https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.239593

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ص ص ۹۴- 104

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۴۰۴/۰۹/۰۴

تهیه نقشه محل استقرار پنل‌های خورشیدی در مناطق شهری با استفاده از تحلیل سه‌بعدی مبتنی بر داده‌های لیدار و سامانه‌های اطلاعات مکانی

سیده آیدا میرشفیعی[۱]، سعید صادقیان [۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، ۱۷۱۹۱۶۷۶۵، sa_sadeghian@sbu.ac.ir

چکیده

گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه سامانه‌های فتوولتائیک، به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی، ارتقای امنیت انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در این میان، بام ساختمان‌ها به‌دلیل سطح وسیع، موقعیت مناسب و دسترسی مستقیم به تابش خورشید، یکی از گزینه‌های کلیدی و پایدار برای استقرار پنل‌های خورشیدی در بافت‌های شهری به‌شمار می‌آیند. هدف این پژوهش، ارزیابی فنی و اقتصادی ظرفیت بام‌های شهری برای نصب سامانه‌های خورشیدی، با بهره‌گیری از داده‌های لیدار[۱] و تحلیل‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی[۲] است. برای این منظور، **۱۰۳۶۹** ساختمان در منطقه‌ای از بروکلین نیویورک، با استفاده از مدل رقومی سطح[۳] حاصل از لیدار، از نظر مساحت مؤثر، شیب، جهت‌گیری و میزان تابش دریافتی، مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با استفاده از شاخص‌های اقتصادی نظیر بازده سرمایه‌گذاری[۴] و دوره بازگشت سرمایه[۵] تحلیل اقتصادی انجام شد. نتایج نشان داد که حدود **۶۳/۷۵** درصد از بام‌های مناسب دارای دوره بازگشت سرمایه کمتر از دو سال هستند. رویکرد تلفیقی ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و کاربردی برای برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت‌های خورشیدی در مناطق شهری پرتراکم مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: ابر نقاط، انرژی تجدیدپذیر، تابش خورشیدی، توسعه پایدار، سیستم فتوولتائیک، مدل رقومی سطح

Mapping the placement of solar panels in urban areas using three-dimensional analysis based on lidar data and geographic information systems

Seyedeh Aida Mirshafiey[1], Saeid Sadeghian [2*]

1- M.Sc. Student of Photogrammetry, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 171916765 Tehran, Iran, sa_sadeghian@sbu.ac.ir

Received: 20 March 2025 Accepted: 25 November 2025

Abstract

The expansion of renewable energy use, especially photovoltaic systems, has received widespread attention in recent years as an effective strategy for reducing dependence on fossil energy sources, enhancing energy security, and decreasing greenhouse gas emissions. Among these, building rooftops—due to their large surface area, suitable location, and direct access to sunlight—are considered one of the key and sustainable options for installing solar panels in urban environments.

1. LIDAR
2. GIS
3. DSM
4. Return on Investment
5. Payback Period

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

The aim of this study is to conduct a technical and economic assessment of the potential of urban rooftops for solar system installation, using lidar data and geographic information system analyses. To this end, **10,369** buildings in an area of Brooklyn, New York, were examined in terms of effective area, slope, orientation, and amount of solar radiation received, based on a digital surface model derived from lidar. Subsequently, an economic analysis was performed using indicators such as return on investment and payback period. The results showed that approximately **63.75** percent of the suitable rooftops had a payback period of less than two years. The proposed integrated approach can serve as an efficient and practical tool for planning the development of solar infrastructure in dense urban areas.

Keywords: Digital Surface Model, Photovoltaic System, Point Cloud, Renewable Energy, Solar Radiation, Sustainable Development

