

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی پوشش سایه درختان بر یک ساختمان در نواحی گرمسیری با استفاده از GIS و روش فراابتکاری ACO (مطالعه موردی: شهر سمنان)

محسن قدس، دانشجوی دکتری تخصصی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
حسین آقامحمدی زنجیرآباد، استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
علیرضا وفایی‌نژاد، استادیار، گروه حمل و نقل، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
علیرضا قراگوزلو، دانشیار، آموزشکده سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران
سعید بهزادی، استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

چکیده

سایه‌ی درختان در کاهش جذب پرتوهای خورشید توسط عوارض مختلف شهری به‌خصوص ساختمان‌ها نقش مؤثری دارند. در مناطق گرمسیری سایه‌ی درختان به کاهش مصرف انرژی و متعاقب آن، کاهش هزینه‌ها، افزایش ارزش خانه‌ها، ایجاد منظر بصری زیبا و حس خوبی و سلامتی کمک می‌کند. لذا، بیشینه نمودن پوشش سایه‌ی درختان، عنصر مهمی در ایجاد محیط شهری دوست‌دار محیط‌زیست است. روشی ساده برای ایجاد سایه فراوان، کاشت درختان متعدد در اطراف ساختمان‌ها است که به دلیل مشکل کمبود آب در بسیاری از مناطق، غیرعملی است. ضمن آن‌که، سایه‌های اضافی بر سطح بام ساختمان، موجب کاهش پتانسیل استفاده از پانل‌های خورشیدی بر روی بام با هدف تولید الکتریسیته می‌شود. بنابراین، لازم است با استفاده از روش‌هایی، با کاشت تعداد معدودی درخت در نقاطی بهینه، پوشش سایه بیشینه را بر سطح نما و پوشش سایه کمینه را بر سطح بام تأمین نمود. در این پژوهش که در شهر سمنان انجام شده است، پس از استفاده از قابلیت‌های GIS، مدل‌سازی سه‌بعدی منابع داده و تعریف مسئله بهینه‌سازی مکانی، از روش فرا-ابتکاری ACO برای یافتن مکان درختان با هدف بهینه‌سازی پوشش سایه آنها بر روی ساختمانی مسکونی در یک منطقه گرمسیری استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در حالت کلی، نمای جنوبی، سپس نمای شرقی و غربی در الویت کاشت درختان قرار دارند. با کاشت ۳ درخت در مکان (های) مناسب در جهت‌های فوق‌الذکر، می‌توان به ترتیب ۳۶/۰۴، ۳۸/۴۶ و ۷ درصد سایه بر سطح کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ایجاد نمود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی پوشش سایه، ساختمان مسکونی، GIS، ACO.

مقدمه

با افزایش جذب تشعشعات خورشید، تعادل حرارتی شهرها متاثر می‌شود و متناسب با آن، حرارت محسوس^۱ سطح ساختمان‌های شهر افزایش می‌یابد (اوکه^۲، ۱۹۸۲). حرارت تجمع یافته و آزاد شده از محیط، منجر به دماهای محیطی بالاتر محدوده شهر در مقایسه با محیط پیرامونی آن می‌شود. این پدیده به عنوان "جزیره حرارت شهری (UHI)"^۳ شناخته می‌شود (کیم^۴، ۱۹۹۲؛ گارتلند^۵، ۲۰۰۸؛ سانتاموریس^۶، ۲۰۱۴). UHI در طول تابستان مصرف انرژی سرمایشی و تقاضا برای مصرف برق را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش غلظت آلاینده‌های مضر و تولید گاز CO₂ بیشتر می‌شود. برای به تعادل برگرداندن اثرات گرمایش شهری، راهکارهایی پیشنهاد شده‌اند که عمدتاً شامل دو دسته می‌شوند:

- افزایش بازتاب تشعشعات^۷.
 - افزایش سایه‌ها و تبخیر و تعرق^۸ درختان و پوشش گیاهی.
- اثر مثبت درختان را می‌توان به دو قسمت مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. اثر مستقیم آن ایجاد سایه بر ساختمان‌ها و اثر غیرمستقیم آن خنک‌کنندگی محیط است (مک‌پرسون^۹ و همکاران، ۲۰۰۴). وجود سایه در مناطق گرمسیری بسیار ارزشمند است. در این مناطق، سایه درختان به کاهش مصرف انرژی و متعاقب آن کاهش هزینه‌ها، افزایش ارزش خانه‌ها، ایجاد منظر بصری زیبا و حس خوبی و سلامتی کمک می‌کند (ژائو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). در خصوص بهینه‌سازی پوشش سایه‌ی درختان در مناطق شهری، در ایران پژوهش‌چندانی انجام نشده است. در نظر گرفتن این موضوع

¹ Sensible Heat

² Oke

³ Urban Heat Island

⁴ KIM

⁵ Gartland

⁶ Santamouris

⁷ Solar Reflectance

⁸ Evapotranspiration

⁹ McPherson

¹⁰ Zhao

که بهینه‌ی وسیعی از ایران، شامل شهرهای بزرگ و پرجمعیت در منطقه‌ی گرمسیری قرار دارد، اهمیت پژوهش درباره بهینه‌سازی پوشش سایه‌ی درختان در مناطق شهری را دو چندان می‌کند. از طرفی دیگر، با توجه به بحران کم‌آبی، ضرورت مدیریت فضای سبز شهری، کاشت و بهره‌برداری حساب شده از سایه‌ی درختان بدیهی است. ضمن آن‌که، در بسیاری از شهرهای ایران، در فصل گرما، برای ایجاد تهویه مطبوع و سرمایش از کولرهای آبی که مصرف آب بالایی دارند و یا از کولرهای گازی که مصرف برق بالایی دارند، استفاده می‌شود. لذا، بهینه‌سازی پوشش سایه‌ی درختان بر ساختمان‌ها می‌تواند کمک شایانی به خنک‌شدن آنها و کاهش مصرف آب و انرژی نماید.

با توجه به پتانسیل بالای بهره‌برداری از پرتوی خورشید جهت تولید الکتریسیته، مدلی بهینه خواهد بود که، ضمن ایجاد بیشترین میزان پوشش سایه‌ی درخت بر سطح نما، درب و پنجره‌ها، کمترین میزان پوشش سایه‌ی درخت را بر سطح بام ساختمان‌ها ایجاد کند تا امکان نصب و استفاده از پانل‌های خورشیدی بر سطح بام فراهم گردد. موضوع تحقیق حاضر، برنامه‌ریزی استراتژیک برای این منظور است. روشی ساده برای ایجاد سایه فراوان، کاشت درختان متعدد در اطراف ساختمان‌ها است. اما این روش در بسیاری از مناطق که با مشکل کمبود آب مواجه‌اند، به دلیل هزینه‌های زیاد آن غیرعملی است (ونتز^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). ضمن آن‌که، وجود سایه‌های اضافی بر سطح بام، موجب کاهش قابلیت در معرض تابش پرتوی خورشید قرار گرفتن و کاهش پتانسیل استفاده از پانل‌های خورشیدی بر سطح پشت‌بام ساختمان خواهد شد (فوگل^۲، ۲۰۱۶؛ لوینسون^۳ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لی^۴ و همکاران، ۲۰۱۵؛ توکه^۵ و همکاران ۲۰۱۱). چالش اصلی، دستیابی به بیشترین مزایای سایه با استفاده از روشی است که بتواند با تعداد کمی درخت در نقاطی بهینه، پوشش سایه بیشینه بر سطح نما و پوشش سایه کمینه بر

¹ Wentz

² Fogl

³ Levinson

⁴ Li

⁵ Tooke

سطح بام را فراهم آورد. برای این منظور، از سیستم اطلاعات مکانی^۱ و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۲ در مکان‌یابی استراتژیک موقعیت درختان استفاده شده است. مکان‌یابی موقعیت درختان با هدف بهینه‌سازی^۳ پوشش سایه، یک مسئله‌ی غیرقطعی سخت^۴ بوده و راه‌حل دقیق و قطعی ندارد؛ لذا، از روش ACO برای حل مسئله استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیق به مالکان ساختمان‌ها، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران امور شهری کمک خواهد کرد تا به صورت کمی، پوشش سایه درختان را برای ساختمان‌ها در یک محیط شهری ارزیابی نمایند.

