درختانی که در هر دو الگوی کاشت در ارتفاع ۱/۸متر شبیه‌سازی شده اند، نشان می‌دهند که درختان خزان‌دار همیشه کمتر از میانگین دمای تابشی در مقایسه با درختان هستند.**

باتوجه‌به جدول و یافته‌ها، عملکرد کلیه درختان در الگوی ۲ بهتر است. با توجه به این تفاسیر، کاشت درخت در مدل ۲ نسبت به کاشت درختان معادل در مدل ۱ تأثیر بزرگتر و بیشتری در کاهش میانگین دمای محیط در روزهای سرد دارد. در نتیجه در مدل ۲ کاشت درخت تأثیر بیشتری در کاهش میانگین دمای تابشی در مناطق باز شهری دارد (شکل ۸).



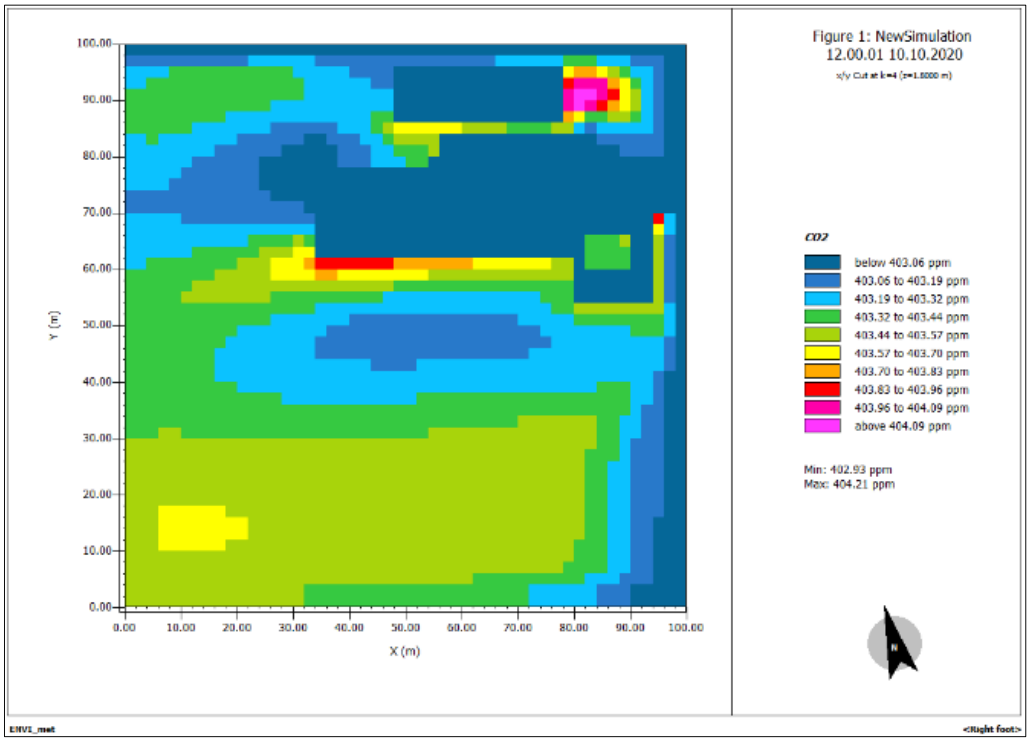

**شکل ۸. میانگین دمای تابشی (C°) محیط با کاشت درخت در مقایسه با محیط بدون کاشت در سه ساعت با بیشترین اختلاف (کاهش) میانگین دمای تابشی (۲:۰۰ بعد از ظهر، ۱۵:۰۰ و ۴:۰۰).**

الگوی کاشت درختان در یک‌متری تاج درختان (الگوی ۱) با کاشت درختان همیشه سبز و سوزنی برگ (Pinus nigra و Cupressus Arizonica) کمترین عملکرد را در بهبود خرداقلیم و کاهش آلودگی هوا دارد. همچنین درختان برگ ریز و برگ

ریز نسبت به درختان همیشه سبز و سوزنی برگ در کاهش غلظت دی اکسید کربن، کاهش میانگین دمای محیط و افزایش و افزایش رطوبت نسبی در کل محیط به دلیل سطح برگ و قطر تاج پوشش تأثیر بیشتری دارند. همچنین در مناطق مسکونی و شهری کاشت درختان پهن برگ و خزان‌دار با ارتفاع و قطر تاج بیشتر و سطح برگ بیشتر (Platanus) در افزایش کیفیت محیطی نسبت به سایر درختان (Fraxinus excelsior و... و Ulmus minor) اهمیت بیشتری دارد. درنتیجه درختان خزان‌دار در کاهش غلظت دی اکسید کربن، کاهش میانگین دمای محیط، افزایش رطوبت نسبی و ماندگاری سال‌ها در محیط عملکرد بهتری دارند و کیفیت محیط را افزایش می‌دهند.