۱- مقدمه

با افزایش جمعیت و شهرنشینی، تقاضا برای انرژی رشد کرده و نیاز به منابع پایدار مانند انرژی خورشیدی افزایش یافته است. انرژی خورشیدی پتانسیل بالایی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تأمین برق پایدار در شهرها دارد. چالش اصلی، شناسایی مکان‌های بهینه برای نصب پنل‌های خورشیدی است، چراکه عواملی مانند تابش خورشید، سایه‌اندازی و جهت بام بر کارایی سیستم‌ها تأثیر می‌گذارند. بام ساختمان‌ها به‌عنوان فضاهای بلااستفاده، گزینه‌ای ایده‌آل برای نصب پنل‌های خورشیدی هستند، به‌ویژه در شهرهایی که فضای کافی برای نیروگاه‌های زمینی وجود ندارد. فناوری‌هایی مانند لیدار و سیستم اطلاعات جغرافیایی با تحلیل‌های دقیق مکانی و مدل‌سازی سه‌بعدی، ارزیابی پتانسیل خورشیدی را ممکن می‌سازند. داده‌های لیدار امکان ایجاد مدل‌های رقومی سطح با وضوح بالا را فراهم می‌کنند که به طور دقیق هندسه پشت‌بام‌ها و ویژگی‌های زمینی را نمایش می‌دهند [۱, ۲]. این داده‌ها می‌توانند با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی ادغام شوند تا شیب پشت‌بام‌ها، جهت‌گیری‌ها و میزان تابش خورشیدی را ارزیابی کنند و ارزیابی دقیق‌تری از پتانسیل خورشیدی ارائه دهند [۳, ۴]. در مطالعات مختلف، فناوری لیدار به‌عنوان ابزاری قدرتمند در ارزیابی پتانسیل خورشیدی بام‌ها مورد توجه قرار گرفته است. کاسنر و همکاران [۵] با استفاده از داده‌های لیدار و سامانه اطلاعات مکانی، پتانسیل خورشیدی پشت‌بام‌های شهری را ارزیابی کرده و بر اهمیت مدل رقومی سطح تأکید کردند. در ادامه، سانتوس و همکاران [۶] در پژوهشی مشابه از لیدار در شهر لیسبون برای شبیه‌سازی الگوهای تابش خورشیدی استفاده کردند و نشان دادند که این فناوری می‌تواند به‌طور مؤثر الگوهای تابشی را شبیه‌سازی کند. ادامز [۷] نیز با به‌کارگیری هم‌زمان لیدار و سامانه اطلاعات مکانی، ویژگی‌های شهری را برای نقشه‌برداری دقیق پتانسیل خورشیدی استخراج کرد نقش این دو فناوری را در برنامه‌ریزی انرژی خورشیدی شهری به نمایش گذاشت. در پژوهشی دیگر، کو [۸] با تمرکز بر اثر سایه‌اندازی درختان، کاهش پتانسیل خورشیدی بام‌های مسکونی سان فرانسیسکو را تحلیل کرده و نشان داد که پوشش درختی می‌تواند توجهی بازده انرژی خورشیدی را تحت تأثیر قرار دهد.

در راستای توسعه مدل‌های خودکار، بوز و همکاران [۹] یک مدل خودکار برای ارزیابی پتانسیل نصب سیستم‌های فتوولتائیک در سامانه اطلاعات مکانی ارائه دادند. در ایران، اکبریان و همکاران [۱۰] در ادامه این تلاش‌ها، روش‌های شناسایی سقف‌های با پتانسیل بالای خورشیدی را بررسی کرده و به بهبود تکنیک‌های برآورد پتانسیل خورشیدی در مناطق شهری کمک کردند. همچنین، دابک و یوراش [۱۱] با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی و لیدار، پتانسیل فتوولتائیک بام‌های وروتسواف را با در نظر گرفتن نوع ساختمان، شکل بام، شیب، جهت و سایه‌اندازی ارزیابی کردند.

پریتو و همکاران [۱۲] نیز در راستای بهبود روش‌های پیشین، روشی دقیق برای ارزیابی پتانسیل خورشیدی بام‌ها با استفاده از لیدار و مدل‌های سه‌بعدی شهری ارائه دادند که ضمن دقت بالا، قابلیت تکرار نیز داشت. در همین راستا، منصوری و همکاران [۱۳] با بهره‌گیری از لیدار در شهر لثبریج کانادا، بخش‌های مناسب بام را بر اساس سایه‌اندازی، شیب و جهت ارزیابی کرده و به تحلیل اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک پرداختند. با پیشرفت روش‌های محاسباتی، ژانگ و همکاران [۱۴] از یادگیری عمیق برای بررسی پتانسیل خورشیدی بام‌های نانجینگ چین استفاده کرده و ظرفیت بالای تولید انرژی خورشیدی را در این منطقه نشان دادند. به طور مشابه، فوئنتس و همکاران [۱۵] با ارزیابی بام‌های دانشگاه سانتیاگو د کالی، نقش سیستم‌های فتوولتائیک و حرارتی در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و تولید انرژی پاک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، هو و همکاران [۱۶] با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی سطح، تابش خورشیدی بام‌ها را شبیه‌سازی کرده و به نتایجی مشابه در زمینه پتانسیل بالای تولید انرژی دست یافتند. در پژوهشی دیگر، آجیسکی و همکاران [۱۷] روشی مبتنی بر سامانه اطلاعات مکانی و لیدار ارائه دادند که نسبت به روش‌های سنتی از دقت بیشتری برخوردار بود. اصلانی و سایپل [۱۸] یک روش خودکار جدید برای استخراج اجزای مسطح بام‌ها از مدل رقومی سطح و الگوریتم‌های فرابتکاری ارائه کردند. در مطالعات آینده‌نگر، مولنار و همکاران [۱۹] پتانسیل تولید برق فتوولتائیک از سقف‌های ساختمان‌ها در اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۶۰ را بررسی کرده و به نقش خانه‌های تک‌خانواری و بام‌های تجاری در تأمین انرژی اشاره کردند. به موازات آن، سها و همکاران [۲] چالش‌های نصب پنل‌های خورشیدی در مناطق میراثی بوداپست را مورد بررسی قرار داده و تأثیر مسائل زیبایی‌شناختی بر کاهش پتانسیل خورشیدی را نشان دادند. گوئی و همکاران [۲۰] با ترکیب مدل رقومی سطح، تصاویر هوایی و یادگیری عمیق، بام‌های شهری را طبقه‌بندی و نقشه پتانسیل خورشیدی تهیه کردند. چنکی و همکاران [۲۱] از ابزارها و داده‌های متن‌باز برای برآورد پتانسیل فتوولتائیک در مقیاس شهری و پردازش داده‌های اقلیمی بلند مدت در شهر براتیسلاوا بهره گرفتند. در نهایت، چن و همکاران [۲۲] با مروری بر فناوری‌های بام پایدار، به نقش بام‌های خورشیدی در کاهش جزایر حرارتی شهری پرداختند. ماکانسلا وهمکاران [۲۳] با استفاده از فناوری لیدار و مدل سه‌بعدی بام‌ها، مساحت، شیب، جهت‌گیری و تابش خورشیدی هر بام شهری را مشخص و پتانسیل جلوگیری از انتشار کربن‌دی‌اکسید را محاسبه کردند. ریس و همکاران [۱] نیز با استفاده از لیدار، پتانسیل خورشیدی بام‌های ترومسو را ارزیابی کردند