در زمینه اثر پوشش گیاهی بر کاهش دما در مناطق مسکونی و بهینه‌سازی پوشش سایه درختان در مناطق مسکونی، مطالعات متعددی انجام شده است. پژوهش ساوکا^۵ و همکاران (۲۰۱۳)، در خصوص بهینه‌سازی پوشش سایه‌ی درختان در مناطق مسکونی نشان می‌دهد که سایه‌ی درختان بر ساختمان‌ها، در برخی از مطالعات انجام شده، موجب کاهش مصرف انرژی تا ۵۴٪ می‌شود. تحقیقات سیمپسون^۶ و همکاران (۱۹۹۶)، نشان می‌دهد که درختان کاشته شده در جهت شرق و غرب، بهینه‌ترین اثرات خنک‌کنندگی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی را ایجاد می‌نمایند. وانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۵)، اثرات سایه‌ی تک‌درخت را در یک ساختمان منفرد در طول فصل گرما و سرما ارزیابی کرده‌اند. آنها با توجه به فاصله‌ی بین درخت تا ساختمان و در نظر گرفتن هشت جهت جغرافیایی نشان دادند که وجود درخت در سمت شرق و غرب خانه موجب صرفه‌جویی بیشتری در انرژی می‌شود. هرچند وجود رابطه بین سایه‌ی درختان و صرفه‌جویی در میزان انرژی مشخص است؛ اما فقط راهنمایی‌هایی کلی درباره استراتژی موقعیت‌یابی درختان و نیز تعداد بهینه درختان

^۱ Geospatial Information System (GIS)

^۲ Ant Colony Optimization

^۳ Optimization

^۴ Non-deterministic Polynomial hard (NP-hard)

^۵ Sawka

^۶ Simpson

^۷ Hwang

وجود دارد. در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۵)، بدون در نظر گرفتن فاصله درخت تا ساختمان، بر استراتژی‌های موقعیت‌یابی درختان در چهار جهت جغرافیایی اصلی تأکید شده است. مسلماً زمانی که کاشت درخت در جهات اصلی غیرممکن باشد، این اطلاعات محدودیت دارند. علاوه بر این، در نظر نگرفتن فاصله درخت تا ساختمان نیز بر میزان پوشش سایه بر سطح نمای ساختمان تأثیر می‌گذارد. تعداد درختان نیز در پژوهش‌هایی مورد مطالعه قرار گرفته است؛ اما، در اکثر مطالعات اثر میزان پوشش تک-درخت بررسی شده است. هوانگ^۱ و همکاران (۱۹۸۷)، اکبری و طاها (۱۹۹۲)، سیمپسون و مک‌پرسون (۱۹۹۶)، مک‌پرسون و همکاران (۲۰۰۴)، کالسرانو^۲ و مارتینلی^۳ (۲۰۱۶)، پوشش سایه‌ی ناشی از ارتفاع درختان، تعداد طبقات ساختمان و نیز تعداد درختان را مورد بررسی قرار داده‌اند. باز هم نتایج حاصل نشان می‌دهد که موقعیت مناسب برای درختان برای صرفه‌جویی در انرژی جهت شرق و غرب ساختمان‌ها می‌باشد. در این مطالعات نیز، پتانسیل استفاده از پانل‌های خورشیدی بر سطح بام در نظر گرفته نشده است. تحقیقات جادراگ^۴ و همکاران (۲۰۱۰)، نشان می‌دهد که سطح بام ساختمان‌های مسکونی، مکان‌های مناسبی برای نصب پانل‌های خورشیدی فتوولکائیک جهت تولید الکتریسیته از تابش مستقیم خورشید است؛ ولی، پوشش سایه‌ی درختان به طور قابل‌ملاحظه‌ای بر کارایی پانل‌های خورشیدی فتوولتائیک اثر می‌گذارد. صفارزاده و بهادری (۲۰۰۵)، در خصوص موقعیت‌یابی درختان به منظور بهینه‌سازی پوشش سایه بر درب‌ها و پنجره‌ها نیز پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. پنجره‌ها و درب‌ها، عایق‌بندی حرارتی کمتری در مقایسه با نمای ساختمان دارند. لذا، پوشش سایه بر پنجره‌ها و درب‌ها اهمیت بیشتری دارد. ژائو و همکاران (۲۰۱۷)، نسخه ساده‌ای را از بهینه‌سازی پوشش سایه برای یک ساختمان از هر طرف باز، در شهر تمپه^۵

¹ Huang

² Calcerano

³ Martinelli

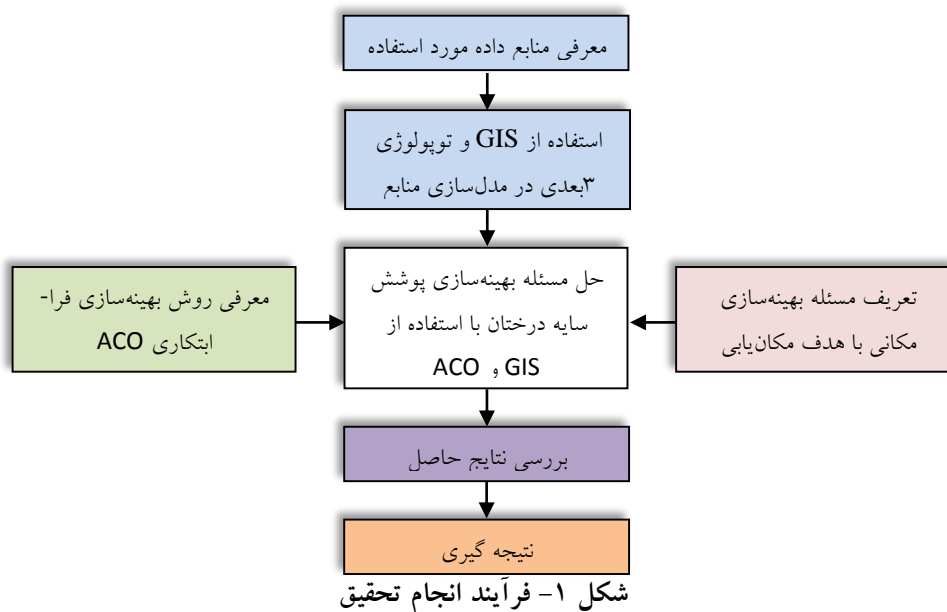
⁴ Jadraque

⁵ Tempe

ایالت آریزونا^۱ انجام دادند. پژوهش ژائو نیز با توجه به پیچیدگی‌های مسئله، فقط مکان‌های بهینه برای دو درخت در اطراف یک ساختمان را بررسی کرده است. در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده از روش بهینه‌سازی فرا-ابتکاری و ترکیب آن با GIS استفاده نشده است. در این پژوهش، با رویکردی ترکیبی، از GIS در یک محیط سه‌بعدی و روش‌های بهینه‌سازی فرا-ابتکاری در مکان‌یابی استراتژیک تعداد مختلف درختان، با هدف بیشینه‌نمودن پوشش سایه‌ی درختان بر سطح نمای ساختمان و کمینه‌نمودن پوشش سایه‌ی درختان بر سطح بام استفاده می‌شود.

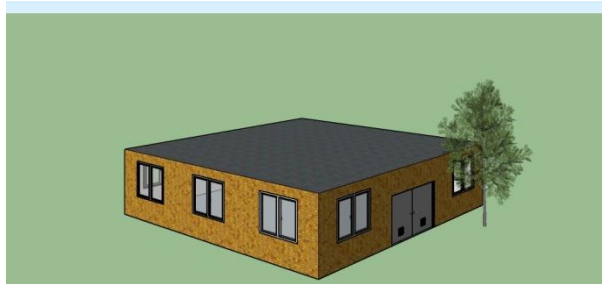
داده‌ها و روش‌ها

برای درک بهتر مراحل مختلف تحقیق و ارتباط بین آنها در شکل ۱، فرآیند انجام تحقیق نشان داده شده است.



