



## استفاده از مدل ترکیبی سامانه اطلاعات جغرافیایی سه بعدی و الگوریتم کلونی مورچگان در بهینه سازی پوشش سایه درختان

مقاله پژوهشی

محسن قدس، حسین آقامحمدی زنجیرآباد، علیرضا وفایی نژاد، سعید بهزادی، علیرضا قراگوزلو

دریافت: ۲۰ دی ۱۳۹۹ / پذیرش: ۱۱ اسفند ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۱ مهر ۱۴۰۰

### چکیده

پیشینه و هدف یکی از روش های کاهش جذب تشعشعات خورشیدی و جلوگیری از ایجاد جزایر حرارتی شهری، افزایش سایه توسط پوشش گیاهی است. به خصوص ایجاد سایه بر ساختمان ها که موجب خنک شدن خانه ها، کاهش مصرف انرژی و هزینه ها، افزایش ارزش خانه ها، ایجاد جلوه بصری مناسب و حس خوبی و سرزندگی می شود. هرچند از نظر اقتصادی میزان صرفه جویی رخ داده در اثر سایه و خنک شدن هوا برای یک درخت در طول عمر آن در نواحی آب و هوایی مختلف، متفاوت بوده و

بستگی به نوع درخت، میزان سایه گستری آن در طول روز و در فصول مختلف سال دارد، اما اثر آن در صرفه جویی مصرف انرژی و هزینه ها قطعی است. موضوع تحقیق حاضر برنامه ریزی استراتژیک در خصوص افزایش پوشش سایه درختان در مناطق مسکونی شهری است. روشی ساده برای ایجاد سایه فراوان کاشت درختان متعدد در اطراف ساختمان ها است. اما این روش در بسیاری از مناطق که با مشکل کمبود آب مواجه اند، به دلیل هزینه های زیاد آن غیرعملی است. ضمن آنکه وجود سایه های اضافی بر سطح بام ساختمان، موجب کاهش قابلیت در معرض تابش پرتوی خورشید قرار گرفتن بر سطح بام ساختمان ها و کاهش پتانسیل استفاده از پانل های خورشیدی بر سطح بام برای تولید الکتریسیته خواهد شد. اما چالش اصلی دست یابی 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 سطح بام را فراهم آورد. موضوع مکان یابی موقعیت درختان باهدف بهینه سازی پوشش سایه، یعنی بیشینه نمودن پوشش سایه بر سطح نما، درب و پنجره و کمینه نمودن پوشش سایه بر سطح بام، یک مسئله غیرقطعی سخت است و راه حل دقیق و قطعی ندارد. لذا از سیستم اطلاعات جغرافیایی سه بعدی و الگوریتم کلونی مورچه ها برای این منظور استفاده شده است. در پژوهش های گذشته شده اغلب اثرات سایه پوشش درخت بر یک ساختمان منفرد مورد بررسی قرار گرفته است؛ درحالی که در این پژوهش به جای یک ساختمان منفرد یک بلوک ساختمانی، شامل

محسن قدس<sup>۱</sup>، حسین آقامحمدی رنجیرآباد<sup>۲</sup>، علیرضا وفایی نژاد<sup>۳</sup>، سعید بهزادی<sup>۴</sup>، علیرضا قراگوزلو<sup>۵</sup>

- 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، ایران
- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
- استادیار گروه حمل و نقل، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
- دانشیار گروه حمل و نقل، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: [aghamohammadi@srbiau.ac.ir](mailto:aghamohammadi@srbiau.ac.ir)  
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>

ممکن برای بررسی مسئله می‌گردد. جزئیات مراحل عبارت‌اند از:

- ۱) تعریف مجموعه مکان‌های ممکن برای درخت بر اساس ارتفاع، قطر تاج، محوطه پیرامونی و چشم‌انداز بیرونی بلوک ساختمانی.
- ۲) استفاده از روشی برای قرارگیری اولین درخت در تمام مکان‌های ممکن اطراف بلوک ساختمانی در طی ساعات گرم در روزهای مشخصی از فصل تابستان و محاسبه بیشترین پوشش سایه بر روی بلوک ساختمانی بر اساس وزن اجزا ساختمان. (۳) حذف مکان‌های ممکن قرارگرفته در تاج درخت به منظور جلوگیری از همپوشانی تاج درختان و (۴) تکرار مراحل ۲ و ۳ برای قرارگیری درختان بعدی در مکان‌های ممکن اطراف بلوک ساختمانی تا زمانی که تعداد درختان به تعداد درختان موردنظر برای ایجاد سایه برسد. با توجه به این‌که بی‌نهایت مکان ممکن، یک مرحله ساده‌سازی و محدود کردن تعداد مکان‌های ممکن ضروری است. برای این منظور، فضای پیوسته به مجموعه مکان ممکن برای قرارگیری Ni درخت بافاصله ۲ متری در راستای شمال-جنوب و شرق-غرب خلاصه‌شده است. ضمن آن‌که به منظور استفاده از روشی روز در ساختمان، امکان دید به بیرون از داخل ساختمان و امکان رفت‌وآمد از درب‌ها مکان‌های ممکن روبروی درب‌ها و پنجره‌ها حذف شده است. برای پرهیز از ایجاد سایه غیرضروری در بام، حداقل فاصله ۲ متر درختان تا ساختمان در نظر گرفته شد.

**نتایج و بحث** برای بهینه‌سازی پوشش سایه درختان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها از محیط متلب MATLAB استفاده شد. برای این منظور ابتدای مدل بلوک ساختمانی موردبررسی شامل طول، عرض، ارتفاع، در قالب ساختاری تعریف شده که دارای ماتریس‌های مجزایی برای نمای شمالی، شرقی، جنوبی و غربی بلوک ساختمانی است. برای تعریف بام بلوک ساختمانی نیز ماتریس دیگری استفاده شد. هر عنصر از ماتریس‌های مذکور معادل  $10 \times 10$  cm از سطح بلوک ساختمانی 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 گردید. مشخصات خورشید در منطقه مورد مطالعه، شامل آزیموت و ارتفاع خورشید در روزهای مورد مطالعه در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از ساعت ۹ تا ۱۵ مورد استفاده قرار گرفت. پس از قرارگیری درخت در هر یک از

چندین ساختمان متصل به یکدیگر، موردبررسی قرار می‌گیرد. زیرا در اکثر شهرهای ایران، ساختمان‌ها به هم چسبیده و تشکیل بلوک ساختمانی را می‌دهند. ضمن این‌که در بیشتر پژوهش‌های پیشین، اثر پوشش سایه حداکثر دو درخت بر روی ساختمان موردبررسی قرار گرفته است؛ در حالی‌که در این پژوهش اثر پوشش سایه ۱۵ اصله درخت را بر روی بلوک ساختمانی بررسی می‌نماییم. در هیچ‌یک پژوهش‌های انجام‌شده بهینه‌سازی پوشش سایه درختان بر سطح نمای ساختمان 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 روش فرا-ابتکاری ACO در مکان‌یابی استراتژیک تعداد مختلف درختان، باهدف بیشینه نمودن پوشش سایه درختان بر سطح نمای ساختمان‌ها و کمینه نمودن پوشش سایه درختان بر سطح بام استفاده می‌شود.

**مواد و روش‌ها** برای انجام تحلیل‌ها دو نوع داده موردنیاز است. یکی مشخصات بلوک ساختمانی، برای مثال: ابعاد، موقعیت و اندازه نما، بام، درب و پنجره‌ها و دیگری مشخصات درخت (ارتفاع و موقعیت). برای مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی پوشش سایه درختان از GIS سه‌بعدی و الگوریتم ACO استفاده شده است. GIS سه‌بعدی قابلیت ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل و ایجاد توپولوژی سه‌بعدی را فراهم نموده و ACO نیز برای خلاصه‌سازی شرایط دنیای واقعی در یک مسئله ریاضی استفاده شده است. برای ذخیره‌سازی اطلاعات مکانی و استخراج سطح پوشش، توپولوژی مکانی از GIS و قواعد مثلثاتی استفاده شده است. پس از ذخیره‌سازی موقعیت، ترکیب و اطلاعات توصیفی اشیاء دوبعدی و سه‌بعدی توسط داده‌های توپولوژیکی، برای استخراج موقعیت سایه، از نظر دایه و بکمن در ۲۰۱۳ استفاده شده است. سپس با توجه به نظر چرچ و ریوله مسئله مکان‌یابی پوشش حداکثری تعریف شده است. برای بهینه‌سازی مکانی سه‌بعدی به ۳ دلیل ذیل از روش ACO استفاده می‌شود. دلیل اول مبتنی بر استفاده از قواعد مثلثاتی پیچیده فوق‌الذکر در محاسبه پوشش سایه بر روی ساختمان‌های مختلف و بخصوص استفاده از مدل سه‌بعدی پیچیده و با جزئیات کامل برای درخت و بلوک ساختمانی است. دلیل دوم مبتنی بر عدم وجود روشی قطعی برای حل این مسئله بهینه‌سازی با توجه به قیود غیرخطی شامل توابع مثلثاتی و دلیل سوم مبتنی بر وجود فضای پیوسته اطراف بلوک ساختمانی است که در هر مکانی امکان قرارگیری درخت وجود دارد و لذا منجر به بی‌نهایت ترکیب از ترتیب چند درخت در فضای

دو درخت مدنظر باشد، بازم دو موقعیت از موقعیت‌های K10، K16، K22 یا K28 بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌نماید. این دو درخت به‌طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۱۳/۸۸، ۱۸/۶۴ و ۱/۶۹ درصد سایه ایجاد می‌کنند. در حالت سه درخت موقعیت‌های K8، K18 و K22، در حالت چهار درخت موقعیت‌های K14، K20، K26 و K32، در حالت پنج درخت موقعیت‌های K8، K14، K20، K26 و K32 بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌کنند. این موقعیت‌ها در فاصله ۲ متری جنوب ساختمان قرار دارند. در حالت سه درخت به‌طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۲۱/۰۷، ۲۸/۵۴ و ۲/۵۴ درصد، در حالت چهار درخت بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۲۴/۹۶، ۳۵/۳۶ و ۳/۳۹ درصد و در حالت پنج درخت بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۳۳/۲۶، ۴۴/۷۰ و ۳/۹۵ درصد، سایه ایجاد می‌شود. با کاشت پنج درخت بیش از ۸۸ درصد نمای جنوبی و بیش از ۹۰ درصد درب/پنجره‌های نمای جنوبی ساختمان تحت پوشش سایه قرار می‌گیرد. اما با توجه به هدف بهینه‌سازی سایه بر ساختمان و وزن بیشتر درب و پنجره‌ها، روش ACO موقعیت درختان را به‌گونه‌ای بهینه‌یابی کرده است که سطح بیشتری از درب و پنجره‌ها در معرض سایه قرار بگیرد. با توجه به این‌که در حالت پنج درخت، ۹۰ درصد نمای جنوبی در سایه درختان قرار گرفت، در حالت شش درخت علاوه بر نمای جنوبی، نماهای شرقی و غربی نیز برای کاشت درخت در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که موقعیت‌های K8، K14، K20 و K30 در فاصله دو متری نمای جنوبی و موقعیت H2 در فاصله ۲ متری نمای غربی و موقعیت H36 در فاصله ۲ متری نمای شرقی برگزیده شد. این درختان به‌طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر روی نما، درب/پنجره‌های و بام به ترتیب ۳۳/۹۵، ۴۲/۲۹ و ۳/۶۴ درصد سایه ایجاد می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، پوشش سایه درختان، GIS سه‌بعدی، روش فرا-ابتکاری ACO