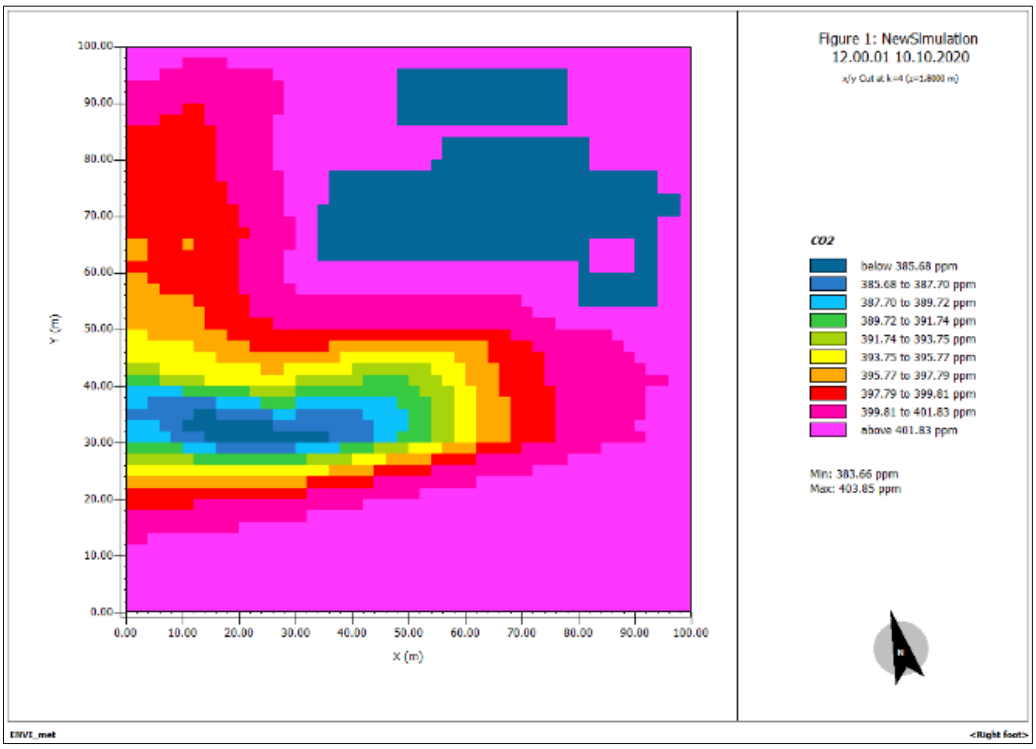
## بحث

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد (شکل ۹) که کاشت درختان تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود شرایط خرداقلیمی در محیط‌های شهری دارد. افزایش رطوبت نسبی، کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن، و کاهش میانگین دمای تابشی (درجه سلسیوس) از اثرات مثبت کاشت درختان است که شرایط محیطی را در روزهای خنک با دمای پایین برای ساکنان و کارگران بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین (Giridharan et al. 2008; Wibig et al., 2009) مشابه است که نشان می‌دهند فضای سبز شهری و درختان نقش مهمی در افزایش رطوبت نسبی و جذب دی‌اکسیدکربن دارند و همچنین باعث کاهش میانگین دمای تابشی در محیط می‌شوند. علاوه بر این، تحقیق ونگ و همکاران[1] (۲۰۱۷) درباره شاخص سطح برگ[2] به اهمیت این ویژگی ساختاری پوشش‌گیاهی در کنترل فرایندهای بیوفیزیکی مانند جذب تابش، فتوسنتز، رهگیری باران، و تبخیر و تعرق اشاره می‌کند (Wang et al., 2017). یافته‌های این مطالعه تأیید می‌کند که الگوهای کاشت درخت، نوع برگ، و ارتفاع درخت به طور مستقیم بر شاخص دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی، و میانگین دمای تابشی تأثیرگذار هستند. به طور کلی، این نتایج بر اهمیت استفاده از الگوهای مناسب کاشت و انتخاب نوع برگ (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ) و ارتفاع مناسب درختان در طراحی فضای سبز شهری تأکید دارد. بهبود خرداقلیم شهری نه‌تنها به کاهش آلودگی و ارتقای کیفیت محیط کمک می‌کند، بلکه تأثیرات مثبتی بر سلامت و رفاه عمومی ساکنان دارد.




محدوده بدون کاشت درخت

1. Wang et al., 2017
2. Leaf Area Index (LAI)




درخت چنار (الگوی شماره ۲)

**شکل ۹. تفاوت دی‌اکسیدکربن محیط شبیه‌سازی شده بین محدوده بدون کاشت و وجود درختان کاج کاج را در الگوی ۲ در ۱/۸ متر در ساعت ۱۲:۰۰ دمای سطح زمین نشان می‌دهد (میانگین بیش از ۱ ساعت).**