و نشان دادند جهت بام و تراکم ساختمان‌ها بر تولید و ضرورت طراحی بهینه پنل‌ها اثرگذار است.

هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک مدل کارآمد برای شناسایی بام‌های مناسب جهت نصب پنل‌های خورشیدی و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان تابش خورشیدی در محیط‌های شهری است. این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی، بازده سرمایه‌گذاری و دوره بازگشت سرمایه، به ارزیابی اقتصادی پروژه‌های خورشیدی پرداخته و با استفاده از نقشه حرارتی بازده سرمایه‌گذاری، پراکنش پتانسیل اقتصادی بام‌ها را به صورت بصری نمایش می‌دهد. این رویکرد نوآورانه می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران در توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک کند. ارائه مدل ترکیبی اقتصادی و فضایی در این پژوهش سهم قابل توجهی در بهبود تصمیم‌گیری‌های مرتبط با انرژی خورشیدی و توسعه دانش فنی در این حوزه دارد.

۲- فناوری لیدار و کاربردهای آن

لیدار، مخفف تشخیص نور و فاصله، یک فناوری سنجش از دور فعال است که با ارسال پالس‌های لیزری به سطح زمین و ثبت زمان بازگشت آن‌ها، اطلاعات دقیقی از فاصله و ویژگی‌های سطح به دست می‌آورد. این فناوری در کنار فتوگرامتری فضایی و سنجش از دور، به‌عنوان ابزاری مکمل برای جمع‌آوری داده‌های سه‌بعدی با سرعت بالا و دقتی مشابه روش‌های سنتی مانند نقشه‌برداری و فتوگرامتری عمل می‌کند. سامانه لیدار از سه بخش اصلی تشکیل شده است: فرستنده که پالس‌های لیزری با طول موج ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر را به هدف می‌فرستد، گیرنده که تابش‌های بازگشتی را جمع‌آوری و به آشکارساز هدایت می‌کند و آشکارساز که سیگنال نوری را به سیگنال الکتریکی برای پردازش تبدیل می‌نماید [۲۴].

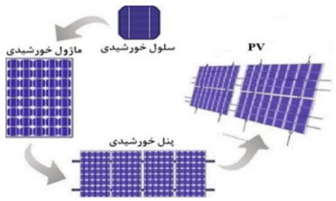
از داده‌های لیدار می‌توان مدل رقومی سطح و مدل رقومی زمین[1] تولید کرد که به ترتیب ارتفاع کلی عوارض سطحی مانند ساختمان‌ها و درختان و ارتفاع زمین بدون عوارض سطحی را نمایش می‌دهند. تفاضل این دو مدل، اطلاعاتی مانند ارتفاع ساختمان‌ها و تاج پوشش گیاهی را فراهم می‌کند که برای کاربردهای مختلفی چون تحلیل‌های شهری، شناسایی پشت‌بام‌های مناسب برای نصب پنل‌های خورشیدی، بررسی سایه‌اندازی و تحلیل شیب و جهت سطوح بسیار مفید است. همچنین، برای ارتقای دقت مدل‌های لیدار می‌توان از الگوریتم‌های پردازش تصویر و تکنیک‌های یادگیری ماشین بهره گرفت تا کیفیت داده‌ها و صحت نتایج بهبود یابد [۱۰, ۲۴]. جدول ۱ به مزایا و معایب لیدار اشاره می‌کند.

جدول ۱ خصوصیات لیدار

مزایا	معایب
دقت بالا در جمع آوری اطلاعات	هزینه های بالا
سرعت بالا در مقایسه با روش های سنتی	نیاز به تجهیزات تخصصی
مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق	حساسیت به شرایط جوی