مکان‌های ممکن و حرکت خورشید، سایه ایجادشده درختان بر هر نقطه از اجزای ساختمان، موجب تغییر مقدار عنصر ماتریس معادل آن نقطه از صفر به یک می‌گردد. مجموع مقادیر عناصر ماتریس، میزان سایه ایجادشده توسط درخت را بر هر یک از اجزای ساختمان را مشخص می‌کند. مجموع حاصل ضرب نقطه‌ای عناصر ماتریس درب و پنجره‌ها در عناصر ماتریس نما، مقدار سایه ایجادشده بر درب و پنجره‌ها را مشخص می‌کند. برای بهینه‌سازی پوشش سایه درختان بر سطح نما، درب/پنجره‌ها و کمینه‌سازی پوشش سایه بر سطح بام، تابع هدف تعریف و از الگوریتم ACO استفاده شده است. نتایج حاصل از روش ACO نشان می‌دهد حالت بهینه پوشش سایه درخت/درختان بر روی بلوک ساختمانی، 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 بلوک ساختمانی دارد. به‌طورکلی با افزایش تعداد درختان، میزان سایه ایجادشده بر اجزای بلوک ساختمانی افزایش می‌یابد.

**نتیجه‌گیری** نتایج حاصل روش ACO نشان داد که برای ساختمانی، در یک منطقه در نیمکره شمالی، درختان در شمال ساختمان تأثیری 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 بسزایی 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 گرفته‌شده 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 بلوک ساختمانی با تعداد و ابعاد ساختمان‌های مفروض در پژوهش و با توجه به ابعاد و موقعیت درب و پنجره‌ها، کاشت یک درخت در یکی از موقعیت‌های K10، K16، K22 یا K28 که هر یک در فاصله ۲ متری جنوب ساختمان و در حد وسط دو پنجره قرار دارد، بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌نماید. این درخت به‌طور میانگین از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۷/۴۸، ۹/۲۲ و ۰/۸۵ درصد سایه ایجاد می‌کند. در حالتی که کاشت

قرارگرفته‌اند (۲۳). دیوارهای سبز و نماهای سبز از زمان‌های دور به‌عنوان گیاهان بالارونده و گیاهان پیش‌رونده وجود داشته‌اند (۱). سایه درختان اطراف ساختمان‌ها در کاهش جذب پرتوهای نور خورشید توسط عوارض مختلف شهری بخصوص ساختمان‌ها نقش مؤثری دارند. مزایای درختان را می‌توان به دو اثر مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. اثر مستقیم آن، ایجاد سایه بر ساختمان‌ها و اثر غیرمستقیم آن، خنک‌کنندگی محیط است (۱۹). 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؛ لذا بیشینه نمودن پوشش سایه درختان عنصری مهم در ایجاد محیط شهری دوست‌دار محیط‌زیست و پایدار است (۳۲). هرچند از نظر اقتصادی میزان صرفه‌جویی رخ داده در اثر سایه و خنک شدن هوا برای یک درخت در طول عمر آن در نواحی آب‌وهوایی مختلف، متفاوت بوده و بستگی به نوع درخت، میزان سایه‌گستری آن در طول روز و در فصول مختلف سال دارد، اما اثر آن در صرفه‌جویی مصرف انرژی و هزینه‌ها قطعی است (۲۱). موضوع تحقیق حاضر برنامه‌ریزی استراتژیک در خصوص افزایش پوشش سایه درختان در مناطق مسکونی شهری است. قطعاً 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 (۳۱). ضمن آن‌که وجود سایه‌های اضافی بر سطح بام ساختمان، موجب کاهش قابلیت در معرض تابش پرتوی خورشید قرار گرفتن بر سطح بام ساختمان‌ها و کاهش پتانسیل استفاده از پانل‌های خورشیدی بر سطح بام برای تولید الکتریسیته خواهد شد (۱۱). اما 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 سطح بام را فراهم آورد. موضوع مکان‌یابی موقعیت درختان باهدف بهینه‌سازی پوشش سایه، یعنی بیشینه نمودن

امروزه در تمام نقاط و عرض‌های جغرافیایی مختلف، روند گرمایش زمین موضوعی جدی شده است. حتی در نواحی که قبلاً این روند، مسئله‌ای مهم تلقی نمی‌شد (۱۸). افزایش جذب تشعشعات خورشید، بر تعادل حرارتی شهرها اثر گذاشته و متناسب با آن حرارت محسوس (Sensible Heat) سطح ساختمان‌های شهری افزایش یافته، پوشش گیاهی شهر کمتر و تشعشعات مادون‌قرمز ساطع شده نیز بیشتر شده است (۲۰). این حرارت تجمع یافته و آزاد شده از محیط، منجر به افزایش دمای محیطی محدوده شهر در مقایسه با محیط پیرامونی شهر شده، که به‌عنوان جزیره حرارت شهری (Urban Heat Island) شناخته می‌شود (۱۷). مطالعاتی درباره مشخصات جزایر حرارتی در شهرهای متوسط و بزرگ مختلف جهان انجام شده که شدت جزیره حرارت شهری را ۸ تا ۱۰ درجه کلونین گزارش کرده است (۲۴). جزیره حرارت شهری در طول تابستان، مصرف انرژی سرمایش و تقاضا برای مصرف برق را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش غلظت آلاینده‌های مضر همانند ازن و گازهای دارای ترکیبات آلی فرار (Volatile Compound Organic) و نیز افزایش تولید گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود. ضمن آن‌که جزیره حرارت شهری در دوره گرما، آسایش دمایی بیرون و درون ساختمان‌ها را بدتر می‌کند، سلامت جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب افزایش شیوع بیماری و مرگ‌ومیر ناشی از گرما به‌خصوص در افراد سالمند، کودکان و گروه‌های آسیب‌پذیر می‌گردد (۴). برای به تعادل برگرداندن اثرات گرمایش شهری، راهکارهایی پیشنهاد شده‌اند که عمدتاً شامل دودسته می‌شوند؛ افزایش بازتاب تشعشعات (Solar Reflectance) و افزایش سایه‌ها و تبخیر و تعرق (Evapotranspiration) درختان و پوشش گیاهی. مطالعات متعددی برای بررسی اثر پارک‌های شهری در خنک نمودن نواحی پیرامونی آن و کاهش اثرات جزیره حرارت شهری انجام شده است (۲۸). استفاده از بام‌های سبز موجب کاهش مصرف انرژی در ساختمان و بهبود اقلیم خرد در فضاها شهری شده است که این ساختمان‌ها در آن

نیز تأثیر می‌گذارد. تعداد درختان نیز در پژوهش‌هایی مورد مطالعه قرار گرفته است. اما در اکثر مطالعات اثر میزان پوشش تک‌درخت مورد بررسی قرار گرفته است. هوانگ و همکاران (۱۴)، اکبری و طاهای (۲)، سیمپسون و مک‌پرسون (۲۷)، اوک و همکاران (۱۹)، کالسرانو و مارتینلی (۵) پوشش سایه ناشی از ارتفاع درختان، تعداد طبقات ساختمان و نیز تعداد درختان را مورد بررسی قرار داده‌اند. بازهم نتایج حاصل نشان می‌دهد که موقعیت مناسب برای درختان برای صرفه‌جویی در انرژی جهت شرق و غرب ساختمان‌ها است. در این مطالعات نیز پتانسیل استفاده از پانل‌های خورشیدی بر سطح بام در نظر گرفته نشده است. تحقیقات جادراک و همکاران (۱۶) نشان می‌دهد که سطح بام ساختمان‌های مسکونی مکان‌های مناسبی برای نصب پانل‌های خورشیدی فتوولتائیک جهت تولید الکتریسیته از تابش مستقیم خورشید است. ولی پوشش سایه درختان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر کارایی پانل‌های خورشیدی فتوولتائیک اثر می‌گذارد. صفارزاده و بهادری (۲۲) در خصوص موقعیت‌یابی درختان به‌منظور بهینه‌سازی پوشش سایه بر درب‌ها و پنجره‌ها نیز پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. آن‌ها بیان نمودند پنجره‌ها و درب‌ها عایق‌بندی حرارتی کمتری نسبت در مقایسه با نمای ساختمان دارند. لذا پوشش سایه بر پنجره‌ها و درب‌ها اهمیت بیشتری دارد. ژائو و همکاران (۳۲) نسخه ساده‌ای از بهینه‌سازی پوشش سایه برای یک ساختمان منفرد از هر طرف باز در شهر تمپه (Tempe) ایالت آریزونا انجام دادند. در این پژوهش، پوشش سایه برای ساختمانی سه‌بعدی و در یک محیط سه‌بعدی استخراج گردید. پژوهش ژائو نیز با توجه به پیچیدگی‌های مسئله، فقط مکان‌های بهینه برای دو درخت در اطراف یک ساختمان را بررسی کرده است. در پژوهش‌های انجام‌شده اغلب یک ساختمان منفرد مورد بررسی قرار گرفته است؛ درحالی‌که در این پژوهش به‌جای یک ساختمان منفرد یک بلوک ساختمانی، شامل چندین ساختمان متصل به یکدیگر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. زیرا در اکثر شهرهای ایران، ساختمان‌ها به هم چسبیده و تشکیل بلوک ساختمانی را

پوشش سایه بر سطح نما، درب و پنجره و کمینه نمودن پوشش سایه بر سطح بام، یک مسئله غیرقطعی سخت (Non-deterministic Polynomial hard) است و راه‌حل دقیق و قطعی ندارد. لذا از سامانه اطلاعات جغرافیایی سه‌بعدی (3D Geographical Information System) و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (Ant Colony Optimization) برای این منظور استفاده شده است. نتایج حاصل از پژوهش به مالکان ساختمان‌ها، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران محیط‌زیست شهری کمک خواهد کرد تا به‌صورت 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. مطالعه تن و همکاران (۲۹) نشان می‌دهد پوشش گیاهی تا ۱/۵ درجه کلونین، موجب کاهش دمای هوا و کم کردن اثر جزیره حرارت شهری شده است. ساوکا و همکاران (۲۵) نشان داد که سایه درختان بر ساختمان‌های مسکونی، موجب کاهش مصرف انرژی تا ۵۴٪ در برخی از مطالعات انجام شده است. انیلو و همکاران (۱۰) اثر سایه درختان بر دو ساختمان مشابه یکی با سایه درختان و دیگری بدون سایه درختان را بررسی کرده‌اند. تحقیقات سیمپسون و مک‌پرسون (۲۷) نشان می‌دهد که در ساختمان‌هایی که از هر طرف باز هستند، درختان کاشته شده در جهت شرق و غرب، بهینه‌ترین اثرات خنک‌کنندگی را ایجاد می‌نمایند. وانگ و همکاران اثرات سایه یک تک‌درخت را در یک ساختمان منفرد در طول فصل گرما و سرما در عرض‌های شمالی ارزیابی کرده‌اند (۱۵). آن‌ها نشان دادند وجود درخت در سمت غرب و شرق خانه، موجب صرفه‌جویی بیشتری در انرژی می‌شود. در این پژوهش بر استراتژی‌های موقعیت‌یابی درختان در چهار جهت جغرافیایی اصلی تأکید شده است؛ بدون در نظر گرفتن فاصله تا ساختمان. مسلماً زمانی که کاشت درخت در جهت 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