هنگام مقایسه الگوهای کاشت بافاصله یک‌متری بین سایبان‌ها با الگوهای کاشت بافاصله یک‌متری بین سایبان‌ها، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوی کاشت بدون فاصله بین سایبان‌ها تأثیر بیشتری بر بهبود عوامل اقلیمی دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی (٪) و متوسط دمای تابشی (درجه سانتیگراد) دارد. فرم و ابعاد برگ‌های گیاه (همیشه‌سبز یا پهن‌برگ) درجه سایه را تنظیم می‌کند که باتوجه‌به مختصات جغرافیایی محل، میانگین دمای تابشی را کاهش می‌دهد که این نتایج با مطالعات قبلی (Perini et al., 2018; Osan et al., 2023) مشابه می‌باشد. وجود درختان علی‌الخصوص درختان خزان‌دار آسایش محیطی بیشتر را به دنبال دارد. علاوه بر این، با تغییر میزان تبخیروتعرق، این ویژگی‌ها بر رطوبت نسبی محیط تأثیر می‌گذارند. دمای هوا و متوسط دمای تابشی نزدیک زمین توسط تاج درختانی که سطح را محافظت می‌کنند و تابش موج‌کوتاه را با انعکاس و پراکندگی آن کاهش می‌دهد کاهش می‌یابد (Morakinyo et al., 2018; Abdi et al., 2020).

مشابه یافته‌های قبلی (Zhang et al., 2018; Hami et al., 2019)، یافته‌های این مطالعه ارتباط الگوهای کاشت درخت را در به حداکثر رساندن رطوبت نسبی و کاهش سطح آلودگی برجسته می‌کند. جهت باد، سطح برگ درخت در الگوهای کاشت متنوع و مقدار نور عبوری از درختان و سایبان‌های آنها می‌تواند در نوسانات دی‌اکسیدکربن نقش داشته باشد. رطوبت نسبی (درصد) و میانگین دمای تابشی (درجه سانتیگراد) نیز عواملی هستند. با وجود اینکه متغیرهای اقلیمی با نرخ‌های متفاوتی در دو الگو در نوسان هستند، درختان خزان‌دار دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی (درجه سلسیوس) کمتر از درختان همیشه‌سبز هستند. درختان خزان‌دار نیز بیشتر از درختان همیشه‌سبز به رطوبت نسبی (درصد) محیط کمک می‌کنند. علاوه بر این، درختان کاشته شده در الگوی شماره ۲ تأثیر قوی‌تری بر کیفیت محیطی و کاهش آلودگی نسبت به درختان کاشته شده در الگوی شماره ۱ دارند. درختان خزان‌دار کاشته شده با الگوی کاشت شماره ۲ نسبت به درختان همیشه‌سبز کاشته شده با الگوی کاشت شماره ۲ (درجه سلسیوس) تأثیر بیشتری بر بهبود کیفیت و شرایط محیطی و همچنین کاهش دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی دارند.

همچنین افزایش رطوبت نسبی (٪) و بهبود آن در محیط‌های شهری. تبخیر و تعرق گیاهان که باعث افزایش رطوبت

نسبی و ایجاد توده‌های هوای سرد می‌شود، به تعدیل خرداقلیم کمک می‌کند (Perini et al., 2018). درختان خزان‌دار با سطح برگ بیشتر و قطر تاج بزرگ‌تر رطوبت نسبی محیط (٪) را بهبود می‌بخشند، دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهند و متوسط دمای تابش (درجه سلسیوس) را کاهش می‌دهند. برگ‌های خزان‌دار بیشتر در طول روز تشعشع و تابش خورشید و آلودگی و دی‌اکسیدکربن بیشتری می‌گیرند و اقلیم را بهبود می‌بخشند، درحالی‌که درختان همیشه‌سبز با سطح برگ کوچک‌تر محصول می‌دهند. در دماهای پایین‌تر، آنها حتی از درختان خزان‌دار آسیب‌پذیرتر هستند. در نتیجه، بهترین الگوی کاشت و نوع درختان کاشته شده در فضاهای شهری برای افزایش رطوبت نسبی (٪)، بهبود و کاهش دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی (درجه سلسیوس) در دماهای پایین، درختان طرح‌دار با سطح برگ وسیع‌تر و بزرگ‌تر هستند. قطر و ارتفاع طوقه، در نتیجه رطوبت نسبی (درصد) محیط را افزایش داده و کیفیت محیط را به دلیل افزایش سطح برگ و دی‌اکسیدکربن بیشتر و میانگین دمای تابشی افزایش می‌دهد.

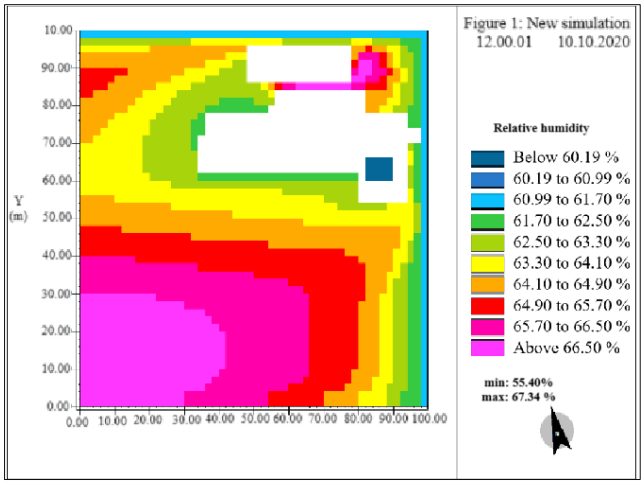
**جدول ۵. میانگین $CO_2$، رطوبت (٪)، و میانگین دمای تابشی (درجه سانتیگراد) درختان در الگوهای کاشت**