۳- ساختار پنل‌های خورشیدی

پنل‌های خورشیدی از سلول‌های فتوولتائیک ساخته شده‌اند که انرژی نور خورشید را به‌طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. این سلول‌ها معمولاً از مواد نیمه‌هادی مانند سیلیکون ساخته می‌شوند و کارایی بالایی در تبدیل انرژی دارند. شدت تابش خورشید، که در مناطق مختلف متفاوت است، تأثیر مستقیمی بر بازدهی سیستم‌های فتوولتائیک دارد [۱۰]. پنل‌های خورشیدی از لایه‌های مختلفی تشکیل شده‌اند: لایه شفاف بالایی که نور را جذب و از سلول‌ها محافظت می‌کند، و سلول‌های فتوولتائیک که انرژی نور را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند [۱۹, ۲۵]. پنل‌های خورشیدی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که هر کدام ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند. پنل‌های مونوکریستالین از سیلیکون تک‌کریستالی ساخته می‌شوند و به دلیل خلوص بالاتر سیلیکون، راندمان بالاتر و عمر طولانی‌تری دارند. در مقابل، پنل‌های پلی‌کریستالین از سیلیکون چندکریستالی ساخته می‌شوند و به دلیل هزینه کمتر، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مسکونی و تجاری به شمار می‌آیند، هرچند راندمان آن‌ها کمی کمتر از پنل‌های مونوکریستالین است [۲۵, ۲۶]. پنل‌های فیلم‌نازک نیز از لایه‌های نازک مواد نیمه‌هادی ساخته می‌شوند که مزایای خاص خود را دارند. این پنل‌ها سبک و انعطاف‌پذیر هستند و برای کاربردهایی مانند سقف‌های منحنی یا سطوح متحرک مناسب هستند [۲۵]. شکل ۱ نمایانگر یک سیستم فتوولتائیک[2] است.



شکل ۱ سیستم فتوولتائیک

برای نصب بهینه پنل‌های خورشیدی و افزایش کارایی آن‌ها، باید عوامل مختلفی مانند شدت تابش خورشیدی، زاویه و جهت قرارگیری پنل‌ها و سایه‌اندازی را در نظر گرفت. در مناطق نیم‌کره شمالی، جهت جنوبی و زاویه مناسب با توجه به عرض جغرافیایی، بازدهی پنل‌ها را به حداکثر می‌رساند. همچنین، جلوگیری از سایه‌اندازی ناشی از موانعی مانند ساختمان‌ها یا درختان، برای جذب مؤثر انرژی خورشیدی ضروری است [۱۰, ۲۷]. استفاده از داده‌های لیدار می‌تواند به تحلیل سایه‌اندازی و شناسایی مکان‌های بهینه برای نصب پنل‌ها کمک کند [۱۰]. در نهایت، پنل‌های خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار، در مسیر حرکت به سوی آینده‌ای کم‌کربن و پایدار نقش بسزایی دارند. با در نظر گرفتن عوامل محیطی و فنی و برنامه‌ریزی دقیق، می‌توان از حداکثر پتانسیل انرژی خورشیدی بهره برد و به سوی شهری پایدارتر و کم‌کربن گام برداشت [۲۷].

۴- روش‌شناسی پژوهش

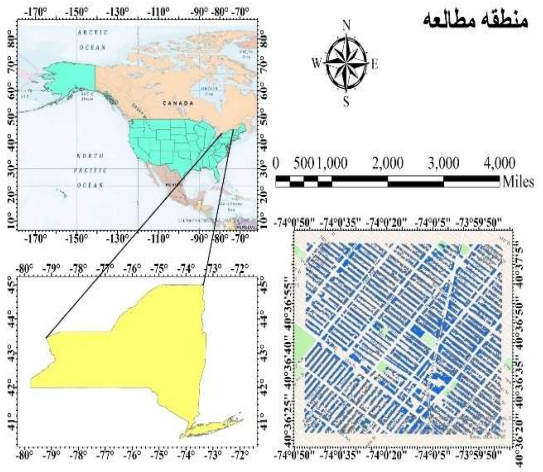
۴-۱- انتخاب منطقه مطالعه

1. DTM

2. PV

نیویورک، یکی از بزرگترین و مهم‌ترین شهرهای ایالات متحده، در شمال شرقی این کشور واقع شده است. این شهر در ساحل شرقی ایالات متحده و در نزدیکی اقیانوس اطلس قرار دارد. موقعیت جغرافیایی نیویورک به طور دقیق در ۴۰/۷۱۲۸ درجه عرض جغرافیایی و ۷۴/۰۰۶۰ درجه طول جغرافیایی است. این شهر از نظر جغرافیایی در شرق ایالات متحده قرار دارد و به عنوان یکی از مراکز اقتصادی، فرهنگی و تجاری مهم دنیا شناخته می‌شود. آب و هوای نیویورک دارای ویژگی‌های قاره‌ای مرطوب است. تابستان‌ها در این شهر گرم و مرطوب بوده و زمستان‌ها سرد و برفی است و دما به راحتی می‌تواند به زیر صفر برسد، به‌ویژه در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه. بهار و پاییز در نیویورک دارای دمای معتدل و شرایط جوی نسبتا ملایم هستند.