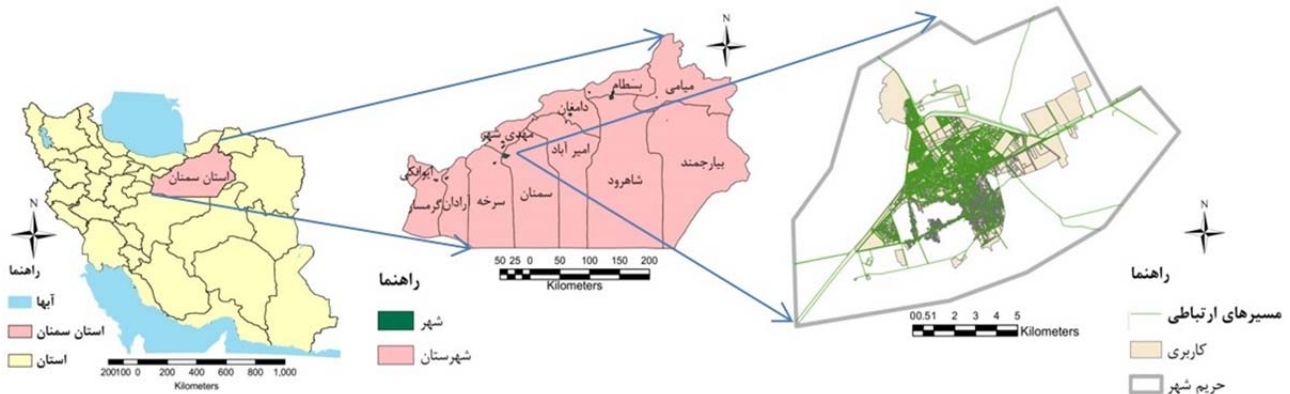
عرض جغرافیایی  $35^{\circ}35'00''$  شمالی انجام شده است. شهر سمنان در منطقه ای گرم و خشک در حاشیه جنوبی رشته کوه های البرز و در حاشیه شمالی دشت کویر ایران قرار دارد (شکل ۱). در تابستان دمای هوا در سمنان به بیش از ۴۲ درجه سانتی گراد می رسد (۳). لذا استفاده از استراتژی های کاهش دما از جمله سایه درختان در جهت کاهش مصرف انرژی ضروری است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل ساختمان های معمولی و مرسوم در شهر سمنان است که در آن ساختمان ها متراکم و از سمت شرق و غرب به یکدیگر چسبیده اند. این ساختار بلوک ساختمانی، امکان کاشت درختان را در جهت شرق و غرب نمی دهد؛ به جز ساختمان های انتهایی بلوک که مجاور خیابان ها، پارک ها و فضاهای سبز محلی اند و اغلب امکان کاشت درخت در شرق یا غرب ساختمان را فراهم می کنند. هرچند قاعده و نظم خاصی در درختکاری اطراف ساختمان ها وجود ندارد؛ اما در ۹۵ درصد ساختمان ها، درختانی در مجاورتشان دیده می شود (استخراج شده از تصاویر ماهواره ای)، که سطحی از پوشش سایه برای ساختمان ها ایجاد کرده اند.

می دهند. ضمن این که در بیشتر پژوهش های پیشین به دلیل پیچیدگی های محاسباتی و تعداد کثیر ترکیب های ممکن از ترتیب قرارگیری درختان در کنار یکدیگر، اثر پوشش سایه حداکثر دو درخت بر روی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است؛ در حالی که در این پژوهش اثر پوشش سایه ۱۵ درخت را بر روی بلوک ساختمانی بررسی می نمایم. در هیچ یک پژوهش های انجام شده بهینه سازی پوشش سایه درختان بر سطح نمای ساختمان از روش بهینه سازی فرا-ابتکاری و ترکیب آن با GIS استفاده نشده است. در این پژوهش با رویکردی ترکیبی از GIS در یک محیط سه بعدی و روش فرا-ابتکاری ACO در مکان یابی استراتژیک تعداد مختلف درختان، باهدف بیشینه نمودن پوشش سایه درختان بر سطح نمای ساختمان ها و کمینه نمودن پوشش سایه درختان بر سطح بام استفاده می شود.

## روش تحقیق

### محدوده مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه ای مسکونی در شهر سمنان، استان سمنان، کشور ایران با طول جغرافیایی  $53^{\circ}23'00''$  شرقی و



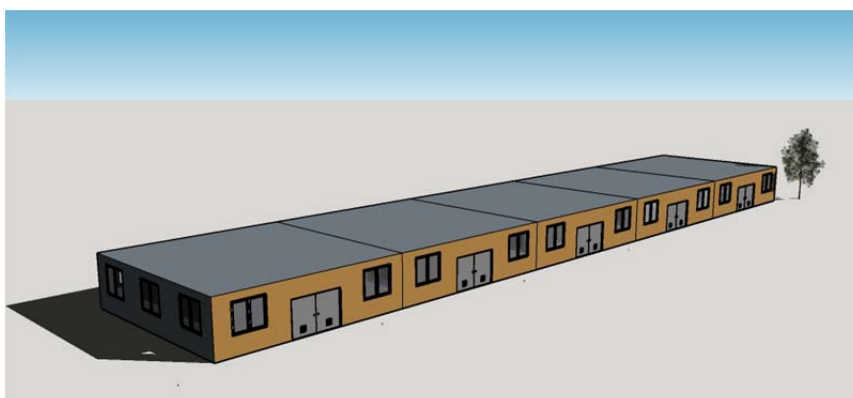
شکل ۱. موقعیت شهر سمنان

Fig. 1. Location of Semnan city

### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر بلوک ساختمانی که از هر سمت دارای فضای باز است، مورد استفاده قرار گرفته است. برای انجام تحلیل‌ها دو نوع داده مورد نیاز است. یکی مشخصات بلوک ساختمانی، برای مثال: ابعاد، موقعیت و اندازه نما، بام، درب و پنجره‌ها و دیگری مشخصات درخت (شامل ارتفاع و موقعیت). برای نمایش بلوک ساختمانی به صورت ۳ بعدی، طرحی ساده شده از پنج ساختمان یک طبقه هر یک با ابعاد  $12 \times 12$  متر با مساحت با ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده که از سمت شرق و غرب به یکدیگر چسبیده‌اند. بام بلوک ساختمانی تقریباً مسطح است. هر ساختمان دارای ۳ پنجره با ابعاد  $2 \times 1/6$  متر در نمای شمالی و دو پنجره با همین ابعاد و یک درب بیرونی با ابعاد  $2 \times 2$  متر در نمای جنوبی است. ساختمان منتهی‌الیه شرقی دارای ۳ پنجره با ابعاد  $2 \times 1/6$  متر در

نمای شرقی و ساختمان منتهی‌الیه غربی دارای ۳ پنجره با ابعاد  $2 \times 1/6$  متر در نمای غربی است. در این بلوک ساختمانی مساحت بام، نما، درب‌ها و پنجره‌ها به ترتیب ۷۲۰، ۴۳۲،  $131/2$  مترمربع است. برای نمایش درخت به صورت ۳ بعدی، طرحی ساده شده از درخت کاج با ارتفاع ۶ متر و شعاع تاج ۲ متر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ نمایش سه‌بعدی مدل بلوک ساختمانی و درخت مذکور را نشان می‌دهد. هرچند امکان انتخاب درختان دیگر با شکل، اندازه و گونه‌های مختلف وجود داشت که قطعاً بر میزان پوشش سایه بر ساختمان و بام آن تأثیر می‌گذاشت، اما گونه انتخاب شده، گونه مرسوم در شهر سمنان است. چالش اصلی شناسایی بهترین موقعیت برای یک یا چند درخت برای ایجاد پوشش سایه بهینه بر ساختمان است.



شکل ۲. نمایش سه‌بعدی مدل بلوک ساختمانی و درخت مورد استفاده در تحلیل

Fig. 2. 3D model of the building block and tree

### روش مدل‌سازی

برای مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی پوشش سایه درختان از GIS سه‌بعدی و الگوریتم ACO استفاده می‌کنیم. GIS سه‌بعدی قابلیت ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل و ایجاد توپولوژی سه‌بعدی را فراهم نموده و ACO نیز برای خلاصه‌سازی شرایط دنیای واقعی در یک مسئله ریاضی استفاده می‌شود.

### استفاده از GIS باهدف استخراج سطح پوشش

از آنجاکه ساختمان‌ها و درختان اجسام سه‌بعدی هستند و هدف از پژوهش بررسی سایه ایجاد شده بر روی سطح سه‌بعدی نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان‌ها است، استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی GIS به منظور تعیین خصوصیات سه‌بعدی ساختمان‌ها و درختان و برقراری ارتباط بین آن‌ها ضروری است. لذا برای ذخیره‌سازی اطلاعات مکانی و استخراج سطح پوشش، ارتباط و توپولوژی مکانی از GIS و قواعد مثلثاتی



در این رابطه؛  $h$  طول سایه در صفحه دوبعدی تحت  $\beta$  زاویه ارتفاعی خورشید است.

$$x' = x - \frac{z}{\tan \varepsilon} \quad y' = y - h \sin \gamma \quad [2]$$

که بر اساس  $\varepsilon$  زاویه تابش خورشید و  $\gamma$  زاویه آزیموتی، مختصات مسطحاتی انتهای سایه بر روی زمین را محاسبه می‌کند.

$$y'' = y - x \tan \gamma \quad z'' = \frac{x'z}{x' - x} \quad [3]$$

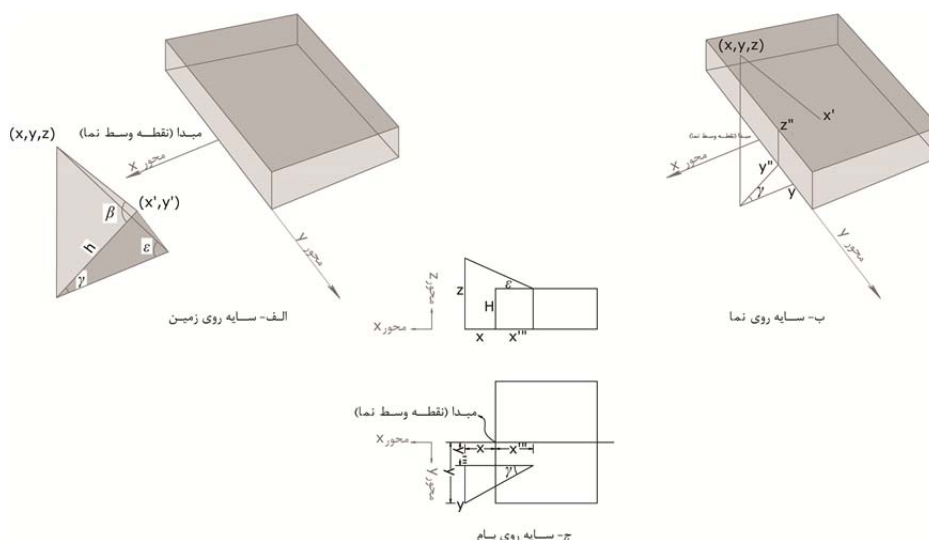
در این رابطه؛  $x'$  مختصات مسطحاتی انتهای سایه و  $\gamma$  زاویه آزیموتی،  $(x'', y'')$  مختصات ارتفاعی انتهای سایه بر روی سطح نمای ساختمان محاسبه می‌کند.

$$x''' = x - \frac{z-H}{\tan \varepsilon} \quad y''' = y - (x - x''') \tan \gamma \quad [4]$$

در این رابطه؛  $\varepsilon$  زاویه تابش خورشید و  $\gamma$  زاویه آزیموتی، مختصات مسطحاتی انتهای سایه بر روی سطح بام ساختمان با ارتفاع  $H$  را محاسبه می‌کند.