| اسم درخت | الگوی کاشت | $Co_2$ (ppm) | رطوبت نسبی (٪) | M.R.T (° C) |
|---|---|---|---|---|
| نارون | ۱ | ۴۰۴/۵۶۵ | ۵۹/۱۶۴ | ۴۱/۸۳۴ |
| | ۲ | ۴۰۴/۵۱۵ | ۵۹/۲۵۷ | ۴۱/۶۹۱ |
| زبان‌گنجشک | ۱ | ۴۰۴/۲۳۶ | ۵۹/۵۴۱ | ۳۸/۸۱۱ |
| | ۲ | ۴۰۴/۱۹۷ | ۵۹/۶۵۰ | ۳۸/۷۳۱ |
| تبریزی | ۱ | ۴۰۴/۳۳۲ | ۵۹/۳۲۲ | ۳۶/۱۹۸ |
| | ۲ | ۴۰۴/۲۷ | ۵۹/۴۰۴ | ۳۲/۹۱۶ |
| چنار | ۱ | ۴۰۴/۰۲۶ | ۵۹/۷۲۶ | ۲۹/۷۳۹ |
| | ۲ | ۴۰۳/۹۶۲ | ۵۹/۸۱۳ | ۲۷/۹۰۸ |
| کاج سیاه | ۱ | ۴۰۴/۶۴۵ | ۵۹/۰۳۰ | ۴۴/۰۰۶ |
| | ۲ | ۴۰۴/۵۸۸ | ۵۹/۱۳۱ | ۴۱/۸۷۱ |
| سرو نقره‌ای | ۱ | ۴۰۴/۵۹۲ | ۵۹/۱۱۴ | ۴۳/۹۰۶ |
| | ۲ | ۴۰۴/۵۳۸ | ۵۹/۲۱۶ | ۴۱/۷۶۵ |

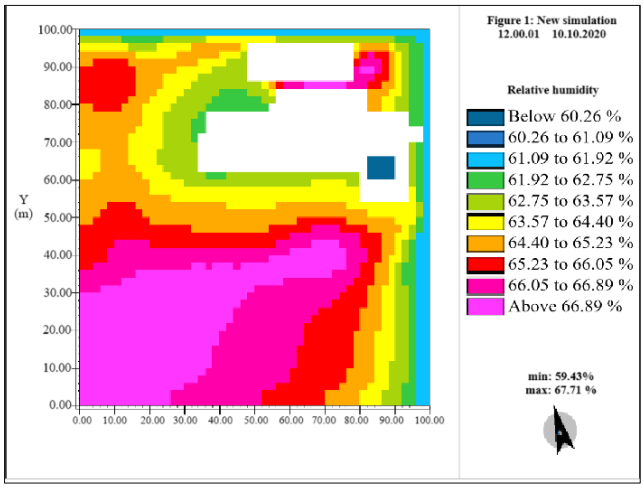
درختان خزان‌دار (زبان‌گنجشک و چنار) با سطح برگ و قطر بیشتر تأثیر قوی‌تری بر کاهش دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی، رطوبت نسبی بالاتر (٪) و آب‌وهوای (درجه سلسیوس) بهتر نسبت به درختان همیشه‌سبز با سطح برگ و قطر کمتر (سرو نقره‌ای و کاج سیاه) دارند. همچنین بر اساس مقایسه پارامترهای خروجی، به نظر می‌رسد که درختان خزان‌دار با قطر تاج بیشتر و سطح برگ بلندتر مانند چنار و زبان‌گنجشک بهتر از درختان خزان‌دار با قطر تاج کمتر و سطح برگ کمتر مانند نارون و تبریزی در بهبود کیفیت محیطی و کاهش دی‌اکسیدکربن نقش دارند. درختان خزان‌دار نسبت به درختان همیشه‌سبز تأثیر بیشتری بر بهبود کیفیت محیطی و کاهش دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی (درجه سانتیگراد) دارند. الگوی کاشت شماره ۲ (درختان خزان‌دار) تأثیر بزرگ‌تر و بیشتری بر کاهش دی‌اکسیدکربن و متوسط دمای تابشی محیط (درجه سانتیگراد) و همچنین رطوبت نسبی (٪) در محیط‌های شهری دارد. افزایش سطح برگ درختان که آلودگی و تشعشعات بیشتری را به دام می‌اندازد، مسئول بهبود محیط شهری می‌باشد.