¹ Arizona

غربی و دو پنجره با همین ابعاد و یک درب بیرونی با ابعاد ۲ متر × ۳/۲ متر در نمای جنوبی است. در این ساختمان، مساحت بام، نما، پنجره‌ها و درب جنوبی به ترتیب ۱۴۴، ۱۴۴، ۴۱/۶ مترمربع است. برای نمایش درخت به صورت سه‌بعدی، طرحی ساده از درخت کاج با ارتفاع ۶ متر و شعاع تاج ۲ متر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ نمایش سه‌بعدی مدل ساختمان و درخت مذکور را نشان می‌دهد. هر چند امکان انتخاب درختان دیگر با شکل، اندازه و گونه‌های مختلف وجود دارد که قطعاً بر میزان پوشش سایه بر ساختمان و بام آن تأثیر می‌گذارد، اما، گونه انتخاب شده، گونه مرسوم در شهر سمنان است. چالش اصلی شناسایی بهترین موقعیت برای یک یا چند درخت برای ایجاد پوشش سایه‌ی بهینه بر ساختمان است.



شکل ۳- نمایش سه بعدی مدل ساختمان و درخت مورد استفاده در تحلیل

روش مدل‌سازی: برای مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی پوشش سایه‌ی درختان از GIS و روش بهینه‌سازی ACO استفاده می‌کنیم. GIS قابلیت ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل و ایجاد توپولوژی سه‌بعدی را فراهم نموده (شاد و همکاران، ۲۰۰۹)، و از روش ACO نیز برای خلاصه‌سازی شرایط دنیای واقعی در یک مسئله ریاضی استفاده می‌شود. استفاده از GIS با هدف استخراج سطح پوشش: برای ذخیره‌سازی اطلاعات مکانی، استخراج سطح پوشش و توپولوژی مکانی، از GIS و قواعد مثلثاتی استفاده شده است. برای استخراج موقعیت سایه، از نظر دافیه^۱ و بکمن^۲ (۲۰۱۳)، براساس روابط مثلثاتی

¹ Duffie

² Beckman

(۱) تا (۴) استفاده شده است. در این روابط، (x, y, z) نقطه‌ای از یک درخت، ε زاویه تابش خورشید، γ اختلاف بین آزیموت زاویه خورشید و آزیموت سطح، β زاویه ارتفاعی خورشید و H ارتفاع بام را نشان می‌دهد. شکل ۴ پارامترهای هندسی استخراج پوشش سایه‌ی یک شی سه‌بعدی را در یک شرایط مشخص نشان می‌دهد. شکل ۴-الف زوایای خورشید و پوشش سایه بر روی زمین و نقطه انتهای پوشش سایه $(0, y', z')$ ، شکل ۴-ب پوشش سایه بر سطح نما و نقطه انتهای پوشش سایه $(0, y'', z'')$ ، و شکل ۴-ج پوشش سایه بر سطح بام و نقطه انتهای سایه (x''', y''', H) را نشان می‌دهد. در این شکل:

$$h = \frac{z}{\tan \beta} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن h طول سایه در صفحه ۲ بعدی تحت β زاویه ارتفاعی خورشید است.

$$y' = y - h \sin \gamma \quad x' = x - \frac{z}{\tan \varepsilon}; \quad \text{رابطه (۲)}$$

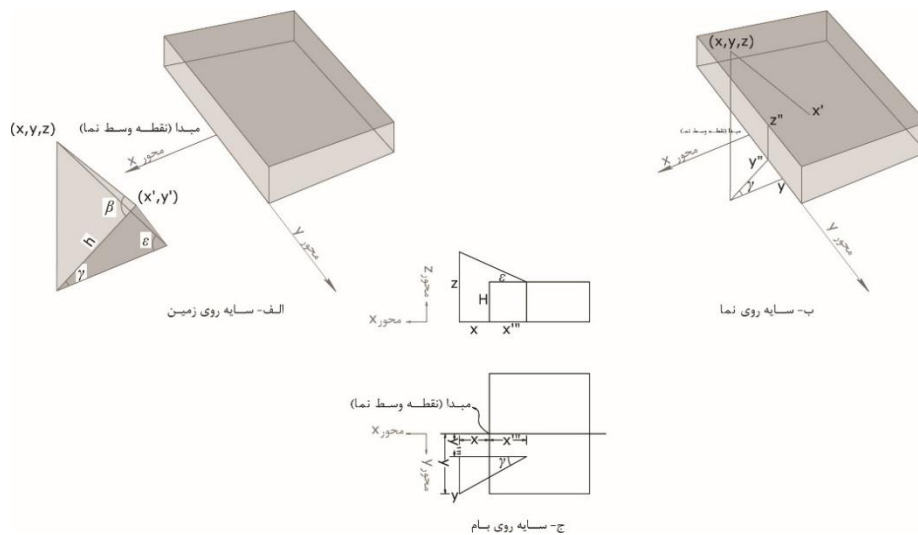
که براساس ε زاویه تابش خورشید و γ زاویه آزیموتی، (x', y') مختصات مسطحاتی انتهای سایه بر روی زمین را محاسبه می‌کند.

$$z'' = \frac{x' z'}{x' - x} \quad y'' = y - x \tan \gamma; \quad \text{رابطه (۳)}$$

که براساس x' مختصات مسطحاتی انتهای سایه و γ زاویه آزیموتی، (x'', y'') مختصات ارتفاعی انتهای سایه بر روی سطح نما ساختمان را محاسبه می‌کند.

$$y''' = y - (x - x''') \tan \gamma \quad x''' = x - \frac{z - H}{\tan \varepsilon} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که براساس ε زاویه تابش خورشید و γ زاویه آزیموتی، (x''', y''') مختصات مسطحاتی انتهای سایه بر روی سطح بام ساختمان با ارتفاع H را محاسبه می‌کند.



شکل ۴- تصویر سایه از نقطه (x, y, z) بر روی یک شی سه‌بعدی (ترسیم مجدد بر اساس گومز-مونز و همکاران (۲۰۱۰))

استفاده از بهینه‌سازی مکانی با هدف جانمایی درخت: با توجه به مسئله $MCLP^1$ مطرح شده توسط چرچ^۲ و ریوله^۳ (۱۹۷۲) شرایط زیر تعریف می‌شود:

i اندکسی برای هر یک از اجزا (برای مثال نما، درب، پنجره و بام) یک شی سه‌بعدی ساختمان؛ z اندکسی برای هر موقعیت ممکن برای وجود درخت؛ d اندکسی برای هر روز بیش از حد گرم در سال؛ t اندکسی برای ساعات بیش از حد گرم در روز d ؛ w_i وزن هر یک از اجزا i ؛ g_i مساحت هر یک از اجزا i ؛ p تعداد درختان مورد نظر؛ f تابع پوشش سایه مرتبط با ابعاد یک شی بر اساس روابط مثلثاتی (۱) تا (۴)؛ S_{id} زوایای خورشیدی در زمان t روز d ؛ N_i مجموعه مکان‌های ممکن برای وجود درخت که بر یکی از اجزا i سایه ایجاد می‌کند.

متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از:

¹ Maximal Covering Location Problem

² Church

³ ReVelle

X_j برابر ۱ اگر در مکان ممکن j ؛ درخت قرار بگیرد و برابر صفر اگر در مکان ممکن j درخت قرار نگیرد؛

C_{itd} تعداد اجزا i که در زمان t روز d ام با سایه پوشیده است.

با توجه به این شرایط، مدل موردنیاز برای پوشش شی سه‌بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Max} \sum_i w_i \sum_d \sum_t C_{itd} \quad \text{رابطه (۵)}$$

به طوری که:

$$\forall i, t, d \quad C_{itd} = f(g_i, S_{itd}, X_j, j \in N_i) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_j X_j = p \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\forall j \quad X_j = \{0,1\} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$C_{itd} > 0 \quad \forall i, t, d \quad \text{رابطه (۹)}$$

هدف رابطه (۵)، بیشینه نمودن پوشش سایه‌ی درخت بر اجزای مختلف شی (بام، نما، درب و پنجره) در یک بازه زمانی مشخص، در روز مشخصی از سال است که هر یک از اجزا i وزن از پیش تعریف شده w_i دارد. در واقع، وزن w_i اولویت و اهمیت اجزا مختلف ساختمان در تحت پوشش سایه قرار گرفتن را نشان می‌دهد. به طور کلی، لازم است درب و پنجره‌ها که اجزای بازشو هستند، بیشترین سایه را داشته باشند تا در مناطق گرمسیری انتقال گرما ناشی از تابش مستقیم خورشید را کاهش دهند. بعد از آن نمای ساختمان در الویت دوم قرار دارد. بام ساختمان نیز کمترین الویت را دارد یا اصلاً باید بدون سایه باشد؛ چرا که، اغلب بام ساختمان‌های مسکونی بهترین مکان برای نصب پانل‌های خورشیدی و تولید الکتریسیته از انرژی خورشیدی است. هدف از رابطه (۶) تعریف مقدار پوشش ایجاد شده برای هر یک از اجزا i (بام، نما، درب و پنجره‌ها) بر اساس مکان درخت و زوایای خورشیدی در ساعات مشخص t از روز d است. رابطه (۷) قیدی را برای تعداد درختان موردنظر برای تأمین سایه، رابطه (۸)

قیدی را برای وجود یا عدم وجود درخت در هر مکان ممکن و رابطه (۹) قیدی را برای غیرمنفی بود، مقدار پوشش مشخص می‌کند.