استفاده شده است. پس از ذخیره‌سازی موقعیت، ترکیب و اطلاعات توصیفی اشیاء دوبعدی و سه بعدی توسط داده‌های توپولوژیکی، برای استخراج موقعیت سایه، از طول و عرض جغرافیایی شهر سمنان برای محاسبه زاویه تابش و زاویه ارتفاعی خورشید در ساعات و روزهای مورد مطالعه استفاده شده است. این پارامترها بر اساس نظر دافیه و بکمن در رابطه‌های مثلثاتی ۱ تا ۴ استفاده شده است (۸). در این رابطه‌ها  $(x, y, z)$  نقطه‌ای از یک درخت،  $\varepsilon$  زاویه تابش خورشید،  $\gamma$  اختلاف بین آزیموت زاویه خورشید و آزیموت سطح،  $\beta$  زاویه ارتفاعی خورشید و  $H$  ارتفاع بام را نشان می‌دهد. شکل ۳ پارامترهای هندسی استخراج پوشش سایه یک شیء سه بعدی را یک شرایط مشخص نشان می‌دهد. شکل (۳-الف) زوایای خورشید و پوشش سایه بر روی زمین و نقطه انتهای پوشش سایه  $(x', y', 0)$ ، شکل (۳-ب) پوشش سایه بر سطح نما و نقطه انتهای پوشش سایه  $(0, y'', z'')$ ، و شکل (۳-ج) پوشش سایه بر سطح بام و نقطه انتهای سایه  $(x''', y''', H)$  را نشان می‌دهد.

$$h = \frac{z}{\tan \beta} \quad [1]$$



شکل ۳. تصویر سایه از نقطه  $(x, y, z)$  بر روی یک شیء سه بعدی (۱۲)

Fig. 3. The projection of the shading from point  $(x, y, z)$  on a 3D object (12)



### استفاده از بهینه‌سازی مکانی باهدف جانمایی درخت

با توجه به مسئله مکان‌یابی پوشش حداکثری (Maximal Covering Location Problem) مطرح شده توسط چرچ و ریوله شرایط زیر تعریف می‌شود (۶)؛  $i$  اندکسی برای هر یک از اجزا (برای مثال نما، درب، پنجره، بام) یک شی سه‌بعدی ساختمان،  $j$  اندکسی برای هر موقعیت ممکن برای وجود درخت،  $d$  اندکسی برای هرروز بیش‌ازحد گرم در سال،  $t$  اندکسی برای ساعات بیش‌ازحد گرم در روز  $d$ ،  $w_i$  وزن هر یک از اجزا  $i$ ،  $g_i$  مساحت هر یک از اجزا  $i$ ،  $p$  تعداد درختان موردنظر،  $f()$  تابع پوشش سایه مرتبط با ابعاد یک شی بر اساس رابطه‌های مثلثاتی  $1$  تا  $4$ ،  $S_{itd}$  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 عبارت‌اند از؛  $X_j$  برابر  $1$  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؛ هدف رابطه ۵ بیشینه نمودن پوشش سایه درخت بر اجزای مختلف شی (بام، نما، درب و پنجره) در یک بازه زمانی مشخص در روز مشخص از سال است که هر یک از اجزا  $i$  وزن از پیش تعریف شده  $w_i$  دارد. درواقع وزن  $w_i$ ، الویت و اهمیت اجزا مختلف ساختمان در تحت پوشش سایه قرار گرفتن نشان می‌دهد. به‌طورکلی لازم است درب و پنجره‌ها که اجزا بازشو هستند، بیشترین سایه را داشته باشند تا در مناطق گرمسیری انتقال گرما ناشی از تابش مستقیم خورشید را کاهش دهند. بعد آن نمای ساختمان در الویت دوم قرار دارد. بام ساختمان نیز کمترین الویت را دارد یا اصلاً باید بدون سایه باشد؛ چراکه اغلب بام ساختمان‌های مسکونی با مواد عایق حرارتی پوشانده می‌شود و بهترین مکان برای نصب پانل‌های خورشیدی و تولید الکتریسیته از انرژی خورشیدی است.

$$\text{Max } \sum_i w_i \sum_d \sum_t C_{itd} \quad [5]$$

از رابطه ۶ مقدار پوشش ایجادشده برای هر یک از اجزا  $i$  (بام، نما، درب و پنجره‌ها) بر اساس مکان درخت و زوایای خورشیدی در ساعات مشخص  $t$  از روز  $d$  تعیین گردید.

$$C_{itd} = f(g_i, S_{itd}, X_j, j \in N_i) \quad \forall i, t, d \quad [6]$$

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 بودن مقدار پوشش مشخص می‌کند.

$$\sum_j X_j = p \quad [7]$$

$$X_j = \{0,1\} \quad \forall j \quad [8]$$

$$C_{itd} > 0 \quad \forall i, t, d \quad [9]$$

### روش بهینه‌سازی و حل مسئله

برای بهینه‌سازی مکانی سه‌بعدی به دو دلیل ذیل از روش ACO استفاده می‌شود. دلیل اول مبتنی بر استفاده از قواعد مثلثاتی پیچیده فوق‌الذکر در محاسبه پوشش سایه بر روی ساختمان‌های مختلف و بخصوص استفاده از مدل سه‌بعدی پیچیده و با جزئیات کامل برای درخت و بلوک ساختمانی است. دلیل دوم مبتنی بر عدم وجود روشی قطعی برای حل این مسئله بهینه‌سازی با توجه به قیود غیرخطی شامل توابع مثلثاتی است. جزئیات مراحل عبارت‌اند از؛ تعریف مجموعه مکان‌های ممکن برای درخت بر اساس ارتفاع، قطر تاج، محوطه پیرامونی و چشم‌انداز بیرونی بلوک ساختمانی، استفاده از روشی برای قرارگیری اولین درخت در تمام مکان‌های ممکن اطراف بلوک ساختمانی در طی ساعات گرم در روزهای مشخصی از فصل تابستان و محاسبه بیشترین پوشش سایه بر روی بلوک ساختمانی  $C_{itd}$  بر اساس وزن اجزا ساختمان  $w_i$ ، حذف مکان‌های ممکن قرارگرفته در تاج درخت به‌منظور جلوگیری از همپوشانی تاج درختان، تکرار مراحل ۲ و ۳ برای قرارگیری درختان بعدی در مکان‌های ممکن اطراف بلوک

متری در راستای شمال-جنوب و شرق-غرب خلاصه شده است. ضمن آن که به منظور استفاده از روشنایی روز در ساختمان، امکان دید به بیرون از داخل ساختمان و امکان رفت و آمد از درب‌ها مکان‌های ممکن روبروی درب‌ها و پنجره‌ها حذف شده است. برای پرهیز از ایجاد سایه غیر ضروری در بام، حداقل فاصله ۲ متر درختان تا ساختمان در نظر گرفته شد. شکل ۴ مکان‌های ممکن اطراف بلوک ساختمانی را نشان می‌دهد.

ساختمانی تا زمانی که تعداد درختان به  $p$  تعداد درختان مورد نظر برای ایجاد سایه برسد.

#### ساده‌سازی پارامترهای مدل

با توجه به این که بی‌نهایت مکان ممکن، یک مرحله ساده‌سازی و محدود کردن تعداد مکان‌های ممکن ضروری است. از آنجا که شعاع تاج درختان ۲ متر است، به منظور عدم قرارگیری درختی در تاج درخت دیگر، حداقل فاصله درختان دو متر در نظر گرفته شده است. لذا فضای پیوسته به مجموعه مکان‌های ممکن برای قرارگیری  $N_i$  درخت با فاصله ۲



شکل ۴. مکان‌های ممکن اطراف بلوک ساختمانی

Fig. 4. Possible tree positions around the building block

الویت‌های بعدی هستند. علاوه بر این چون بام مکان مناسبی برای نصب پانل‌های خورشیدی باهدف تولید الکتریسیته است، ایجاد سایه بر روی بام را مناسب نیست. از این رو وزن بام با مقدار کوچک منفی مشخص شده است. برای اندازه‌گیری پوشش سایه بر اجزا مختلف ساختمان از پژوهش شایبو و یزیورو که در آن برای بیان نسبت مساحت سطح سایه به مساحت سطح کل از ضریب هندسی سایه استفاده شده است (۲۶). این پژوهش برای ۴ روز گرم سال شامل ۱۵ خرداد، ۱۵ تیر، ۱۵ مرداد و ۱۵ شهریور از ساعت ۹ الی ۱۵ برای فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای انجام شده است. از روش ACO برای حل

بنا به دلایل ذیل، 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 (۳۰). با توجه به پژوهش‌های گذشته میزان انتقال گرمایی خورشید از ۱ فوت مربع نما یا بام تقریباً معادل ۲ درصد گرمای انتقال داده شده از طریق پنجره است (۱۳). لذا با در نظر گرفتن انتقال گرمایی و تابش خورشیدی، ایجاد پوشش سایه بر روی درب و پنجره‌ها بالاترین الویت را دارد. بعد آن نما و بام به ترتیب در

مدل بهینه‌سازی شامل رابطه‌ها ۵ تا ۹ و با توجه به وزن مشخص هریک از اجزا درب/پنجره، نما استفاده شده است.

### الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO)

الگوریتم ACO 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 مسئله بهینه‌یابی است قرار می‌گیرد. هرچه 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 تولیدشده بهنگام می‌کند و به این وسیله بین مورچه‌ها ارتباط برقرار می‌شود. اطلاعات ابتکاری بر اساس 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 (۷). شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است؛ مقداردهی اولیه را انجام بده، تا هنگامی که شرایط خاتمه برقرار نشده، جواب‌های مورچه‌ها را بساز و به‌روزرسانی محلی فرومون‌ها را انجام بده، جستجوی محلی را انجام بده (اختیاری)، به‌روزرسانی سراسری فرومون‌ها را انجام بده، پایان. پارامترهای ACO عبارت‌اند از؛  $\tau_{ij}$  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 به‌وسیله مورچه  $k$  است.  $\eta_{ij}$  اطلاعات ابتکاری برای اندازه‌گیری میدان دید مورچه است.  $\alpha$  و  $\beta$  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.  $q$  یک پارامتر تصادفی است که به‌طور یکنواخت در  $[0,1]$  توزیع شده است.  $q_0$  یک پارامتر آستانه ثابت در  $[0,1]$  است که نسبت اهمیت استخراج به اکتشاف را تعیین می‌کند. موقعی که  $q$  کمتر یا مساوی  $q_0$  باشد، مورچه‌ها اکتشاف را به

کار می‌گیرند تا مکان  $j$  را به‌عنوان مکان بعدی انتخاب کنند؛ درحالی‌که اگر  $q$  بزرگ‌تر از  $q_0$  باشد، مورچه‌ها از استخراج بر پایه احتمال، برای انتخاب مکان بعدی استفاده می‌کند. در مرحله ساخت جواب، هر مورچه یک توالی شدنی را در  $n$  گام می‌سازد. در هر گام، مورچه  $k$  که در مکان  $i$  قرار دارد، با احتمال  $q_0$  مکان بعدی‌اش،  $j$  را طبق رابطه ۱۰ تعیین می‌شود.

$$j = \operatorname{argmax}_{i \in N_i^k} \{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta\} \quad [10]$$

همچنین با احتمال  $1 - q_0$  مکان بعدی‌اش را به صورت احتمالی طبق رابطه ۱۱ حساب گردید.

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in N_i^k} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad \text{if } j \in N^k \quad [11]$$

در این رابطه؛  $\eta_{ij}$  سایه ابتدایی درخت به‌عنوان مقدار ابتکاری و  $\beta$  میزان تأثیر این مقدار ابتکاری را نشان می‌دهد. همچنین  $N^k$  مجموعه مکان‌های کاندید مورچه  $k$  برای حرکت بعدی‌اش است. بعدازاینکه کار  $j$  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. به‌عبارت‌دیگر تا انتهای فرایند ساخت جواب، مورچه دیگر حق ندارد مکان  $j$  و مکان‌های مجاور آن را انتخاب کند. در طول فرایند ساخت جواب، به‌محض اینکه یک مورچه یک یال ( $i, j$ ) را طی کند، میزان فرومون روی آن یال نیز طبق رابطه ۱۲ به‌روز شد.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\tau_0 \quad [12]$$

در این رابطه؛  $\rho$  یک پارامتر بین صفر تا یک است. به این فرایند، به‌روزرسانی محلی فرومون‌ها می‌گویند. وقتی فرایند ساخت جواب برای تمام مورچه‌ها کامل شود و فرایند جستجوی محلی بر همه این جواب‌ها صورت گیرد، فرایند به‌روزرسانی سراسری فرومون‌ها صورت می‌پذیرد. در به‌روزرسانی سراسری فرومون‌ها، فقط میزان فرومون روی یال‌های بهترین جواب به‌دست‌آمده در هر تکرار، یعنی  $T^{bs}$ ، طبق رابطه ۱۳ به‌روز گردید.

غالب منطقه، شامل ارتفاع و شعاع تاج درخت نیز تعریف گردید. برای تعریف مشخصات خورشید در منطقه مورد مطالعه، شامل آزیموت و ارتفاع خورشید در روزهای مورد مطالعه در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از ساعت ۹ تا ۱۵، از رابطه‌های مثلثاتی ۱ تا ۴ استفاده شد. 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. مجموع مقادیر عناصر ماتریس، میزان سایه ایجاد شده توسط درخت را بر هریک از اجزای ساختمان را مشخص می‌کند. مجموع حاصل ضرب نقطه‌ای عناصر ماتریس درب و پنجره‌ها در عناصر ماتریس نما، مقدار سایه ایجاد شده بر درب و پنجره‌ها را مشخص می‌کند. برای بیشینه‌سازی 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 رابطه‌های ۵ تا ۹ در تعریف تابع هدف در الگوریتم ACO استفاده شده است.

نتایج حاصل از روش ACO نشان می‌دهد حالت بهینه پوشش سایه درخت/درختان بر روی بلوک ساختمانی، 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 بلوک ساختمانی دارد. به‌طور کلی با افزایش تعداد درختان، میزان سایه ایجاد شده بر اجزای بلوک ساختمانی افزایش می‌یابد. شکل ۵ موقعیت‌های بهینه را برای ۱ تا ۱۵ اصله درخت نشان می‌دهد.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs} \forall (i, j) \in T^{bs} \quad [13]$$

در این رابطه؛  $0 < \rho \leq 1$  نرخ تبخیر،  $C^{bs}$  و  $\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$  نیز مقدار  $T^{bs}$  است. البته همین عمل سبب تشویق مورچه‌های دیگر به تکرار این تور می‌شود (۹). الگوریتم ACO در صورتی خاتمه می‌یابد که تعداد تکرارهای الگوریتم به بیشترین مقدار خود برسد. این مقدار در تنظیم پارامترها تعیین می‌شود.

## نتایج

برای بهینه‌سازی پوشش سایه درختان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها از محیط MATLAB استفاده شد. برای این منظور پس از بررسی‌های لازم جهت همگرایی پاسخ‌ها، پارامترهای الگوریتم ACO تعداد مورچه‌ها برابر ۱۰ مورچه، تعداد تکرار ۱۰۰ دور، ضریب تبخیر فرامون برابر ۰/۱ و ضرایب کنترلی  $\alpha$  و  $\beta$  برابر ۱ تنظیم گردید. سپس مدل بلوک ساختمانی مورد بررسی شامل طول، عرض، ارتفاع، در قالب ساختاری (struct) تعریف شده که دارای ماتریس‌های مجزایی برای نمای شمالی، شرقی، جنوبی و غربی بلوک ساختمانی است. برای تعریف بام بلوک ساختمانی نیز ماتریس دیگری استفاده شد. هر عنصر از ماتریس‌های مذکور معادل  $10 \times 10$  سانتی‌متر از سطح بلوک ساختمانی 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



شکل ۵. مکان بهینه برای ۱ تا ۱۵ درخت باهدف بهینه‌سازی پوشش سایه بر ساختمان‌ها  
 Fig. 5. The best position of 1–15 trees for optimal shading on the buildings

سایه برنما، درب/ پنجره‌ها و کمترین سایه بر بام ایجاد شود. با اجرای چندین باره الگوریتم برای دو درخت، بازهم دو موقعیت از موقعیت‌های K10، K16، K22 و K28 به‌عنوان بهترین موقعیت معرفی گردید. میزان سایه ایجادشده توسط این دو درخت از ساعت ۹ الی ۱۵ در چهار روز موردبررسی در پژوهش، بر روی نما، درب/پنجره‌ها و بام به ترتیب ۱/۷۵، ۲۴/۶۶ و ۱۲/۱۹ مترمربع است. با اجرای الگوریتم برای ۳ درخت، موقعیت‌های K8، K18 و K28 به‌عنوان بهترین موقعیت معرفی گردید. هر یک از این موقعیت‌ها در فاصله ۲ متری از ساختمان قرار دارد. موقعیت K8 در حد وسط درب و پنجره ساختمان اول، موقعیت K18 در حد وسط درب و پنجره ساختمان سوم و موقعیت K28 در حد وسط دو پنجره ساختمان چهارم و پنجم قرار دارد. میزان سایه ایجادشده توسط این درختان از ساعت ۹ الی ۱۵ در چهار روز موردبررسی در

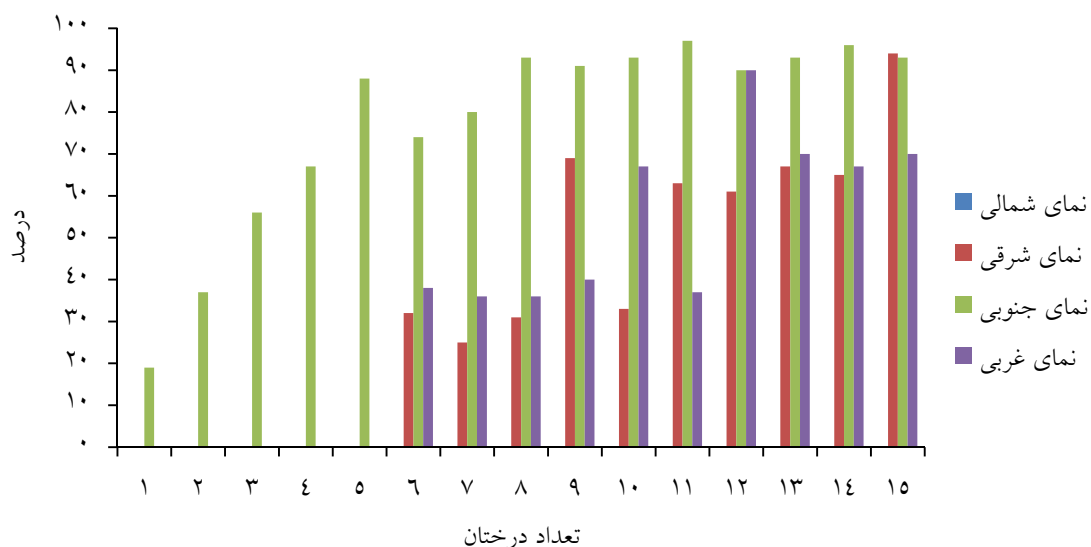
در الگوریتم طراحی‌شده لازم است در ابتدا تعداد درختان موردنیاز تعریف گردد. هنگامی که یک درخت موردنیاز باشد، با اجرای چندین باره الگوریتم، هر یک از موقعیت‌های K10، K16، K22 و K28 که در فاصله ۲ متری از ساختمان و در حد وسط بین دو پنجره ضلع جنوبی از دو ساختمان متوالی قرار دارند، به‌عنوان بهترین موقعیت معرفی گردید. درواقع، میزان سایه ایجادشده توسط یک درخت، در هر یک از موقعیت‌های مذکور، از ساعت ۹ الی ۱۵ در چهار روز موردبررسی در پژوهش، بر روی نما، درب/پنجره‌ها و بام، یکسان و به ترتیب ۲۲/۵۱، ۱۲/۱۰ و ۶/۰۹ مترمربع است. برای تعیین بهترین موقعیت درخت/درختان بعدی، کلیه مکان‌های ممکن قرارگرفته در تاج پوشش بهترین درخت/درختان فعلی حذف و سپس جستجو برای یافتن بهترین مکان ممکن انجام می‌شود تا با ترکیب سایه درختان فعلی با سایه درخت بعدی، بیشترین