منطقه بروکلین، یکی از پنج ناحیه اصلی شهر نیویورک، در جنوب غربی جزیره استاتن آیلند و در نزدیکی منهتن قرار دارد. بروکلین با مختصات جغرافیایی ۴۰/۶۵ درجه شمالی و ۷۳/۹۵ درجه غربی مشخص می‌شود. این منطقه به دلیل موقعیت استراتژیک خود، دارای تراکم جمعیت بالایی است. این مناطق با تراکم بالای جمعیت و ساختمان‌ها، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند. نصب پنل‌های خورشیدی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوا و کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی کمک کند. همچنین، استفاده از پشت‌بام‌ها برای نصب پنل‌ها به عنوان فضاهای بلااستفاده، می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش دهد و به توسعه پایدار شهری کمک کند. این تحقیق می‌تواند به شناسایی ساختمان‌های مناسب برای نصب پنل‌های خورشیدی کمک کرده و به برنامه‌ریزی‌های شهری در راستای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر یاری رساند. شکل ۲ محدوده منطقه مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۲ محدوده منطقه مطالعه در بروکلین

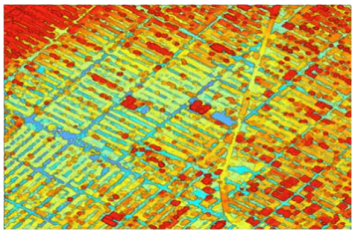
۴-۲- جمع‌آوری داده‌های لیدار

بعد از انتخاب منطقه مطالعه، باید داده های مورد استفاده را جمع آوری کرد. در این پژوهش، از داده‌های لیدار بهره‌برداری شده است که اطلاعات سه‌بعدی دقیقی از سطح زمین، ساختمان‌ها و دیگر عوارض طبیعی و مصنوعی را ارائه می‌دهند. جمع آوری داده های لیدار با استفاده از سنسور های هوابرد و گاهی اوقات از سیستم های پهپادی[1] صورت می گیرد [۱۵]. در جدول ۲ مشخصات ابر نقاط استفاده شده در این پژوهش ذکر شده است. این داده‌ها با استفاده از سیستم لیدار هوابرد Leica ALS70 که بر روی هواپیماهای Cessna 404 و Cessna 310 نصب شده بود، جمع‌آوری شده‌اند. سیستم مختصات داده‌ها بر اساس UTM منطقه ۱۸ شمالی و مبنای ارتفاعی NAVD88 با مدل ژئوئیدی Geoid12a تنظیم شده است. داده‌های لیدار این پروژه پس از جمع‌آوری تحت پردازش و کنترل کیفی دقیق قرار گرفته شدند. نقاط لیدار بر اساس بازتاب اول و آخر و قوانین کلاس‌بندی (زمین، غیرزمین، نویز، آب، و کلاس‌های هم‌پوشان) کلاسه‌بندی شده‌اند. پیش‌پردازش داده‌ها شامل فشرده‌سازی به فرمت LAZ، حذف نقاط تکراری و نقاط خارج از محدوده، و بررسی دستی کیفیت طبقه‌بندی مدل زمین بوده است. همچنین تطابق و کنترل کیفی با استفاده از نقاط کنترل زمینی انجام گرفته است [۲۸]. پردازش داده‌ها در نرم‌افزار ArcGIS Pro صورت گرفته است.

جدول ۲ مشخصات داده‌های مورد استفاده

USGS_Lidar_Point_Cloud_NY_CMPG_2013_18TWK835955_LAS_2015	
قالب داده	LAS
تاریخ جمع‌آوری	۲۰۱۳
تاریخ انتشار	۲۰۱۵
تعداد نقاط	۸۴۹۰۷۲۰
ابعاد	۱۵۰۰×۱۵۰۰
وضوح افقی	۰/۷ متر
دقت افقی	۰/۴۲ متر
دقت عمودی در پوشش باز	۰/۱۱۳ متر
ارتفاع پرواز	۲۳۰۰ متر
میدان دید	۳۲ درجه
نرخ پالس لیدار	۲۳۹ کیلوهرتز
نرخ چرخش اسکنر	۴۱/۶ هرتز

این داده‌ها به منظور ایجاد مدل‌های رقومی استفاده می‌شوند. مدل رقومی سطح به کمک داده‌های لیدار، ارتفاع ساختمان‌ها و دیگر موانع را مشخص کرده و زمینه را برای شبیه‌سازی تابش خورشیدی فراهم می‌آورد. شکل ۳ نمایشی از ابر نقاط به دست آمده از لیدار در منطقه مطالعه است.