روش بهینه‌سازی و حل مسئله: برای بهینه‌سازی مکانی سه‌بعدی به ۳ دلایل زیر، از روشی فرا-ابتکاری استفاده می‌شود. دلیل اول، مبتنی بر استفاده از قواعد مثلثاتی پیچیده فوق‌الذکر در محاسبه پوشش سایه بر روی ساختمان‌های مختلف و به‌خصوص استفاده از مدل سه‌بعدی پیچیده و با جزئیات کامل برای درخت و ساختمان است. دلیل دوم، مبتنی بر عدم وجود روشی قطعی برای حل مسئله بهینه‌سازی با توجه به قیود غیرخطی شامل توابع مثلثاتی و دلیل سوم، مبتنی بر وجود فضای پیوسته اطراف ساختمان است که در هر مکانی امکان قرارگیری درخت وجود دارد و لذا، منجر به بی‌نهایت ترکیب از ترتیب چند درخت در فضای ممکن برای بررسی مسئله می‌گردد. جدول ۱ جزئیات مراحل را نشان می‌دهد.

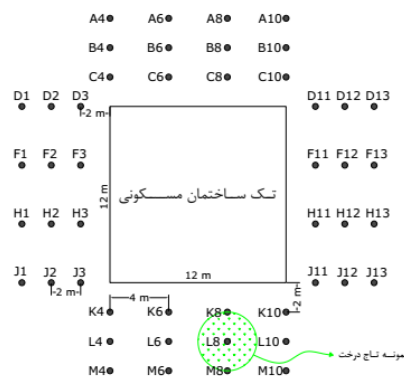
جدول ۱- جزئیات مراحل مکان‌یابی موقعیت درختان برای بهینه‌سازی پوشش سایه (ژائو

و همکاران، ۲۰۱۷)

<p>۱. تعریف مجموعه مکان‌های ممکن برای درخت براساس ارتفاع، قطر تاج، محوطه پیرامونی و چشم‌انداز بیرونی ساختمان.</p> <p>۲. استفاده از روشی برای قرارگیری اولین درخت در تمام مکان‌های ممکن اطراف ساختمان در طی ساعات گرم در روزهای مشخصی از فصل تابستان و محاسبه بیشترین پوشش سایه بر روی ساختمان C_{itd} براساس وزن اجزا ساختمان W_i.</p> <p>۳. حذف مکان‌های ممکن قرار گرفته در تاج درخت به منظور جلوگیری از همپوشانی آنها.</p> <p>۴. تکرار مراحل ۲ و ۳ برای قرارگیری درختان بعدی در مکان‌های ممکن اطراف ساختمان تا زمانی که تعداد درختان به p تعداد درختان مورد نظر برای ایجاد سایه برسد.</p>
--

ساده‌سازی پارامترهای مدل: با توجه به وجود بی‌نهایت مکان ممکن، ساده‌سازی و محدود کردن تعداد مکان‌های ممکن ضروری است. برای این منظور، فضای پیوسته به مجموعه مکان‌های ممکن برای قرارگیری N_i درخت با فاصله ۲ متری در راستای شمال-جنوب و شرق-غرب خلاصه شده است. ضمن آن‌که، به منظور استفاده از روشنایی

روز در ساختمان، امکان دید به بیرون از داخل ساختمان و امکان رفت و آمد از درب‌ها، مکان‌های ممکن روبه‌روی درب‌ها و پنجره‌ها حذف شده است. برای پرهیز از ایجاد سایه غیرضروری در بام، حداقل فاصله ۲ متر درختان تا ساختمان در نظر گرفته شده است. شکل ۵، مکان‌های ممکن در سناریو تک ساختمان را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مکان‌های ممکن برای درخت در سناریو تک ساختمان

بنا به دلایل زیر، وزن اجزا ساختمان برای درب/پنجره‌ها، نما و بام به ترتیب ۰/۷، ۰/۴ و ۰/۱- تعریف شده است. مهم‌ترین اجزا ساختمان برای تأمین سایه، اجزا بازشو درب و پنجره‌ها هستند. هرچند این اجزا در مقایسه با نما و بام سطح کوچکتری دارند، اما انتقال گرمایی تابشی خورشیدی از طریق این اجزا، بیشترین مقدار است (واگرا^۱، ۱۹۸۴). با توجه به پژوهش‌های گذشته، میزان انتقال گرمایی خورشید از یک فوت مربع نما یا بام تقریباً معادل دو درصد گرمای انتقال داده شده از طریق پنجره است (هسلر^۲، ۱۹۸۶). لذا، با در نظر گرفتن انتقال گرمایی و تابش خورشیدی، ایجاد پوشش سایه بر روی درب و پنجره‌ها بالاترین الویت را دارد. بعد از آن، نما و بام به ترتیب در الویت‌های بعدی هستند. علاوه بر این، چون بام مکان مناسبی برای نصب پانل‌های خورشیدی با هدف تولید الکتریسیته است، ایجاد سایه بر روی بام مناسب نیست؛ از

¹ Wagar

² Heisler

این‌رو، وزن بام با مقدار کوچک منفی مشخص شده است. برای اندازه‌گیری پوشش سایه بر اجزای مختلف ساختمان به پژوهش شایو^۱ و یزیورو^۲ (۱۹۹۷)، مراجعه شده که در آن، برای بیان نسبت مساحت سطح سایه به مساحت سطح کل، از ضریب هندسی سایه استفاده شده است. این پژوهش، برای ۴ روز گرم سال شامل ۲۵ خرداد، ۲۵ تیر، ۲۵ مرداد و ۲۵ شهریور از ساعت ۹ الی ۱۵ برای فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای انجام شده است. از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها به‌عنوان روشی فرا-ابتکاری برای حل مدل بهینه‌سازی شامل روابط (۵) تا (۹) و با توجه به وزن مشخص هریک از اجزای درب/پنجره نما استفاده شده است.

روش ACO: این روش یکی از کاراترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که تاکنون در مسائل گوناگون استفاده شده است. ساختار این الگوریتم بدین صورت است که تعدادی مورچه در یک گراف که متناظر با مسأله بهینه‌یابی است، قرار می‌گیرد. مورچه به صورت احتمالی در این گراف حرکت می‌کند و بر اساس مقدار فرومون و اطلاعات ابتکاری اقدام به تولید جواب می‌کند. سپس، مقدار فرومون مسیر را بر اساس کیفیت جواب تولید شده بروز می‌کند و به این وسیله، بین مورچه‌ها ارتباط برقرار می‌شود. اطلاعات ابتکاری براساس تابع هدف مسئله تعریف می‌شود؛ به این صورت که، معرف میزان بهبود در مقدار این تابع، در اثر حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگری است. همچنین، هر حرکتی که یک مورچه مصنوعی انجام می‌دهد، در حافظه‌ای ذخیره می‌شود تا برگشت به عقب و اصلاح مقادیر فرومون به‌سادگی قابل انجام باشد (دوریگو و گامباردلا^۳، ۱۹۹۷؛ الایب^۴ و همکاران، ۲۰۰۷). جدول ۲ شبه کد این الگوریتم را نشان می‌دهد.