پژوهش، بر روی نما، درب/پنجره‌ها و بام به ترتیب ۶۳/۳۸، مشخص شده است. جدول ۱ موقعیت‌های درختان و میزان سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان را نشان می‌دهد. سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان را نشان می‌دهد. موقعیت ۱ تا ۱۵ درخت با هدف یافتن بهینه‌ترین پوشش سایه

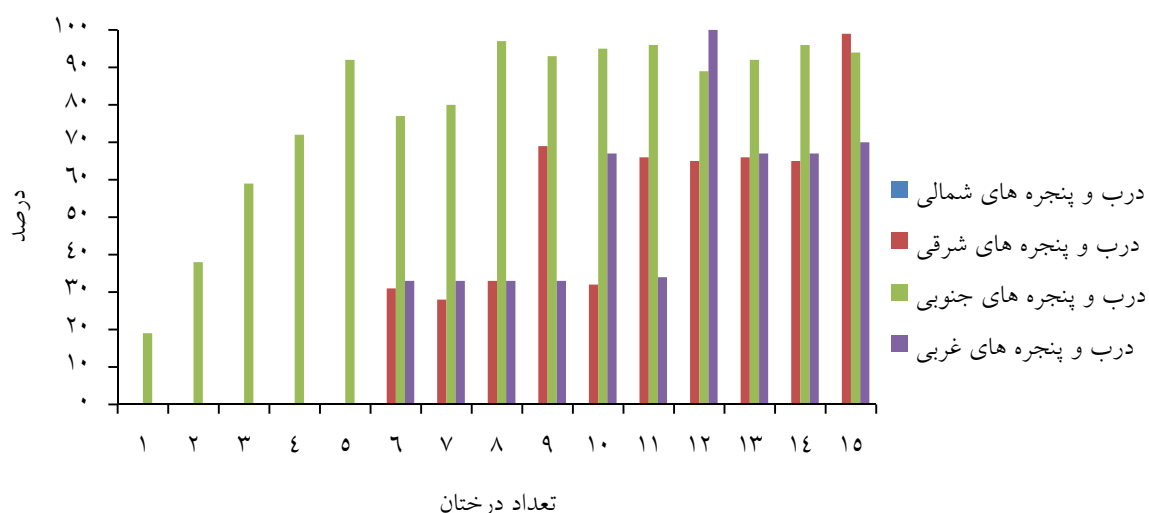
جدول ۱. موقعیت‌های درختان و میزان سایه ایجاد شده بر اجزای ساختمان  
Table 1. Tree positions and shading on building components

مقدار تابع هدف	سایه بر بام	سایه بر درب/ پنجره‌ها	سایه برنما	موقعیت درخت	تعداد درخت
۱۶/۸۷	۶/۰۹	۱۲/۱۰	۲۲/۵۱	K10 یا K16 یا K22 یا K28	۱
۳۲/۶۰	۱۲/۱۹	۲۴/۴۶	۴۱/۷۵	K16, K22	۲
۴۹/۷۴	۱۸/۳۰	۳۷/۴۵	۶۳/۳۸	K8, K18, K22	۳
۶۰/۰۷	۲۴/۳۸	۴۶/۳۹	۷۵/۰۸	K14, K20, K26, K32	۴
۷۸/۲۲	۲۸/۴۴	۵۸/۶۴	۱۰۰/۰۴	K8, K14, K20, K26, K32	۵
۷۷/۰۶	۲۶/۲۰	۵۵/۴۸	۱۰۲/۱۱	H36, K8, K14, K20, K30, H2	۶
۸۰/۲۸	۲۹/۴	۵۷/۳۷	۱۰۷/۶۵	J36, K8, K16, K22, K28, K30, H2	۷
۹۳/۷۱	۳۱/۶۵	۶۸/۱۸	۱۲۲/۸۸	J35, K6, K12, K14, K20, K26, K32, H2	۸
۹۷/۶۸	۴۲/۳۶	۶۹/۲۷	۱۳۳/۵۶	F35, J35, K6, K12, L14, K18, K22, K28, H3	۹
۹۸/۱۰	۴۳/۶۱	۷۰/۰۶	۱۳۳/۵۴	F36, K6, K12, K18, K24, K26, K32, M34, F3, H2	۱۰
۱۰۰/۸۰	۴۵/۵۹	۷۱/۰۲	۱۳۹/۱۲	H35, J35, K6, K8, K12, K14, K18, K24, K26, K32, H2	۱۱
۱۰۳/۱۵	۴۷/۷۳	۷۲/۶۲	۱۴۲/۷۳	F36, J36, L4, K6, K10, K16, K22, K26, K34, K32, H3, J3	۱۲
۱۰۳/۵۴	۴۳/۵۹	۷۲/۰۰	۱۴۳/۷۴	F35, J36, K6, K8, K14, K18, K26, M28, K32, K34, M34, F3, J2	۱۳
۱۰۶/۴۳	۴۲/۵۴	۷۴/۲۶	۱۴۶/۷۶	F36, H35, H37, J37, K4, K8, K14, M18, K20, K24, K30, L34, F2, J2	۱۴
۱۰۹/۱۷	۴۲/۶۳	۷۶/۲۱	۱۵۰/۲۱	F35, H36, J36, K6, L8, K12, L14, K18, K24, M30, K32, K34, M34, F3, J2	۱۵

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب میزان درصد سایه درختان را نشان می‌دهد. توجه به موقعیت‌های بهینه یافته شده، نشان می‌دهد. برنما و درب/پنجره‌های شمالی، شرقی، جنوبی و غربی، با



شکل ۶. درصد سایه ایجاد شده بر نماهای شمالی، شرقی، جنوبی و غربی  
 Fig. 6. Shading percentage on the north, east, south, and west facades

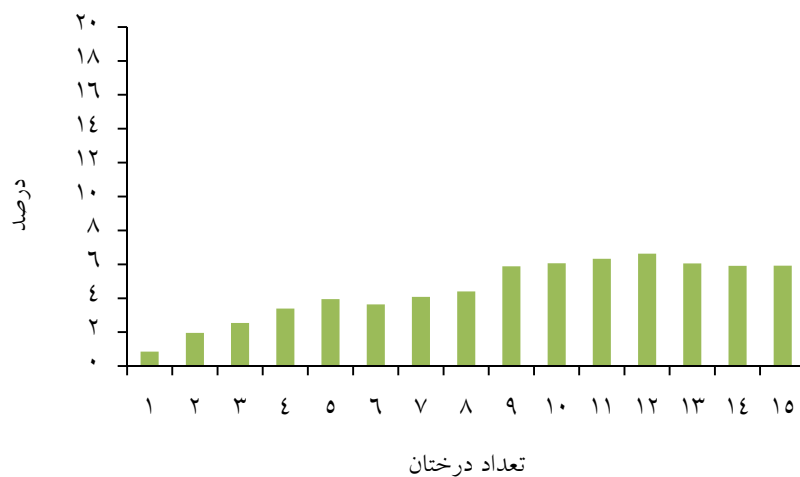


شکل ۷. درصد سایه ایجاد شده بر درب/پنجره های شمالی، شرقی، جنوبی و غربی  
 Fig. 7. Shading percentage on the north, east, south, and west opening components

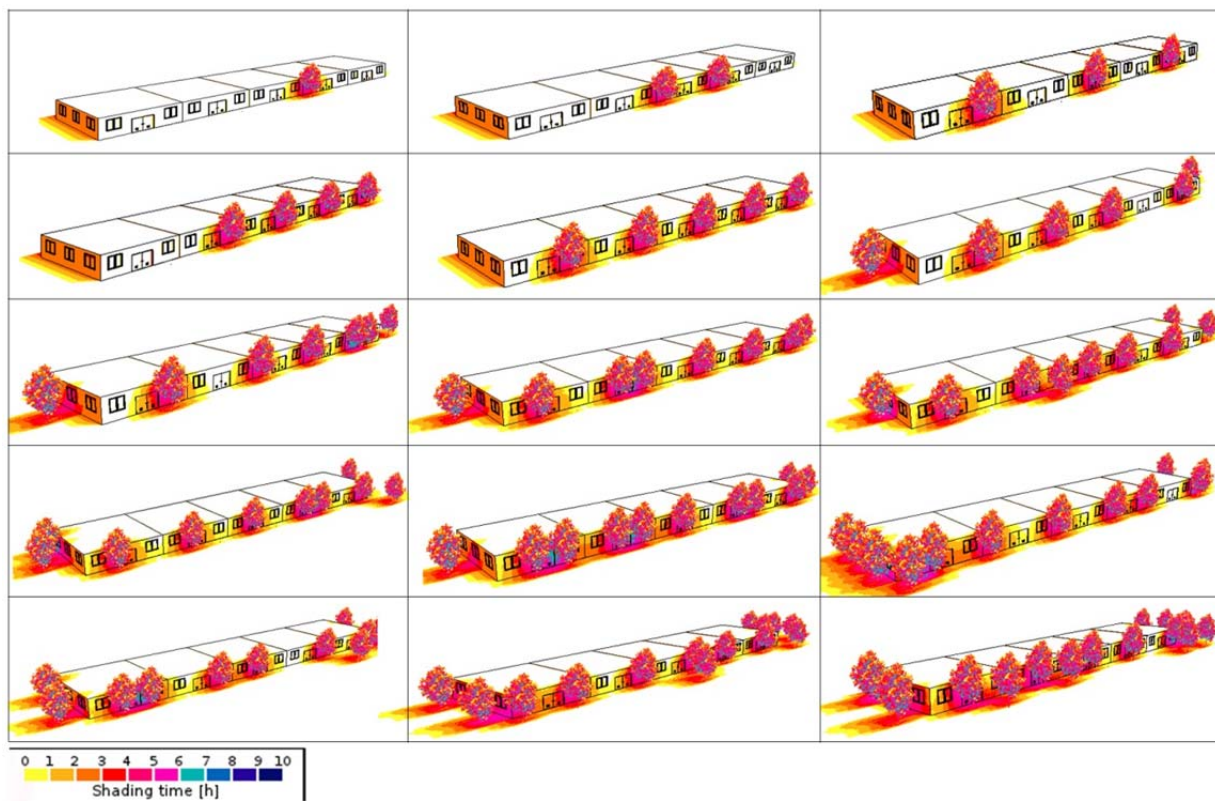
و افزونه تحلیل سایه (Shadow Analysis plugin) استفاده شده است. شکل ۹ نمایش سه بعدی از ساختمان نمونه مورد بررسی و موقعیت بهینه ۱ تا ۱۵ درخت و ترکیب سایه های ایجاد شده بر اجزای ساختمان را نشان می دهد.