درختان همیشه‌سبز به دلیل ماندگاری برگ‌های آنها در زمستان و فصولی که درختان خزان‌دار بی‌برگ است تأثیر آن بیشتر است. کاشت درختان در محیط باعث کاهش دمای هوا، دمای متوسط تابش، افزایش رطوبت نسبی و بهبود شرایط آسایش دما، بر اساس نتایج شبیه‌سازی خرداقلیم می‌شود. مطالعات قبلی (El-Bardisy et al., 2016; Lee & Mayer, 2018; Morakinyo et al., 2018; Sun et al., 2017; Zhang et al., 2018) یافته‌های این مطالعه را تأیید می‌کنند، و همچنین در این مطالعه مشخص شد که درختان و فضای سبز باعث بهبود خرداقلیم و راحتی دمایی شهرها هستند و افزایش رطوبت نسبی در مناظر شهری با درختان خزان‌دار با افزایش رطوبت نسبی در محیط با درختان همیشه‌سبز متفاوت است. تاج درختان با سایه انداختن سطح و کاهش تشعشعات موج‌کوتاه با انعکاس و پراکندگی آن، دمای هوا و میانگین دمای تابشی

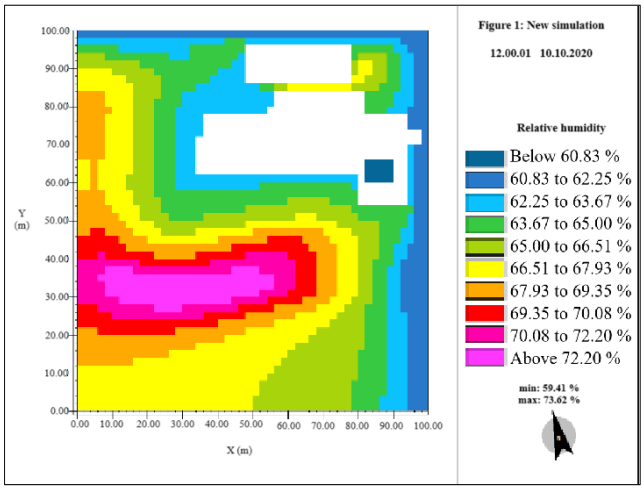
نزدیک زمین را کاهش می‌دهد (Morakinyo et al., 2018).




**بدون کاشت**




**الگوی شماره ۱ (درخت کاج)**




**الگوی شماره ۲ (درخت چنار)**

**شکل ۱۰. مقادیر شبیه‌سازی‌شده، شاخص رطوبت نسبی محیط‌های بدون درخت و درختان همیشه سبز (S1) و درختان خزان‌دار (S2) را در ارتفاع ۱/۸ متر در ساعت ۱۲:۰۰ دمای سطح زمین (میانگین بیش از ۱ ساعت) مقایسه می‌کنند.**

در فصول گرم، ارتفاع تنه درختان بر میزان سایه تأثیر دارد و میانگین دمای تابشی را در فصول سرد کاهش می‌دهد، ارتفاع تنه درختان بر میزان سایه تأثیر می‌گذارد و بادهای سرد را کنترل می‌کند (Perini et al., 2018; Fabbri et al., 2017). وجود درختان در محیط و نوع درختان موجود در آن بر میانگین دمای تابشی در بخش‌های مختلف محیط تأثیر دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد (شکل ۱۰) که کاشت درختان، به‌ویژه درختان پهن‌برگ و خزان‌دار، تأثیر قابل‌توجهی در بهبود شرایط خرداقلیمی و کاهش آلودگی هوا دارد. الگوی کاشت بدون فاصله تاج‌ها (الگوی شماره ۲) در مقایسه با الگوی کاشت بافاصله (الگوی شماره ۱) عملکرد بهتری در کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش رطوبت نسبی و کاهش دمای تابشی محیط داشته است. این یافته‌ها بر اهمیت استفاده از الگوهای مناسب کاشت در طراحی فضاهای سبز شهری تأکید می‌کند و با مطالعات قبلی همچون تحقیقات (Zhang et al., 2018; Morakinyo et al., 2018) که بر نقش مؤثر درختان خزان‌دار در تنظیم شرایط اقلیمی تأکید داشتند، مطابقت دارد.

**جدول ۶. تفاوت میانگین $CO_2$، رطوبت (٪)، و متوسط دمای تابشی. (درجه سلسیوس)**

| اسم درخت | الگوی کاشت | $Co_2$ (ppm) | رطوبت نسبی (٪) | M.R.T (° C) |
|---|---|---|---|---|
| نارون | ۱ | ۰/۲۹۵ | ۲۰/۱۳۰ | ۲/۸۲۲ |
| | ۲ | ۰/۳۴۵ | ۲۰/۲۲۳ | ۲/۹۶۶ |
| زبان‌گنجشک | ۱ | ۰/۶۲۳ | ۲۰/۵۰۷ | ۵/۸۴۵ |
| | ۲ | ۰/۶۶۲ | ۲۰/۶۱۷ | ۵/۹۲۵ |
| تبریزی | ۱ | ۰/۵۲۷ | ۲۰/۲۸۸ | ۸/۴۵۹ |
| | ۲ | ۰/۵۹۰ | ۲۰/۳۷۰ | ۱۱/۷۴۰ |
| چنار | ۱ | ۰/۸۳۳ | ۲۰/۶۹۳ | ۱۴/۹۱۸ |
| | ۲ | ۰/۸۹۷ | ۲۰/۷۷۹ | ۱۶/۷۴۸ |
| کاج سیاه | ۱ | ۰/۲۱۵ | ۱۹/۹۹۷ | ۰/۶۵۰ |
| | ۲ | ۰/۲۷۱ | ۲۰/۰۹۷ | ۲/۷۸۶ |
| سرو نقره‌ای | ۱ | ۰/۲۶۷ | ۲۰/۰۸۱ | ۰/۷۵۰ |
| | ۲ | ۰/۳۲۱ | ۲۰/۱۸۲ | ۲/۸۹۲ |