¹ Shaviv

² Yezioro

³ Dorigo & Gambardella

⁴ Ellabib

جدول ۲- شبه کد الگوریتم ACO (دوریگو و گامباردلا، ۱۹۹۷)

<p>• شروع فرایند فرا-ابتکاری ACO</p> <p>تنظیم فعالیت مورچه‌ها</p> <p>قرارگرفتن هر مورچه بر روی یک نقطه گراف</p> <p>قرارگرفتن مقدار اولیه فرومون و محاسبه مقادیر هیوریستیک</p> <p>محاسبه احتمال حرکت مورچه‌ها به نقاط همسایه گراف</p> <p>ادامه حرکت مورچه‌ها تا تکمیل یک مسیر برای هر مورچه</p> <p>پایان تنظیم فعالیت‌ها</p> <p>بروزرسانی فرومون</p> <p>به جای گذاری فرومون براساس کیفیت جواب</p> <p>تبخیر فرومون</p> <p>اقدام خارق‌العاده (اختیاری)</p> <p>پایان بروزرسانی فرومون</p> <p>• پایان فرایند فرا-ابتکاری ACO</p>

پارامترهای ACO عبارتند از:

τ_{ij} : مقدار فرومون روی یالی است که گره‌های i و j را به هم متصل می‌کند.

p_{ij}^k : احتمال حرکت از گره i به گره j ملاقات نشده و به وسیله مورچه k است.

η_{ij} : اطلاعات ابتکاری برای اندازه‌گیری میدان دید مورچه است.

α و β : پارامترهایی کنترلی هستند که نسبت اهمیت مقدار میدان دید مورچه را در برابر

مقدار فرومون روی یالی که گره i و j را متصل کرده است، تعیین می‌کند.

در مرحله مقداردهی اولیه، تعداد k مورچه، هر کدام به صورت تصادفی به یکی از

مکان‌های ممکن اختصاص داده می‌شوند. این مکان‌ها، نقطه شروع هر مورچه برای

ساخت جواب است. همچنین میزان τ_0 به عنوان مقدار اولیه فرومون به تمام مکان‌های

ممکن اختصاص داده می‌شود. در مرحله ساخت جواب، هر مورچه یک توالی

امکان‌پذیر را در n گام می‌سازد. در هر گام، مورچه k که در مکان i قرار دارد، مکان

بعدی‌اش را به صورت احتمالی طبق رابطه (۱۰) حساب می‌کند:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in N^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} \quad \text{if } j \in N^k \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در این سایه ابتدایی درخت به‌عنوان مقدار ابتکاری و β میزان تأثیر این مقدار ابتکاری را نشان می‌دهد. همچنین N^k مجموعه مکان‌های کاندید مورچه k برای حرکت بعدی‌اش است. بعد از اینکه، مکان z برای حرکت بعدی مورچه انتخاب شد، این مکان و کلیه مکان‌های مجاور آن را به دلیل قرار گرفتن در تاج درخت از N^k حذف می‌کنیم. به عبارت دیگر، تا انتهای فرایند ساخت جواب، مورچه دیگر حق ندارد مکان z و مکان‌های مجاور آن را انتخاب کند. در طول فرایند ساخت جواب، به محض اینکه یک مورچه یک یال (i,j) را طی کند، میزان فرمون روی آن یال نیز طبق رابطه (۱۲) به‌روز می‌شود.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\tau_0 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

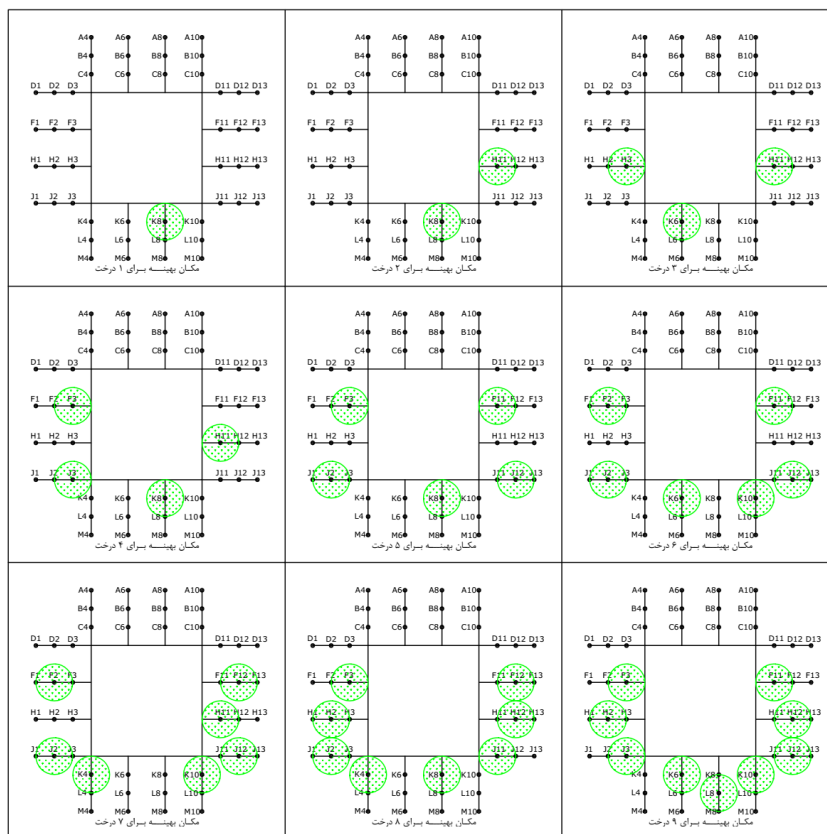
که در این رابطه ρ ، یک پارامتر بین صفر تا یک است. به این فرآیند، بروزرسانی محلی فرمون‌ها می‌گویند. وقتی فرآیند ساخت جواب برای تمام مورچه‌ها کامل شود و فرآیند جستجوی محلی بر همه این جواب‌ها صورت گیرد، فرآیند بروزرسانی سراسری فرمون‌ها صورت می‌پذیرد. الگوریتم ACO در صورتی خاتمه می‌یابد که تعداد تکرارهای الگوریتم به بیشترین مقدار خود برسند. این مقدار، در تنظیم پارامترها تعیین می‌شود.

بحث اصلی

برای بهینه‌سازی پوشش سایه درختان با استفاده از الگوریتم مذکور، از محیط MATLAB 2013 استفاده شد. برای این منظور، ابتدا، مدل ساختمان مورد بررسی شامل طول، عرض، ارتفاع هر یک از ساختمان، در قالب ساختاری^۱ تعریف شده که

^۱ Struct

دارای ماتریس‌های مجزایی برای نمای شمالی، شرقی، جنوبی و غربی ساختمان است. برای تعریف بام ساختمان نیز ماتریس دیگری استفاده شده است. هر عنصر از ماتریس‌های مذکور معادل $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ از سطح ساختمان و دارای مقدار صفر است. برای مدل‌سازی ابعاد و محل قرارگیری درب و پنجره‌ها در هر نما، ساختاری دیگر شامل ماتریس‌های مجزا برای هر نما تعریف شده است که مقدار عناصر ماتریس در محل قرارگیری درب و پنجره‌ها برابر یک است. مدل درخت غالب منطقه، شامل ارتفاع و شعاع تاج درخت نیز تعریف گردیده است. برای تعریف مشخصات خورشید در منطقه مورد مطالعه، شامل آزیموت و ارتفاع خورشید در روزهای مورد مطالعه در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای، از روابط مثلثاتی (۱) تا (۴) استفاده شده است. پس از قرارگیری درخت در هر یک از مکان‌های ممکن و حرکت خورشید، سایه‌ی ایجاد شده درختان بر هر نقطه از اجزای ساختمان، موجب تغییر مقدار عنصر ماتریس معادل آن نقطه از صفر به یک می‌گردد. در مجموع، مقادیر عناصر ماتریس، میزان سایه ایجاد شده توسط درخت را بر هر یک از اجزای ساختمان مشخص می‌کند. برای محاسبه‌ی سایه‌ی ایجاد شده بر درب و پنجره‌ها نیز، مجموع حاصلضرب عناصر ماتریس درب و پنجره‌ها در عناصر ماتریس نمای دارای سایه به‌دست آمده است. برای بهینه‌سازی پوشش سایه درختان بر سطح نما، درب/ پنجره‌ها و کمینه‌سازی پوشش سایه بر سطح بام، با توجه به وزن هر یک از اجزای مذکور، از روابط (۵) تا (۹) در تعریف تابع هدف در الگوریتم ACO استفاده شده است. شکل ۶، موقعیت‌های بهینه را برای ۱ تا ۹ اصله درخت نشان می‌دهد.