شکل ۸ نیز میزان درصد سایه درختان را بر بام، با توجه به موقعیت های بهینه یافته شده، نشان می دهد. برای نمایش موقعیت قرارگیری درختان نسبت به بلوک ساختمانی در منطقه مورد مطالعه و تلفیق سایه های ایجاد شده در فاصله زمانی ۱۵ دقیقه ای از ساعت ۹ تا ۱۵، از نرم افزار اسکچاپ (Sketchup)





شکل ۸. درصد سایه ایجاد شده بر بام  
Fig. 8. Rooftop shading percentage



شکل ۹. نمایش سه بعدی از بلوک ساختمانی و موقعیت بهینه درختان در حالت ۱ تا ۱۵ درخت  
Fig. 9. The 3D representation of the building block and optimal tree positions for one to 15 trees

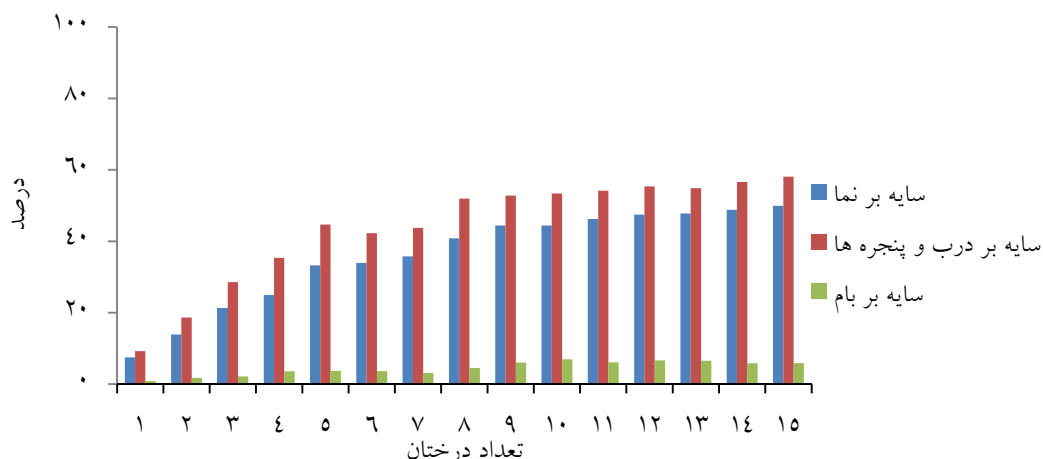
### بحث و نتیجه گیری

غیرقطعی سخت بوده و راه حل دقیق و قطعی ندارد. برای این منظور می توان از روش ACO برای حل مسئله استفاده نمود. نتایج حاصل روش ACO نشان داد که برای ساختمانی، در یک منطقه در نیمکره شمالی، درختان در شمال ساختمان تأثیری در

پژوهش حاضر نشان داد که بهینه سازی پوشش سایه درختان، یعنی بیشینه نمودن پوشش سایه بر سطح نما، درب و پنجره و کمینه نمودن پوشش سایه بر سطح بام، یک مسئله

۳۳/۲۶، ۴۴/۷۰ و ۳/۹۵ درصد، سایه ایجاد می‌شود. با کاشت پنج درخت بیش از ۸۸ درصد نمای جنوبی و بیش از ۹۲ درصد درب/پنجره‌های نمای جنوبی ساختمان تحت پوشش سایه قرار می‌گیرد. این موضوع با نتیجه حاصل از پژوهش ژائو و همکاران (۳۲) که الویت کاشت درخت را در نمای جنوبی می‌داند، مطابقت دارد. اما با توجه به هدف بهینه‌سازی سایه بر ساختمان و وزن بیشتر درب و پنجره‌ها، روش ACO موقعیت درختان را به‌گونه‌ای بهینه‌یابی کرده است که سطح بیشتری از درب و پنجره‌ها در معرض سایه قرار بگیرد. با توجه به این‌که در حالت پنج درخت، ۹۰ درصد نمای جنوبی در سایه درختان قرار گرفت، در حالت شش درخت علاوه بر نمای جنوبی، نماهای شرقی و غربی نیز برای کاشت درخت در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که موقعیت‌های K8، K14، K20 و K30 در فاصله دو متری نمای جنوبی و موقعیت H2 در فاصله ۲ متری نمای غربی و موقعیت H36 در فاصله ۲ متری نمای شرقی برگزیده شد. این درختان به‌صورت تجمعی از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر روی نما، درب/پنجره‌های و بام به ترتیب ۳۳/۹۵، ۴۲/۲۹ و ۳/۶۴ درصد سایه ایجاد می‌کند. این موضوع نیز با نتایج اکبری و طاها (۲)، کالسرانو و مارتینلی (۵)، هوانگ و همکاران (۱۴)، وانگ و همکاران (۱۵)، سیمپسون و مک‌پرسون (۲۷) مطابقت دارد. هرچند هدف از پژوهش کاشت تعداد معدودی درخت در مکان مناسب و بهره‌برداری حداکثری از سایه ایجادشده توسط آن است که با کاشت ۵ درخت در موقعیت‌های بهینه در سمت جنوب ساختمان‌ها و یا ۶ درخت در موقعیت‌های بهینه سمت جنوب، شرق و غرب ساختمان‌ها قابل تأمین است، ولی روش ACO موقعیت‌های بهینه تعداد بیشتری درختان را نیز باهدف بهینه‌سازی پوشش سایه بر ساختمان پیشنهاد می‌نماید که در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۱۰ درصد سایه ایجادشده بر کل نما، درب و پنجره‌ها و بام ساختمان را برای ۱ تا ۱۵ درخت نشان می‌دهد.

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 بسزایی 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 بلوک ساختمانی با تعداد و ابعاد ساختمان‌های مفروض در پژوهش و با توجه به ابعاد و موقعیت درب و پنجره‌ها، کاشت یک درخت در یکی از موقعیت‌های K10، K16، K22 یا K28 که هر یک در فاصله ۲ متری جنوب ساختمان و در حد وسط دو پنجره قرار دارد، بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌نماید. این درخت به‌صورت تجمعی از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۷/۴۸، ۹/۲۲ و ۰/۸۵ درصد سایه ایجاد می‌کند. در حالتی که کاشت دو درخت مدنظر باشد، بازهم دو موقعیت از موقعیت‌های K10، K16، K22 یا K28 بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌نماید. این دو درخت به‌صورت تجمعی از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۱۳/۸۸، ۱۸/۶۴ و ۱/۶۹ درصد سایه ایجاد می‌کنند. در حالت سه درخت موقعیت‌های K8، K18 و K22، در حالت چهار درخت موقعیت‌های K14، K20، K26 و K32، در حالت پنج درخت موقعیت‌های K8، K14، K20، K26 و K32 بهینه‌ترین سایه را ایجاد می‌کنند. این موقعیت‌ها در فاصله ۲ متری جنوب ساختمان قرار دارند. در حالت سه درخت به‌صورت تجمعی از ساعت ۹ تا ۱۵ در چهار روز موردبررسی، بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۲۱/۰۷، ۲۸/۵۴ و ۲/۵۴ درصد، در حالت چهار درخت بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب ۲۴/۹۶، ۳۵/۳۶ و ۳/۳۹ درصد و در حالت پنج درخت بر کل نما، درب/پنجره‌ها و بام ساختمان به ترتیب



شکل ۱۰. درصد سایه ایجادشده بر کل نما، درب و پنجره ها و بام ساختمان برای ۱ تا ۱۵ درخت

Fig. 10. Shading percentage for the whole facade, opening components, and rooftop for one to 15 trees

## References

1. Afshari A. 2017. A new model of urban cooling demand and heat island—application to vertical greenery systems (VGS). *Energy and Buildings*, 157: 204-217. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.008.
  2. Akbari H, Taha H. 1992. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*, 17(2): 141-149. doi:https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90063-6.
  3. Annual reports of meteorological administration. 2019. Semnan province. www.semnanweather.ir/index.php. (In Persian)
  4. Buchin O, Hoelscher M-T, Meier F, Nehls T, Ziegler F. 2016. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, 114: 27-37. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.038.
  5. 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*, 112: 234-243. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.023.
  6. Church R, ReVelle C. 1974. The maximal covering location problem. In: *Papers of the regional science association*, vol 1. Springer-Verlag, pp 101-118.
  7. Dorigo M, Gambardella LM. 1997. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1): 53-66. doi:https://doi.org/10.1109/4235.585892.
  8. Duffie JA, Beckman WA. 2013. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York.
- در این پژوهش علاوه بر مشخص نمودن پوشش سایه درختان، مدلی برای بهینه سازی مکانی سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت که موقعیت های بهینه درختان برای پوشش سایه بر ساختمان های سه بعدی شهری را پیش بینی می نماید. برای این کار مدل سازی سه بعدی همراه با تکنیک های پردازش مکانی GIS به منظور تعیین خصوصیات هندسی سه بعدی ساختمان هایی به کار گرفته شد که هدف آن بهینه نمودن پوشش سایه درختان بر یک بلوک ساختمانی بود. این مدل برای یک بلوک ساختمانی در محدوده شهری در شهر سمنان به کار گرفته شد. برای تهیه مدل ریاضی جهت تعیین موقعیت بهینه درخت/درختان به نحوی که پوشش سایه آن بر بلوک ساختمانی بهینه باشد، از روش ACO استفاده شد. این پژوهش اولین پژوهش برای تعیین مکان دقیق و تعداد درختان لازم به منظور بهینه نمودن پوشش سایه بر یک بلوک ساختمانی مسکونی در ایران است و پژوهش های آتی می تواند موجب توسعه و بهبود آن گردد. از جمله می توان با استفاده از سایر روش های فرا-ابتکاری، بهینه سازی پوشش سایه درختان را انجام داد و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود. برای کسب نتایج دقیق تر می توان راستای بلوک ساختمانی را منطبق بر راستای معابر شهری قرارداد تا مدل مورد بررسی با شرایط واقعی نزدیکی بیشتری پیدا کند.