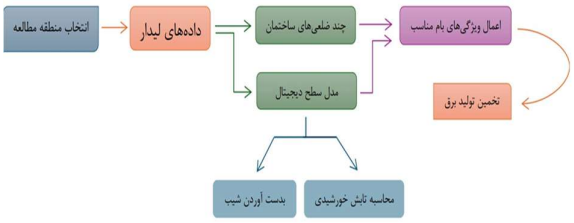


شکل ۳ ابر نقاط به دست آمده از داده های لیدار

۴-۳- مراحل انجام پژوهش

1. UAV

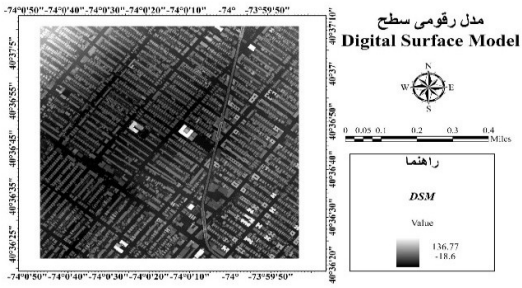
در این پژوهش، به‌منظور استخراج پتانسیل پنهان بام ساختمان‌ها، داده‌های سه‌بعدی لیدار در منطقه مطالعه منتخب گردآوری شد. سپس مدل رقومی سطح ایجاد و هندسه بام‌ها بازسازی گردید و ویژگی‌های بام‌ها از جمله شیب و جهت شیب مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، با بهره‌گیری از ابزار تابش خورشیدی منطقه‌ای، ظرفیت تولید برق بام‌های مناسب محاسبه شد. در گام پایانی، نتایج فنی با انجام تحلیل‌های اقتصادی تکمیل شد تا بام‌های مناسب نه‌تنها از نظر میزان تولید برق، بلکه از دیدگاه اقتصادی نیز شناسایی شوند. شکل ۴ مراحل انجام این پژوهش را نمایش می‌دهد.



شکل ۴ فرآیند انجام پژوهش

۴-۳-۱- ساخت مدل رقومی سطح

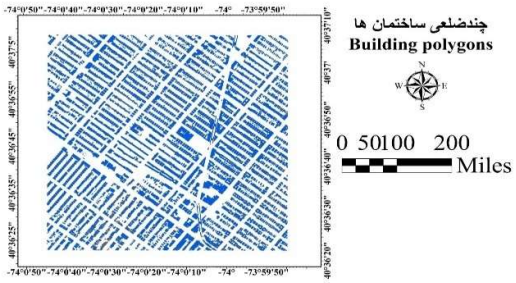
مدل رقومی سطح یک داده کلیدی برای ارزیابی دقیق پتانسیل انرژی خورشیدی و برنامه‌ریزی برای نصب سیستم‌های فتوولتائیک است. برای ارزیابی دقیق میزان انرژی خورشیدی که بر روی سطوح مختلف ساختمان‌ها (به خصوص بام‌ها) می‌تابد، نیاز به اطلاعات دقیقی در مورد شیب و جهت این سطوح داریم. مدل دیجیتال سطح این اطلاعات را فراهم می‌کند و به ما امکان می‌دهد تابش خورشیدی را به طور دقیق‌تری مدل‌سازی کنیم. بدون این مدل، محاسبات پتانسیل انرژی خورشیدی با خطای زیادی همراه خواهد بود. برای ساخت مدل رقومی سطح، ابتدا داده‌های لیدار فیلتر می‌شوند تا نقاط مربوط به زمین، ساختمان‌ها و پوشش گیاهی از هم جدا شوند [۲۹]. سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی، یک مدل شبکه‌ای[1] با اندازه سلول مشخص تولید می‌شود [۲]. دقت مدل رقومی سطح تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌ها دارد. بنابراین، انتخاب روش مناسب برای ساخت مدل، استفاده از داده‌های با کیفیت بالا و انتخاب اندازه سلول بسیار مهم است. شکل ۵ مدل دیجیتال سطح ساخته شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۵ مدل رقومی سطح به دست آمده از داده های لیدار فیلتر شده

۴-۳-۲- استخراج ساختمان ها از ابر نقاط سه‌بعدی

استخراج سقف ساختمان‌ها برای ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی بسیار مهم است، زیرا این کار امکان تعیین مساحت قابل استفاده برای نصب پنل‌های خورشیدی را می‌دهد [۳۰]. با دانستن مساحت دقیق سقف‌ها، می‌توان میزان تولید برق از سیستم‌های فتوولتائیک را با دقت بیشتری برآورد و برای برنامه‌ریزی انرژی پایدار در سطح شهر یا منطقه اقدام کرد [۳۱, ۳۲]. همچنین، این اطلاعات به بهینه‌سازی مکان‌یابی پنل‌های خورشیدی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. در گام نخست، ابر نقاط طبقه بندی شده، سپس فیلتر به آن اعمال می‌شود تا کلاس ساختمان استخراج شود. حال می توان از ابر نقطه خروجی یک مدل شبکه‌ای ایجاد کرد و مقدار نمونه‌گیری مناسب را انتخاب کرد. برای افزایش دقت، خروجی هر مرحله باید ویرایش شود. سپس می‌توان مدل شبکه‌ای ایجاد شده را به فرمت چندضلعی[2] همانند شکل ۶ تبدیل کرد. در محدوده مطالعه ۱۰۳۶۹ چندضلعی ساختمانی شناسایی شد.