شکل ۶- مکان بهینه برای ۱ تا ۹ درخت با هدف بهینه‌سازی پوشش سایه بر ساختمان

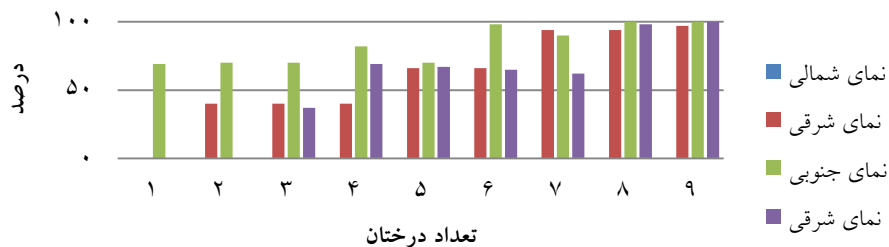
در ابتدا لازم است تعداد درختان مورد نظر برای بهینه‌سازی در الگوریتم تعریف گردد. بهترین مکان برای یک تک درخت، موقعیت K8 است که در فاصله ۲ متری از ساختمان و در حد واسط بین درب و پنجره ضلع جنوبی قرار دارد. میزان سایه ایجاد شده توسط این درخت از ساعت ۹ الی ۱۵ در چهار مورد بررسی در پژوهش، بر روی نما، درب/پنجره‌ها و بام به ترتیب ۱۵/۰۸، ۹/۶۰ و ۴/۶۰ مترمربع است. برای تعیین بهترین موقعیت درخت/درختان بعدی، کلیه مکان‌های ممکن قرار گرفته در تاج پوشش بهترین درخت/درختان فعلی حذف و سپس جستجوی برای یافتن بهترین مکان ممکن انجام می‌شود تا با ترکیب سایه درختان فعلی با سایه درخت بعدی،

بیشترین سایه بر نما، درب/پنجره‌ها و کمترین سایه بر بام ایجاد شود. لذا، برای جستجوی مکان ممکن درخت دوم، موقعیت K6، K10 و L8 از مجموعه مکان‌های ممکن برای درخت دوم حذف شده و با اجرای الگوریتم موقعیت K8 و H11 به‌عنوان بهینه‌ترین پوشش سایه برای دو درخت می‌باشد. مکان H11 نیز در فاصله ۲ متری از ساختمان و در حد فاصل دو پنجره در ضلع شرقی ساختمان قرار دارد. میزان سایه ایجاد شده توسط این دو درخت از ساعت ۹ الی ۱۵ در چهار روز مورد بررسی در پژوهش، بر روی نما، درب/پنجره‌ها و بام به ترتیب ۲۶/۸۴، ۱۲/۸۰ و ۷/۵۹ مترمربع است.

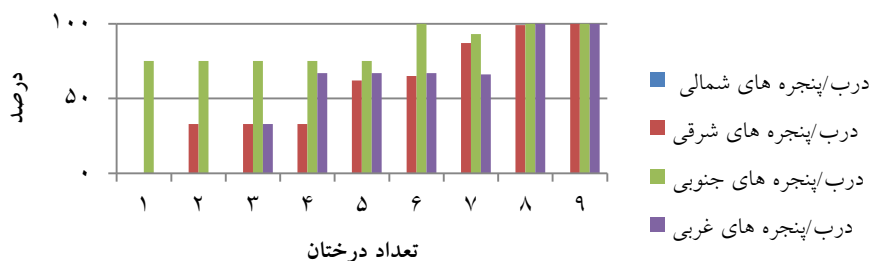
جدول ۳- موقعیت درختان و میزان سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان

تعداد درخت	موقعیت درخت	سایه بر نما	سایه بر درب/پنجره‌ها	سایه بر بام	مقدار تابع هدف
۱	K8	۱۵/۰۸	۹/۶۰	۴/۶۰	۱۲/۲۹
۲	K8, H11	۲۶/۸۴	۱۲/۸۰	۷/۵۹	۱۸/۹۴
۳	K8, H11, H3	۴۲/۴۸	۱۶/۰۰	۱۰/۵۱	۲۷/۱۴
۴	K8, H11, F3, J3	۴۹/۴۹	۱۹/۲۰	۱۹/۶۴	۳۱/۲۷
۵	K8, F11, J12, F3, J3	۵۱/۰۳	۲۱/۹۳	۱۴/۶۶	۳۴/۳۰
۶	K6, K10, F11, J12, F2, J2	۵۶/۹۳	۲۵/۴۱	۱۷/۷۴	۳۸/۷۸
۷	K4, K10, F12, H11, J12, F2, J2	۶۱/۹۱	۲۶/۶۰	۹/۹۳	۴۲/۳۹
۸	K4, K8, F12, H12, J11, F3, H2, J2	۷۳/۰۸	۳۱/۸۶	۲۲/۰۹	۴۹/۳۲
۹	K6, J10, K10, F11, H12, J12, F3, H2, J3	۷۴/۸۴	۳۲/۰۰	۳۶/۸۸	۴۸/۶۵

با استفاده از الگوریتم مذکور، موقعیت ۱ تا ۹ درخت برای هدف یافتن بهینه‌ترین پوشش سایه مشخص شده است. جدول ۳، موقعیت‌های درختان و میزان سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان را نشان می‌دهد. شکل ۷ و ۸ به ترتیب میزان درصد سایه درختان را بر نما و درب/پنجره‌های شمالی، شرقی، جنوبی و غربی، با توجه به موقعیت‌های بهینه یافته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- درصد سایه ایجاد شده بر نماهای شمالی، شرقی، جنوبی و غربی

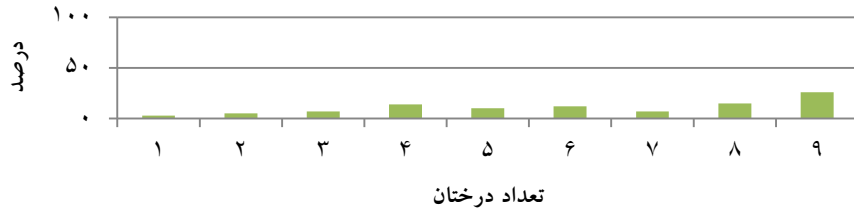


شکل ۸- درصد سایه ایجاد شده بر درب/پنجره‌های شمالی، شرقی، جنوبی و غربی

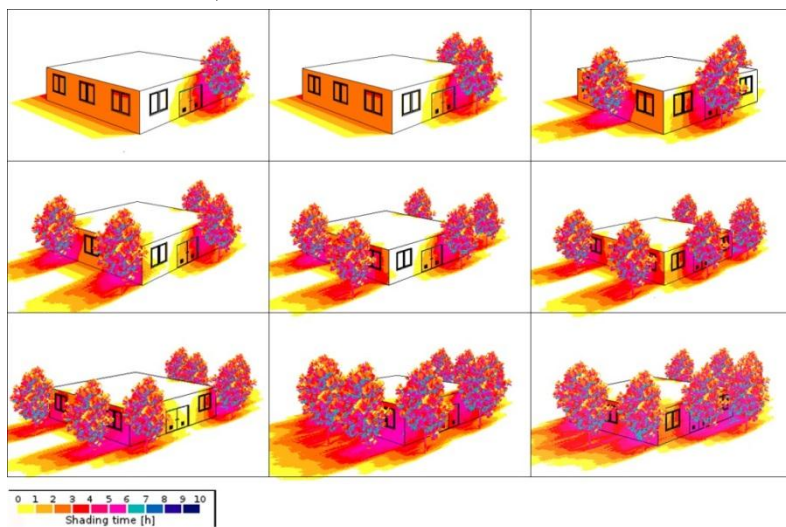
شکل ۹ نیز میزان درصد سایه درختان بر بام، با توجه به موقعیت‌های بهینه یافته شده را نشان می‌دهد. برای نمایش موقعیت قرارگیری درختان نسبت به ساختمان در منطقه مورد مطالعه و تلفیق سایه‌های ایجاد شده در فاصله زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از ساعت ۹ تا ۱۵، از نرم‌افزار اسکچ‌آپ^۱ و افزونه تحلیل سایه^۲ استفاده شده است. شکل ۱۰ نمایش سه‌بعدی از ساختمان نمونه مورد بررسی و موقعیت بهینه ۱ تا ۹ درخت و ترکیب سایه‌های ایجاد شده بر اجزای ساختمان را نشان می‌دهد. شکل ۱۱، درصد سایه ایجاد شده بر کل نما، درب و پنجره‌ها و بام ساختمان را برای ۱ تا ۹ درخت نشان می‌دهد.