- <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=qkaWBrOuAEgC&pgis=1>.
9. Ellabib I, Calamai P, Basir O. 2007. Exchange strategies for multiple ant colony system. *Information Sciences*, 177(5): 1248-1264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.09.016>.
  10. Eniolu TM, Dahanayake KKC, Adegun OB, Balogun AA. 2016. Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Buildings*, 130: 721-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.087>.
  11. Fogl M, Moudrý V. 2016. Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66: 73-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.011>.
  12. Gomez-Muñoz VM, Porta-Gándara M, Fernández J. 2010. Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning*, 94(3-4): 149-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.09.002>.
  13. Heisler GM. 1986. Energy savings with trees. *Journal of Arboriculture* 12 (5): 113-125, 12(5): 113-125.
  14. Huang Y, Akbari H, Taha H, Rosenfeld AH. 1987. The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 26(9): 1103-1116. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<1103:TPOVIR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<1103:TPOVIR>2.0.CO;2).
  15. Hwang WH, Wiseman PE, Thomas VA. 2015. Tree planting configuration influences shade on residential structures in four US cities. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(4): 208-222.
  16. Jadraque O, Jadraque E, Alegre J, Martínez G. 2010. Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7): 2122-2130. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.001>.
  17. Kim HH. 1992. Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 13(12): 2319-2336. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169208904271>.
  18. McPherson G, Simpson JR, Peper PJ, Maco SE, Xiao Q, Mulrean E. 2004. Desert southwest community tree guide: benefits, costs and strategic planting. Arizona Community Tree Council, Inc Phoenix, AZ <http://www.treeseearchfsfedus/pubs/47703>.
  19. Oke TR. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1-24.
  20. Pandit R, Laband DN. 2010. Energy savings from tree shade. *Ecological Economics*, 69(6): 1324-1329. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.01.009>.
  21. Roche LP, Yeom DJ, Ponce A. 2020. Passive cooling with a hybrid green roof for extreme climates. *Energy and Buildings*, 224: 110243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110243>.
  22. Safarzadeh H, Bahadori M. 2005. Passive cooling effects of courtyards. *Building and Environment*, 40(1): 89-104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.014>.
  23. Saiz S, Kennedy C, Bass B, Pressnail K. 2006. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environmental Science & Technology*, 40(13): 4312-4316. doi:<https://doi.org/10.1021/es0517522>.
  24. Santamouris M. 2007. Heat island research in Europe: the state of the art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1): 123-150. doi:<https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687272>.
  25. Sawka M, Millward AA, McKay J, Sarkovich M. 2013. Growing summer energy conservation through residential tree planting. *Landscape and Urban Planning*, 113: 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.01.006>.
  26. Shaviv E, Yezioro A. 1997. Analyzing mutual shading among buildings. *Solar Energy*, 59(1-3): 83-88. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00103-X).
  27. Simpson JR, McPherson EG. 1996. Potential of tree shade for reducing residential energy use in California. *Journal of Arboriculture* 22 (1): 10-18, 22(1): 10-18.
  28. Spronken-Smith R, Oke T. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International journal of remote sensing*, 19(11): 2085-2104. doi:<https://doi.org/10.1080/014311698214884>.
  29. Tan Z, Lau KK-L, Ng E. 2016. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114: 265-274. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.031>.
  30. Wagar JA. 1984. Using vegetation to control sunlight and shade on windows. *Landscape journal*, 3(1): 24-35. doi:<https://doi.org/10.3368/lj.3.1.24>.
  31. Wentz EA, Rode S, Li X, Tellman EM, Turner B. 2016. Impact of Homeowner Association (HOA) landscaping guidelines on residential water use. *Water Resources Research*, 52(5): 3373-3386. doi:<https://doi.org/10.1002/2015WR018238>.
  32. Zhao Q, Wentz EA, Murray AT. 2017. Tree shade coverage optimization in an urban residential environment. *Building and Environment*, 115: 269-280. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.036>.



## Using a hybrid model of 3D GIS and meta-heuristic methods for optimizing tree shade coverage

Mohsen Ghods, Hossein Aghamohammadi Zanjirabad, Alireza Vafaiejad, Saeed Behzadi, Alireza Gharagouzlo

Received: 9 January 2021 / Accepted: 1 March 2021  
Available online 23 September 2021

### Abstract

**Background and Objective** A method to reduce the absorption of solar radiation and prevent the creation of urban heat islands is to increase shade by vegetation. A shadow creating on buildings, causes houses to cool down, reduces energy consumption and costs, increases the value of houses, and creates a proper visual effect and a sense of well-being and vitality. Although economically, the amount of savings due to shade and cooling of the air for a tree during its lifetime in different climatic regions is different and depends on the type of tree, the amount of shade during the day and in different seasons of the year, but its effect on energy savings and costs are definite.

M. Ghods<sup>1</sup>, H. Aghamohammadi Zanjirabad<sup>(✉)</sup><sup>2</sup>,  
A. R. Vafaiejad<sup>3</sup>, S. Behzadi<sup>4</sup>, A. R. Gharagouzlo<sup>5</sup>

1. PhD Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
5. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

e-mail: [aghamohammadi@srbiau.ac.ir](mailto:aghamohammadi@srbiau.ac.ir)

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>

The subject of the present study is strategic planning to increase the shade coverage of trees in urban residential areas. A simple way to create plenty of shade is to plant numerous trees around buildings. However, this method is impractical in many areas that face water shortages due to its high costs. In addition, the presence of additional shadows on the rooftop of the buildings will reduce the ability to be exposed to sunlight and the potential of using solar panels to generate electricity. So the main challenge is using a method that can provide maximum shade coverage on the facade surface and minimum shadow coverage on the rooftop with a few trees in optimal locations. The issue of locating trees with the aim of optimizing shade coverage, i.e. maximizing shade coverage on facades and opening components, and minimizing shadow coverage on the rooftop, is a Non-deterministic Polynomial hard (NP-hard) problem and has no exact solution. Therefore, the 3D Geographic Information System and the Ant Colony Optimization algorithm have been used for this purpose. Previous studies have often examined the effects of tree canopy shade on a single building. But in most cities in Iran, buildings are connected together and form a building block. So, instead of a single building, a building block is examined. In addition, in most previous studies, the effect of shade coverage of a maximum of two trees on the building has been investigated; while in this study, we examine the effect of shade coverage of 15 trees on the building block. None of the studies on optimizing the shade of trees on the facade of the building has used the meta-heuristic optimization methods and its combination with GIS.

In this study, a hybrid model of GIS in a three-dimensional environment and ACO is used for maximizing the shade of trees on the facade and opening components of buildings, and minimizing the shade of trees on the rooftop.

**Materials and Methods** Two types of data are required to perform the analysis; The building block properties, for example, dimensions, position, and size of the facade, rooftop, and opening components, and the tree properties (height and position). 3D GIS and ACO algorithms have been used to model tree shade coverage optimization. 3D GIS provides abilities for storing, analyzing, and creating 3D topologies, and ACO is used to summarize real-world conditions in a mathematical problem. GIS and trigonometric rules have been used to store geographical information and spatial topology. After storing the position, composition, and description information of 2D and 3D objects by topological data, Duffie and Beckman relations (2013) is used to extract the position of the shadow. Then, according to Church and Revelle, the Maximal Covering Location Problem (MCLP) is defined. For the following 3 reasons, ACO has been used for three-dimensional optimization; 1) The complex trigonometric rules in calculating the shadow coverage on buildings, 2) There is no deterministic solution for optimization problems because of nonlinear constraints including trigonometric functions, 3) The existence of continuous space around the building block that It is possible to place a tree in any position. The details of the steps are; 1) Define the set of possible locations for the tree based on the height, diameter of the canopy, and around space of the building block, 2) Use a method to place the first tree in all possible places around the building block during hot hours on certain days of the summer and calculate the maximum shade coverage on the building block based on the weight of the building components, 3) Remove the places that may be done in the tree canopy to prevent overlapping of tree canopies, 4) Repeat steps 2 and 3 to place the next trees in the possible places around the building block until the number of trees reaches the desired number of trees to create shade. Considering the infinite possible positions, a simplification step is required to limit the number of available positions. Therefore, 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 comment 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** MATLAB environment is used to optimize the shade coverage of trees using the ACO algorithm. For this purpose, properties of the buildings block such as length, width, height, are

modeled in a struct in MATLAB. This struct has separate matrices for the north, east, south, and west views of the building block. Another matrix is also used to model the rooftop. Each element of the mentioned matrices is equal to  $10 \times 10$  cm from the surface of the building block and has a value of zero. To model the dimensions and location of doors and windows in each facade, another struct includes separate matrices for each facade is used. In these matrices, the amount of elements in the location of doors and windows is one. The characteristics of the sun in the study area are used, including azimuth and altitude of the sun on the studied days in 15-minute intervals from 9 to 15 hours. The shadow is created on building components, by placing the tree in any of the possible locations, and movement of the sun. The elements of the matrices equivalent to the shaded building components change from zero to one. The sum of the values of the matrix elements determines the amount of shadow created by the tree on each component of the building. The sum of the point multiplication of the door/window matrix elements in the facade matrix elements determines the amount of shadow created on the doors/windows. The objective function is defined and the ACO algorithm is used to maximize the shadow coverage of trees on the facade, doors/windows, and minimize the shadow coverage on the rooftop. The results of the ACO show that the optimal shade coverage on the buildings block, which creates the most shade on the facade and doors and windows and the least shade on the roof, depends on the number of trees and the position of the doors and windows in buildings block. In general, as the number of trees increases, the amount of shadow created on the building block components increases.

**Conclusion** The results of the ACO showed that for buildings, in the northern hemisphere, the trees in the north of the buildings have no effect on casting shadows on the components of the building. Due to the fact that in arid and tropical regions there are restrictions on planting trees, finding a suitable position for trees plays an important role in optimizing the shade coverage. Due to the high heat transfer through the doors and windows compared to the facade and rooftop, the higher weight is considered for these components in the objective function. Finding the optimal position of the trees depends a lot on the position of the doors and windows in the building to create the most shadow on these components. For a buildings block with the number and dimensions of buildings assumed in the research and according to the dimensions and position of doors and windows, planting a tree in one of the positions K10, K16, K22, or K28 creates the most optimal shade. These positions are 2 meters from south of the buildings and in the middle of two windows. On average, this tree provides 7.48, 9.22, and 0.85% shade respectively on the facade, doors /windows, and rooftop from 9 to 15 o'clock in four days studied. In the case of planting



two trees, two positions from positions K10, K16, K22, or K28 still provide the optimal shade. On average, these two trees provide 13.88%, 18.64%, and 1.69% of shade respectively on the whole facade, doors /windows, and rooftop at 9:00 AM to 3:00 PM. In the case of three trees, positions K8, K18, and K22, in the case of four trees, positions K14, K20, K26, and K32, in the case of five trees, positions K8, K14, K20, K26, and K32 create the optimal shadow. Shading coverage in the case of three trees, is 21.07, 28.54, and 2.54%, respectively on the facade, doors/windows, and rooftop, in the case of four trees, is 24.96, 35.36 and 3.39% respectively on the façade, doors/windows, and rooftop and in the case of five trees is 33.26, 44.70 and 3.95% respectively on the facade, doors/windows, and rooftop. By planting five trees, more than 88% of the south façade and more than 90% of the south façade doors/windows of the building will be covered with shade. However, due to the goal of optimizing the shadow on the building and

the greater weight of the doors and windows, the ACO has optimized the position of the trees in such a way that more surfaces of the doors and windows are exposed to the shadows. Due to the fact that in the case of five trees, 90% of the southern facade is in the shade of trees, in the case of six trees, in addition to the southern facade, the eastern and western facades are also considered for planting trees. So that the positions K8, K14, K20, and K30 are chosen in the distance of 2 meters from the south and the position of H2 is chosen in the distance of 2 meters from the west, and the position of H36 is chosen in the distance of 2 meters from the east. On average, these trees provide 33.95%, 42.29%, and 3.64% shade respectively on the facade, doors/windows, and rooftop.

**Keywords:** Optimization, Tree shade coverage, 3D geographic information system (3D GIS), Ant Colony Optimization (ACO) algorithm

Please cite this article as: Ghods M, Aghamohammadi Zanjirabad H, Vafaeinejad AR, Behzadi S, Gharagouzlo AR. 2021. Using a hybrid model of 3D GIS and meta-heuristic methods for optimizing tree shade coverage. Journal of RS and GIS for Natural Resources, 12(3): 18-39. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>