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش تأثیر مثبت الگوی کاشت بدون فاصله تاج‌ها بر افزایش رطوبت نسبی است. این الگو با افزایش تراکم شاخ‌وبرگ درختان، فرایند تبخیروتعرق را بهبود بخشیده و منجر به ایجاد توده‌های هوای خنک‌تر و مرطوب‌تر شده است. علاوه بر این، درختان پهن‌برگ مانند چنار و تبریزی با قطر تاج بزرگ‌تر و ارتفاع بیشتر، به دلیل جذب تشعشعات کوتاه موج و کاهش انعکاس نور خورشید، در کاهش دی‌اکسیدکربن و میانگین دمای تابشی محیط عملکرد بهتری دارند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه (Perini et al., 2018) به نقش ارتفاع و گستردگی تاج درختان در بهبود شرایط حرارتی و کیفیت محیط تأکید داشتند، همخوانی دارد. این نشان داد که افزایش پوشش درختی در محیط‌های شهری به کاهش اثر جزایر حرارتی کمک کرده و کیفیت زندگی ساکنان را بهبود می‌بخشد.

در این پژوهش نیز تأکید شده است که درختان خزان‌دار با سطح برگ بیشتر و فرایند تبخیروتعرق قوی‌تر، تأثیر بیشتری در کاهش گرما و آلودگی دارند. یافته‌های این پژوهش بر لزوم توجه به الگوهای کاشت درختان و انتخاب گونه‌های مناسب تأکید دارد. استفاده از گونه‌های بومی و متناسب با شرایط اقلیمی، مانند چنار و زبان‌گنجشک در اقلیم تبریز، می‌تواند به کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت محیط‌زیست و افزایش آسایش حرارتی کمک کند. این نکته به‌ویژه در مناطقی که با چالش‌های آلودگی هوا و افزایش دما مواجه هستند، اهمیت دوچندان دارد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که الگوهای کاشت درختان و نوع گونه‌های مورداستفاده تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود شرایط خرداقلیمی شهری دارند. استفاده از درختان خزان‌دار با تاج‌های پهن و سطح برگ بزرگ، مانند چنار و زبان‌گنجشک، در

الگوی کاشت همپوشان (الگوی شماره ۲)، منجر به کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش رطوبت نسبی، و کاهش دمای تابشی محیط شد. درختان خزان‌دار با ویژگی‌های ساختاری خاص، به دلیل قابلیت جذب بیشتر نور خورشید و افزایش فرآیند تبخیروتعرق، عملکرد بهتری در بهبود شرایط خرداقلیمی نسبت به درختان همیشه‌سبز داشتند. همچنین، این تحقیق تأکید می‌کند که انتخاب گونه‌های بومی و مناسب برای اقلیم منطقه، در کنار استفاده از الگوهای کاشت مؤثر، می‌تواند به کاهش اثرات منفی آلودگی هوا و جزایرحرارتی شهری کمک کند. این یافته‌ها می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای برنامه‌ریزان شهری، معماران منظر و سیاست‌گذاران در طراحی و مدیریت فضاهای سبز شهری باشد. بهبود کیفیت زیست‌محیطی شهری نه تنها به کاهش آلودگی هوا و افزایش آسایش حرارتی کمک می‌کند، بلکه بر سلامت و رفاه عمومی شهروندان نیز تأثیر مثبت دارد.

برای طراحی فضاهای سبز شهری، توجه به ویژگی‌های اقلیمی منطقه، جهت بادهای غالب و تابش خورشید از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از گونه‌های بومی و تطبیق‌یافته می‌تواند به ایجاد فضاهایی سازگار با شرایط اقلیمی و پایدارتر کمک کند. همچنین، به دلیل تأثیر قابل‌توجه درختان خزان‌دار در کاهش دی‌اکسیدکربن و افزایش رطوبت نسبی، این گونه‌ها می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای درختان همیشه‌سبز در مناطق پرتراکم شهری مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از الگوهای کاشت با تاج‌های همپوشان (الگوی شماره ۲) به منظور افزایش سایه، کاهش دمای تابشی و بهبود شرایط زیست‌محیطی نیز توصیه می‌شود. در این راستا، بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی نظیر ENVI-met می‌تواند به شناسایی ترکیبات بهینه کاشت درختان و پیش‌بینی تأثیرات آن‌ها بر شرایط محیطی کمک شایانی کند.