¹ Sketchup

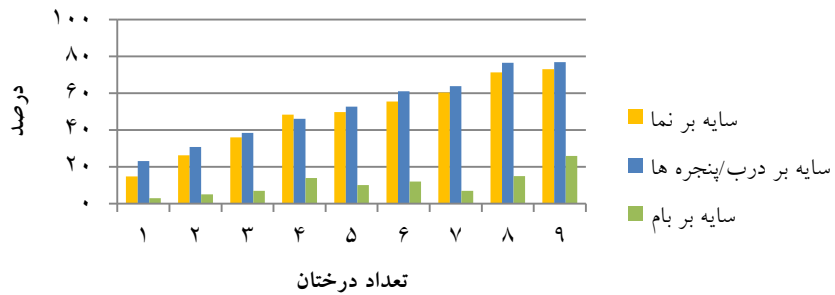
² Shadow Analysis plugin



شکل ۹- درصد سایه ایجاد شده بر بام



شکل ۱۰- نمایش سه‌بعدی از ساختمان مورد بررسی و موقعیت بهینه درختان در حالت ۱ تا ۹ درخت



شکل ۱۱- درصد سایه ایجاد شده بر کل نما، درب و پنجره‌ها و بام ساختمان برای ۱ تا ۹ درخت

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پوشش سایه درختان، یعنی بیشینه نمودن پوشش سایه بر سطح نما، درب و پنجره‌ها و کمینه نمودن پوشش سایه بر سطح بام، یک مسئله‌ی غیرقطعی سخت بوده و راه‌حل دقیق و قطعی ندارد. برای این منظور، می‌توان از روش فرا-ابتکاری ACO برای حل مسئله استفاده نمود. نتایج حاصل از روش ACO نشان می‌دهد که برای ساختمانی، در یک منطقه در نیمکره شمالی، درختان در شمال ساختمان تاثیری در ایجاد سایه بر اجزای ساختمان ندارند. با توجه به این‌که، در مناطق خشک و گرمسیری محدودیت در کاشت درختان وجود دارد، یافتن موقعیت مناسب برای درختان نقش به‌سزایی در بهینه‌سازی پوشش سایه بر اجزای ساختمان دارد. با توجه به میزان انتقال گرمایی بالا از طریق درب و پنجره‌ها نسبت به نما و بام و وزن بیشتر در نظر گرفته شده برای این اجزا در تابع هدف، یافتن موقعیت‌های بهینه درختان بستگی زیادی به موقعیت درب و پنجره‌ها در ساختمان دارد؛ تا بیشترین سایه را بر این اجزا ایجاد نمایند. برای ساختمانی با ابعاد و موقعیت درب و پنجره‌های مفروض در پژوهش، کاشت یک درخت در موقعیت K8 بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌نماید. این موضوع با نتیجه حاصل از پژوهش ژائو و همکاران (۲۰۱۷)، مطابقت دارد. این درخت به طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز مورد بررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۱۴/۷۳، ۲۳/۰۸ و ۳ درصد سایه ایجاد می‌کند. با توجه به هدف بهینه‌سازی سایه بر ساختمان و وزن بیشتر درب و پنجره‌ها، روش ACO موقعیت درختان را به گونه‌ای بهینه‌یابی می‌کند که سطح بیشتری از درب و پنجره‌ها در معرض سایه قرار بگیرد. لذا، در مسئله یافتن دو موقعیت بهینه، موقعیت K8 و موقعیت H11 برگزیده می‌شود. هر چند ترتیب انتخاب درختان اهمیت ندارد؛ اما، با توجه به این‌که، بخشی از نما و درب و پنجره‌ها در سایه درخت موقعیت K8 قرار می‌گیرد، انتخاب موقعیت H11 در شرق ساختمان برای ایجاد پوشش سایه در نمای شرقی، بدون این‌که، همپوشانی با سایه‌های ایجاد شده در جنوب ساختمان داشته باشد، منطقی به نظر

می‌رسد. به طوری که، این دو درخت به طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز مورد بررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۲۶/۲۱، ۳۰/۷۷ و ۵ درصد سایه ایجاد می‌کنند. با همین استدلال، در مسئله یافتن ۳ موقعیت بهینه، موقعیت H8، H11 و H3 برگزیده می‌شود. انتخاب درخت سوم در غرب ساختمان نیز با توجه به ایجاد حداکثر سایه و عدم همپوشانی با سایه‌های قبلی کاملاً منطقی است. به طوری که، این ۳ درخت به طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز مورد بررسی، بر روی نما، درب/پنجره‌های غربی و بام به ترتیب ۳۶/۰۴، ۳۸/۴۶ و ۷ درصد سایه ایجاد می‌کند. این موضوع نیز با نتایج هوانگ و همکاران (۱۹۸۷)، اکبری و طاها (۱۹۹۲)، سیمپسون و مک‌پرسون (۱۹۹۶)، وانگ و همکاران (۲۰۱۵) و کالسرانو و مارتینلی (۲۰۱۶)، مطابقت دارد. بنابراین، موقعیت‌هایی با فواصل ۲ متری از ساختمان و حد واسط درب و پنجره‌ها به ترتیب در جنوب، شرق و غرب ساختمان در الویت کاشت درختان قرار دارد. روش ACO موقعیت‌های بهینه تعداد بیشتری درختان را نیز با هدف بهینه‌سازی پوشش سایه بر ساختمان پیشنهاد می‌نماید.

در این پژوهش، علاوه بر مشخص نمودن پوشش سایه‌ی درختان، مدلی برای بهینه‌سازی مکانی سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت که مکان‌های بهینه درختان برای پوشش سایه بر ساختمان‌های شهری را پیش‌بینی می‌نماید. برای این کار مدل‌سازی سه‌بعدی همراه با تکنیک‌های پردازش مکانی GIS به منظور تعیین خصوصیات هندسی سه‌بعدی ساختمان‌هایی به کار گرفته شده است که هدف آن، بهینه نمودن پوشش سایه‌ی درختان بر آن ساختمان می‌باشد. برای تهیه مدل ریاضی جهت تعیین موقعیت بهینه درخت/درختان به نحوی که پوشش سایه‌ی آن بر ساختمان بهینه باشد، از روش ACO استفاده شد. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که حالت بهینه پوشش سایه درخت/درختان بر روی ساختمان، که بیشترین سایه را بر روی نما و درب و پنجره‌ها و کمترین سایه را بر روی بام ایجاد نماید، بستگی زیادی به تعداد درختان و موقعیت درب و پنجره‌ها در نمای ساختمان دارد. به طور کلی، با افزایش تعداد درختان، میزان

سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان افزایش می‌یابد. این پژوهش، اولین پژوهش برای تعیین مکان دقیق و تعداد درختان لازم به منظور بهینه‌نمودن پوشش سایه بر یک ساختمان مسکونی در ایران است و پژوهش‌های آتی می‌تواند موجب توسعه و بهبود آن گردد. از جمله، می‌توان محدوده مورد مطالعه را از یک ساختمان مسکونی به یک بلوک از ساختمان‌های مجاور گسترش داد و از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS استفاده کرد. همچنین، می‌توان سایر عوامل موثر در مکان‌یابی درختان، همچون کنترل آلودگی صدا و هوا، جهت‌دهی به مسیر حرکت باد، کنترل دید و بحث‌های زیبایی‌شناسانه و... را در پژوهش‌های آتی مورد تحقیق و بررسی قرار داد.

منابع

- Akbari, H., & Taha, H. (1992). The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*, vol. 17, pp. 141–149.
- Calcerano, F., & Martinelli, L. (2016). Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. *Energy and Buildings*, vol. 112, pp. 234–243.
- Church, R., & Revelle, C. (1972). The Maximal Covering Location Problem. *Papers of the Regional Science Association*, vol. 6, no. 6.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 53–66.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Ellabib, I., Calamai, P., & Basir, O. (2007). Exchange strategies for multiple Ant Colony System. *Information Sciences*, vol. 177, pp. 1248–1264.
- Fogl, M. (2016). Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography journal*, vol. 66, pp. 73–80.
- Gartland, L. (2008). *Urban heat island*. London: Earthscan.
- Gómez-Muñoz, V. M., Porta-Gándara, M. A., & Fernández, J. L. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning*, vol. 94, pp. 149–157.
- Heisler, G. M. (1986). Energy Savings With Trees. *Journal of Arboriculture*, vol. 12, pp. 113–125.