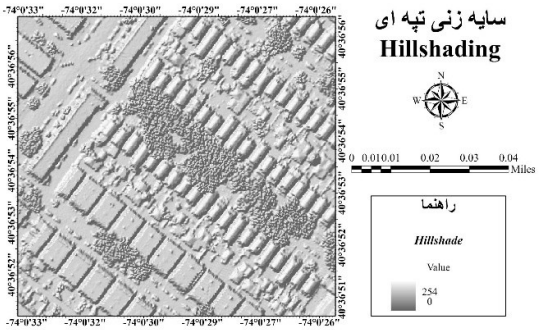
شکل ۶ چندضلعی تولید شده از مدل شبکه‌ای

۴-۳-۳- بصری سازی و سایه‌زنی تپه‌ای[3] برای تحلیل سایه

تغییرات طول و جهت سایه‌ها در نصب سیستم‌های فتوولتائیک دارای اهمیت بسیار است و تحلیل سایه‌زنی تپه‌ای به بررسی این تغییرات کمک می‌کند. این تحلیل با شبیه‌سازی سایه‌ها، نواحی بام در معرض تابش مستقیم خورشید را مشخص کرده و نمایش عوارضی مانند ساختمان‌ها و درختان را شفاف‌تر می‌سازد. تحلیل سایه‌زنی تپه‌ای برای مدل‌سازی تغییرات مکانی-زمانی تابش خورشید بر سطوح مختلف شهری و تعیین بخش‌های بدون مانع هر سطح بام به کار می‌رود [۱۳]. برای انجام این تحلیل از مدل رقومی سطح استفاده می‌شود و خروجی آن یک مدل سه‌بعدی خاکستری رنگ از منطقه مورد نظر خواهد بود [۲, ۳۳]. در مدل سه‌بعدی مقادیر سلول‌ها نشان‌دهنده میزان سایه هستند [۳۳]. سایه‌زنی تپه‌ای به بررسی تأثیر سایه ساختمان‌های مجاور و درختان بر روی بام‌ها و به تعیین مکان‌های بهینه نصب پنل‌های خورشیدی کمک می‌کند [۱۵, ۲۹]. علاوه بر این، از سایه‌زنی تپه‌ای برای ارزیابی اثرات سایه بر روی سطوح عمودی مانند نمای ساختمان نیز استفاده می‌شود [۲۹]. موانع بیرونی مانند درختان یا ساختمان‌های مجاور، موانع روی سقف مانند دودکش‌ها، تأسیسات تهویه، یا تجهیزات فنی نیز سهم مهمی در کاهش مساحت مفید دارند [۱۶]. همچنین در برخی مناطق نصب پنل‌های خورشیدی روی پشت‌بام‌هایی که از فضاهای عمومی قابل مشاهده هستند، ممنوع یا محدود است [۲]. استفاده از نقشه‌های سایه برای تعیین اینکه آیا نور مستقیم خورشید در زمان خاصی از سال سایه می‌گیرد، می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی در تولید

1. Raster
2. Polygon
3. Hill shade

برق ایجاد کند [۳۴]. در شکل ۷ به وضوح درختان و تاثیر آن‌ها بر بام ساختمان‌ها نشان داده شده است. شکل ۷ بر اساس سایه‌روشن محاسبه‌شده با زاویه‌ی ارتفاع خورشید برابر با ۴۵ درجه و زاویه‌ی سمت خورشید (آزیموت) برابر با ۳۱۵ درجه تهیه شده است.

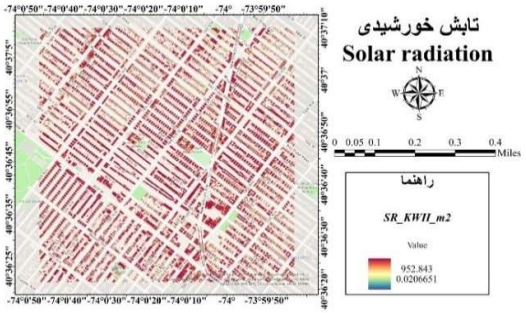


شکل ۷ سایه‌زنی تپه‌ای

۴-۳-۴- محاسبه تابش خورشیدی

ابزار تابش خورشیدی منطقه‌ای[1]، برای محاسبه میزان تابش خورشیدی دریافتی در یک منطقه مشخص به کار می‌رود. این ابزار تابش مستقیم و پراکنده را در نظر می‌گیرد [۹]. با استفاده از ASR، می‌توان نقشه‌های تابش خورشیدی را برای یک منطقه تهیه کرد [۶]. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که کدام بخش‌ها بیشترین و کدام بخش‌ها کمترین تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند. ابزار ASR برای تعیین مکان‌های بهینه برای نصب پنل‌های خورشیدی استفاده می‌شود [۳۱]. ASR بر اساس مدل رقومی سطح کار می‌کند و از دیاگرام‌های چرخش خورشید برای محاسبه تابش در عرض جغرافیایی مورد نظر استفاده می‌کند. ASR قابلیت شبیه‌سازی ساعتی را دارد و تغییرات موقعیت خورشید و اثر سایه‌های ناشی از ساختمان‌ها و عوارض توپوگرافی را در نظر می‌گیرد و با استفاده از الگوریتم نمای دید نیم‌کره‌ای، میزان تابش دریافتی در هر نقطه از منطقه را محاسبه می‌کند [۲, ۳۰, ۳۱]. در ابزار تابش خورشیدی منطقه‌ای، پارامترهای مختلفی برای محاسبه تابش خورشیدی استفاده می‌شود. این پارامترها شامل عرض جغرافیایی برای تعیین موقعیت، رزولوشن آسمان برای مدل دید، بازه زمانی روز و ساعت برای فاصله بین محاسبات، و تنظیمات زمانی برای تعیین دوره محاسبات است. همچنین، فاکتور Z برای نسبت واحدهای زمینی، شیب و جهت برای تأثیر بر تابش، نسبت پراکندگی برای محاسبه تابش پراکنده، و قابلیت انتقال برای تابش منتقل‌شده از جو به زمین تنظیم می‌شود. انتخاب مدل تابش و تعیین زمان شروع و پایان بازه زمانی و روزهای محاسبه برای تحلیل دقیق‌تر تابش خورشیدی اهمیت دارد [۳۱].