با توجه به بحران کم‌آبی و کاهش بارش‌ها، برنامه‌ریزی برای آبیاری بهینه و انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی نیز ضروری است. در کنار این اقدامات، ارتقای آگاهی عمومی درباره اهمیت فضای سبز و نقش آن در بهبود محیط زیست شهری، می‌تواند مشارکت مردمی در نگهداری و گسترش این فضاها را افزایش دهد و به بهبود کیفیت زندگی شهروندان کمک کند. عواملی از قبیل جریان باد می‌تواند بر مدل ها تأثیر داشته باشد که در این مطالعه تأثیر این عوامل در همه مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. دقت این مدل در پیکسل های ۲*۲ متر می‌باشد که در نسخه رایگان دانشجویی امکان قدرت تفکیک مکانی دقیق‌تر وجود ندارد و نسخه اصلی نرم افزار هم بسیار گران و هزینه بر می‌باشد. عدم ترسیم مدل با قدرت تفکیک مکانی بسیار دقیق‌تر ازجمله پیکسل‌های چند سانتیمتری فقط در نسخه اصلی وجود داشت که خرید آن خارج از توان محققان است.

## منابع


حامی، احمد؛ تراشکار، مهسا؛ امامی، فرزین؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۳ الف). ساماندهی و برنامه ریزی فضاهای سبز دانشگاهی با رویکرد جذابیت مکان (مطالعه موردی: دانشگاه تبریز). *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۵ (۳)، ۶۳-۷۸. https://www.srds.ir/article_211708.html?lang=en

حامی، احمد؛ فرجی، سعدی؛ امامی، فرزین؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۳ ب). اولویتهای انگیزشی و تفریحی مراجعه‌کنندگان به پارک‌های منطقه‌ای شهر تبریز. *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، ۹ (۲)، ۳۴ ، ۷۹-۸۸. doi: 10.30473/psp.2024.71165.2727

حامی، احمد؛ قاسم‌زاده خطیب، رقیه؛ امامی، فرزین؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۳ ج). طراحی پایدار محوطه های سبز بیمارستانهای شهر تبریز از دیدگاه متخصصان معماری و منظر. *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۵ (۴)، ۱-۱۳. https://www.srds.ir/article_212495.html?lang=en

حامی، احمد؛ فرجی، فرناز؛ محمدی، میلاد؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۳ د). بررسی ترجیحات رانندگان و ارزیابی استراحتگاه‌های بین راهی. *اندیشه‌های نو در علوم جغرافیایی*، ۶ (۲)، ۱-۱۴ https://sanad.iau.ir/Journal/ntigs/Article/1122371

حامی، احمد؛ قریشی، لطیفه؛ علیزاده اجیرلو، سعداله؛ صمدی تودار، زانیار (۱۴۰۴). ارزیابی عوامل مؤثر بر رضایتمندی گردشگران غیربومی در تفرجگاه عون بن علی شهر تبریز. *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۶ (۱)، ۲۵۶-۲۶۸. https://www.srds.ir/article_214274.html?lang=en

صمدی تودار، زانیار؛ شجره، سیده سارینا؛ پناهی راد، سیما (۱۴۰۳). دیدگاه دختران جوان نسبت به احساس تنهایی در پارکهای شهر سنندج در جهت ارتقاء کیفیت زندگی. *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۵ (۳)، ۱۷۴-۱۸۳. https://www.srds.ir/article_211437.html?lang=en

## References


Abdi, B., Hami, A., & Zarehaghi, D. (2020). Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort. *Sustainable Cities and Society, 56,* 102085. doi: 10.1016/j.scs.2020.102085

Barakat, A., Ayad, H., & El-Sayed, Z. (2017). Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. *Alexandria Engineering Journal, 56(4*), 533-543. doi: 10.1016/j.aej.2017.04.008

Brown, R. D. (1995). *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate, 18*, 33-57. doi: 10.1016/j.uclim.2016.08.004

El-Bardisy, W. M., Fahmy, M., & El-Gohary, G. F. (2016). Climatic sensitive landscape design: Towards a better microclimate through plantation in public schools, Cairo, Egypt. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 216*, 206-216. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.12.029

Fabbri, K., Canuti, G., & Ugolini, A. (2017). A methodology to evaluate outdoor microclimate of the archaeological site and vegetation role: A case study of the Roman Villa in Russi (Italy). *Sustainable Cities and Society, 35(August)*, 107–133. doi: 10.1016/j.scs.2017.07.020

Forouzandeh, A. (2018). Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society, 36*, 327–345. doi: 10.1016/j.scs.2017.07.025

Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, *43*(10), 1583-1595. doi: 10.1016/j.buildenv.2007.10.003

Hami, A., Abdi, B., Zarehaghi, D. & Maulan, S. B. (2019). Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society. 49*, 101634. doi: 10.1016/j.scs.2019.101634

Hami, A., Faraji, F., Mohammadi, M., & Samadi Todar, Z. (2024 d). Investigating Drivers' Preferences and Evaluating Roadside Rest Areas. *New Ideas In The Geographical Sciences* ,*6* (2) ,1-14. https://sanad.iau.ir/Journal/ntigs/Article/1122371. (In Persian)