- Huang, Y. J., Akbari, H., Taha, H., & Rosenfeld, A. H. (1987). The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 26, pp. 1103–1116.
- Hwang, W. H., Wiseman, P. E., & Thomas, V. A. (2015). Tree planting configuration influences shade on residential structures in four U.S. cities. *Arboriculture and Urban Forestry*, vol. 41, pp. 208–222.
- Jadraque, E., Alegre, J., Martí, G., & Ordo, J. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2122–2130.
- Kim, H. H. (1992). Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 2319–2336.
- Levinson, R., Akbari, H., Pomerantz, M., & Gupta, S. (2009). Solar access of residential rooftops in four California cities. *Solar Energy*, vol. 83, no. 12, pp. 2120–2135.
- Li, Z., Zhang, Z., & Davey, K. (2015). Estimating Geographical PV Potential Using LiDAR Data for Buildings in Downtown San Francisco. *Transactions in GIS*, vol. 19, no. 6, pp. 930–963.
- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Maco, S. E., & Mulrean, E. (2004). *Desert Southwest Community Tree Guide: 'Benefits, Costs, and Strategic Planting*. Arizona: Arizona State Land Department Natural Resources Division, Urban & Community Forestry Section & Arizona Community Tree Council, Inc.
- Meteorological Administration, Semnan Province (2020). Meteorological Administration, Semnan Province . Retrieved February 9, 2020, from <http://www.semnanweather.ir> (in Farsi.)
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, pp. 1–24.
- Safarzadeh, H., & Bahadori, M. N. (2005). Passive cooling effects of courtyards. *Building and Environment*, vol. 40, pp. 89–104.
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 100–113.
- Sawka, M., Millward, A. A., McKay, J., & Sarkovich, M. (2013). Growing summer energy conservation through residential tree planting. *Landscape and Urban Planning*, vol. 113, pp. 1–9.
- Shad, R., Shad, A., Mesgari, S., Aghamohammadi, H., & Molaei, D. (2009). Fuzzy topological simulation for deducing in GIS. *Applied Geomatics*, vol. 1, pp. 121–129.
- Shaviv, E., & Yezioro, A. (1997). Analyzing mutual shading among buildings. *Solar Energy*, vol. 59, pp. 83–88.

- Simpson J. R., & McPherson, E. G. (1996). Potential of tree shade for reducing residential energy use in California. *Journal of Arboriculture*, vol. 22, pp. 10–18.
- Tooke, T. R., Coops, N. C., Voogt, J. A., & Meitner, M. J. (2011). Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, vol. 102, pp. 73–81.
- Wagar, J. A. (1984). Using Vegetation to Control Sunlight and Shade on Windows. *Landscape journal*, vol. 3, pp. 24–35.
- Wentz, E. A., Rode, S., Li, X., Tellman, E. M., & Turner, B. L. (2016). Impact of Homeowner Association (HOA) landscaping guidelines on residential water use. *Water Resources Research*, vol. 52, pp. 3373–3386.
- Zhao, Q., Wentz, E. A. & Murray, A. T. (2017). Tree shade coverage optimization in an urban residential environment. *Building and Environment*, vol. 115, pp. 269–280.

**Tree shadow coverage optimization on buildings in tropics by
using GIS and ACO: A case study of Semnan**

Mohsen Ghods, PhD. Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Hossein Aghamohammadi Zanjirabad¹, Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Alireza Vafaiejad, Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Alireza Gharagouzlo, Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Saeed Behzadi, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering Shahid Rajaiee Teacher Training University, Tehran, Iran

Received: 04-08-2020

Accepted: 08-12-2020

Introduction: The UHI is the effect of the thermal properties of the constructions that results in higher temperatures in urban areas compared to the surrounding areas. The UHI intensifies heat waves during the summer and increases energy consumption. Well-known UHI reduction methods utilize increased vegetation such as shading surfaces through increased tree coverage on buildings. In this research, we focus on the strategic planning of shade trees, which has been shown to provide energy and long-term cost savings to enhance the environmental quality of the urban ecosystem. A simple method to create abundant shade involves planting as many trees as possible on all sides of the building. This approach, however, isn't practical because of the cost of trees as well as water restrictions in many water-regulated communities. Similarly, excessive shading reduces the possibility of holding exposed rooftops for placing electricity-generating solar panels. The goal of this research is to consider where to optimally and precisely locate shade trees around the building such that a) the shading of the facade, windows, and doors of the building is maximized but the rooftop shade is minimized, and b) spatial optimization is creatively used to find the best tree locations quantitatively in a 3-dimensional (3D) environment.

In this study, therefore, a 3D spatial optimization model is presented to identify optimal tree locations for residential structures by integrating the GIS with ACO methods to solve this problem as a mathematical model. The modeling is done on a residential building in Semnan City, where tree shade

¹ Corresponding Author Email: aghamohammadi@srbiau.ac.ir

coverage, water conservation, and solar energy potential are critical because of the hot and dry conditions.

Methodology: A 3D representation of a building is used with the height and dimensions of 3 m and 12×12 m² respectively. The building has three windows with a dimension of 1.6 × 2 m² on the north, east and, west facades and two windows and one door with a dimension of 2 × 3.2 m² on the south facade. To represent a 3D tree, a simple design of pine with a height of 6 m and a crown radius of 2 m is used. Then, the theory of Duffie and Beckman (2013) is used in GIS to store the positions of 3D objects and extract shade coverage. Also, the MCLP is defined according to Church and Murray (2009). The details of the optimization steps are as follows:

- a) Defining a set of possible tree positions based on the height, crown radius, surrounding area, and outlook of the building
- b) Using a method for locating the first tree in all the possible positions around the building in the hot hours of certain summer days, then calculating the maximum shading on the building based on the weight of building components
- c) Eliminating the possible positions within the tree crown to prevent their overlap
- d) Repeating steps 2 and 3 to locate the next trees in possible positions around the building block until the trees reach the required number for shading

There are three reasons for using ACO for 3D position optimization as follows:

- 1) The complexity of computing the shading on the building, especially using a highly-detailed 3D model for the tree and building
- 2) The lack of a particular method to solve the optimization problem considering the nonlinear constraints, including trigonometric functions
- 3) The constant space around the building block, making it possible to locate trees anywhere. Therefore, there are infinite combinations of multiple trees in the solution space.

Considering the infinite possible positions, a simplification step is required to limit the number of the available positions. So, the constant space is reduced to possible positions for locating N_i trees with two-meter spacing in the N-S and E-W directions. Further, the possible tree positions in front of the opening components are eliminated to make daylight available, have an outlook from the building, and commute through the doors. The minimum spacing of two meters between the trees and the building is set to prevent unnecessary shading on the rooftop.

Results and Discussion: A computer program is developed to maximize the shade coverage on the facade/opening and minimize it on the rooftop via ACO in Matlab. The results show that, for a building in the northern

hemisphere, the trees in the north of the building have no effect in shade coverage on the building. Finding the best location for trees depends a lot on the position of the opening in the building, because of the high heat transfer through the opening versus the facade and rooftop. Table 1 shows the percentage of shade coverage on building components from 9 to 15 o'clock in four sample summer days when one to three trees are planted in suitable places around the building.

Table 1. Percentage of the shadow created by tress on the building components

Number of trees	The best location	Percentage of shadow on facade	Percentage of shadow on opening	Percentage of shadow on rooftop
1	Location K8 on the south	14.73%	23.08%	3%
2	Location K8 on the south & H11 on the east	26.21%	30.77%	5%
3	Location K8 on the south, H11 on the east & H3 on the west	36.04%	38.46%	7%

Conclusion: In this study, in addition to the determination of the shade coverage of trees, a model is used for 3D spatial optimization to predict the optimal positions of trees for shade coverage on a 3D building. For this purpose, 3D modeling and GIS location processing have been done to determine the 3D geometric characteristics of the building, aiming to optimize the tree shadow on the building. The ACO algorithm is used to create the mathematical model to determine the optimal tree position and achieve optimal tree shading on the building. This study is one of the first attempts at determining the exact position and number of trees needed for optimal tree shading on a residential building in Iran.

Keywords: Tree shade optimization, Residential building, ACO, GIS.