Hami, A., Faraji, S., Emami Namin, F., Samadi Todar, Z. (2024 b). Motivational and Recreational Priorities of Visitors to the Regional Parks of Tabriz City, *Physical Social Planning*, *9* (2), 34, 79-88. doi: 10.30473/psp.2024.71165.2727. (In Persian)

Hami, A., Ghasemzadeh Khatib, R., Emami, F., & Samadi-Todar, Z. (2024 c). Sustainable design of green areas of Tabriz hospitals from the point of view of architecture and landscape experts. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*.13-1, *5* (4). https://www.srds.ir/article_212495.html?lang=en. (In Persian)

Hami, A., Ghoreishi, L., Alizadeh Ajirlo, S. and Samadi-Todar, Z. (2025). Evaluation of effective factors on nonlocal visitors' satisfaction in On ibn Ali recreation site in Tabriz City. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *6*(1), 256-268. https://www.srds.ir/article_214274.html?lang=en. (In Persian)

Hami, A., Tarashkar, M., Emami, F., & Samadi-Todar, Z. (2024 a). University campuses planning with place attraction perspective (case study: University of Tabriz). J*ournal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *5*(3), 66-78. https://www.srds.ir/article_211708.html?lang=en. (In Persian)

Jin, C., Bai, X., Luo, T., & Zou, M. (2018). Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry & Urban Greening, 29*, 223-237. doi: 10.1016/j.ufug.2017.12.002

Karakounos, I., Dimoudi, A., & Zoras, S. (2018). The influence of bioclimatic urban redevelopment on outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings, 158*, 1266-1274. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.035

Lee, H., & Mayer, H. (2018). Maximum extent of human heat stress reduction on building areas due to urban greening. *Urban Forestry & Urban Greening, 32*, 154-167. doi: 10.1016/j.ufug. 2018.04.010

Lee, H., Mayer, H., & Kuttler, W. (2020). Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry & Urban Greening, 48*, 126558. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126558

López-Cabeza, V. P., Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & Roa-Fernández, J. (2018). Courtyard microclimate ENVI-met outputs deviation from the experimental data. *Building and Environment, 144*, 129–141. doi: 10.1016/j.buildenv.2018. 08.013.

Lu, J., Li, Q., Zeng, L., Chen, J., Liu, G., Li, Y., . ... Huang, K. (2017). A micro-climatic study on cooling effect of an urban park in a hot and humid climate. *Sustainable Cities and Society, 32*, 513-522. doi: 10.1016/j.scs.2017.04.017

Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and environment, 115*, 1-17. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.005

Morakinyo, T. E., Lau, K. K.-L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and environment, 137*, 157-170. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.012

Osan, S., Hami, A., Mariapan, M. (2023). The Impact of Trees on Thermal Comfort Conditions in Urban Micro-Climate in Cold Weather. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning, 33*(2), 1-13. http://doi.org/10.22068/ijaup.700 .

Perini, K., Chokhachian, A., & Auer, T. (2018). Green streets to enhance outdoor comfort. *In Nature based strategies for urban and building sustainability* (pp. 119-129): Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-812150-4.00011-2

Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society, 26*, 318-343. doi: 10.1016/j.scs.2016.07. 005

Samadi-Todar, Z., Shajareh, S. S., & Panahirad, S. (2024). The point of view of young girls towards the feeling of loneliness in the parks of Sanandaj city in order to improve the quality of life. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *5*(3), 174-183. https://www.srds.ir/article_211437.html?lang=en. (In Persian)

Santamouris, M. (2013). *Energy and climate in the urban built environment*. London: Routledge.

Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. (2018). The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening, 34*,85–96. doi: 10.1016/j.ufug.2018.06.002.

Sun, S., Xu, X., Lao, Z., Liu, W., Li, Z., García, E. H., & Zhu, J. (2017). Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation. *Building and environment, 123*, 277-288. doi: 10.1016/j.buildenv.2017. 07.010

Unal, M., Uslu, C., Cilek, A., & Altunkasa, M. F. (2018). Microclimate analysis for street tree planting in hot and humid cities. *Digital landscape architecture,* 34-42. doi: 10.14627/ 537642004

Wang, Y., & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society, 27*, 122–128. doi: 10.1016/j.scs.2016.04.013

Wibig, J., Podstawczyńska, A., Rzepa, M., & Piotrowski, P. (2009). Heatwaves in Poland–frequency, trends and relationships with atmospheric circulation. *Geographia Polonica*, *82*(1), 33-46. http://dx.doi.org/10.7163/GPol.2009.1.3

Wu, Z., & Chen, L. (2017). Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for better cooling effects: Integrating modeling with in-situ measurements. *Landscape and Urban Planning, 167*, 463-472. doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.07.015

Zhang, L., Zhan, Q., & Lan, Y. (2018). Effects of the tree distribution and species on outdoor

environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment, 130*,27–39. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.12.014

Zhao, T. F., & Fong, K. F. (2017). Characterization of different heat mitigation strategies in landscape to fight against heat island and improve thermal comfort in hot-humid climate (Part II): Evaluation and characterization. *Sustainable Cities and Society, 35*, 841–850. doi: 10.1016/j.scs.2017.05.006