خروجی‌های این ابزار، شامل چندین پارامتر کلیدی هستند که برای تحلیل تابش خورشیدی استفاده می‌شوند. یکی از این خروجی‌ها میزان تابش جهانی است که مجموع تابش مستقیم و پراکنده را نشان می‌دهد. تابش مستقیم به تابش خورشیدی که به طور مستقیم از خورشید به سطح زمین می‌رسد اشاره دارد، در حالی که تابش پراکنده تابشی است که از جو به سطح زمین پراکنده می‌شود. علاوه بر این، ساعات آفتابی به تعداد ساعاتی اشاره دارد که یک منطقه در معرض نور خورشید قرار دارد. در نهایت، نقشه‌هایی تولید می‌شود که مقادیر تابش را به صورت مقیاس رنگی نمایش می‌دهند، که این نقشه‌ها برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر تابش خورشیدی در مناطق مختلف استفاده می‌شوند [۳۳]. واحد خروجی ASR نشان‌دهنده میزان انرژی خورشیدی دریافت شده در واحد سطح در یک بازه زمانی مشخص است. اغلب به صورت وات‌ساعت بر متر مربع (Wh/m^2)یا کیلووات‌ساعت بر متر مربع (kWh/m^2) ارائه می‌شود [۳۱]. این واحدها نشان‌دهنده میزان انرژی خورشیدی هستند که در هر متر مربع از سطح مورد نظر در طول یک دوره زمانی مشخص دریافت شده است. شکل ۸ تابش خورشیدی منطقه مطالعه بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع در دو فصل بهار و تابستان در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد.

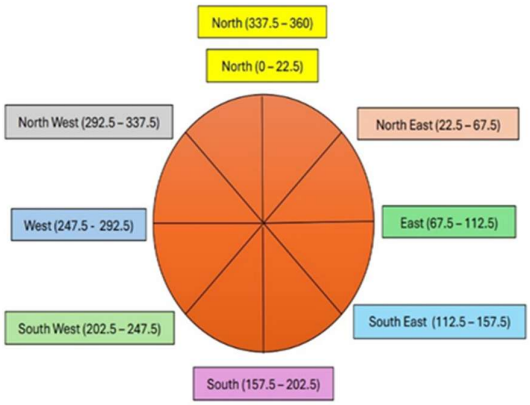


شکل ۸ کمترین و بیشترین مقدار تابش خورشیدی محاسبه شده در منطقه

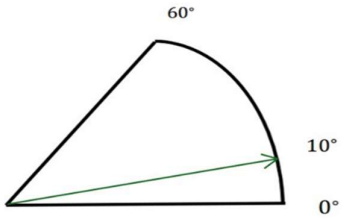
۴-۳-۵- شناسایی بام‌های مناسب

بعد از محاسبه تابش خورشیدی، باید شروط شیب[2]، جهت شیب[3]، میزان تابش خورشیدی، مساحت و سطوح مسطح را برقرار کرد تا بام‌های مناسب شناسایی شوند. شیب به میزان تندی یک سطح اشاره دارد. شیب ۰ درجه به معنای سطح صاف و ۹۰ درجه به معنای سطح کاملاً عمودی است. جهت آن روبه‌رو شدن شیب را نشان می‌دهد و با درجه اندازه‌گیری می‌شود و اگر یک سطح بام صاف باشد، جهت آن ۱- در نظر گرفته می شود [۹]. جهت‌گیری سقف یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی پتانسیل فتوولتائیک پشت‌بام‌ها محسوب می‌شود. در نیم‌کره شمالی،سقف‌هایی که رو به جنوب قرار دارند معمولاً بیشترین میزان تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند و در نتیجه برای نصب سیستم‌های خورشیدی مناسب‌ترند. در تحلیل‌های فنی، جهت‌های مطلوب شامل سقف‌های مسطح و شیب‌داری است که رو به جنوب قرار دارند. جهت‌گیری ساختمان‌های مسکونی و تجاری غالباً به سمت جنوب تمایل دارد، که این جهت‌گیری با بیشینه‌سازی بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک هم‌راستا است [۱۹]. شدت و یکنواختی تابش خورشیدی دریافتی روی یک پشت‌بام به‌طور مستقیم تابعی از جهت‌گیری آن نسبت به مسیر حرکت خورشید در آسمان است. از این رو، تحلیل دقیق جهت سقف برای اولویت‌بندی گزینه‌های نصب پنل فتوولتائیک از اهمیت زیادی برخوردار است [۲۰]. شیب و جهت بام‌ها از مدل رقومی سطح به دست آمده از داده‌های لیدار محاسبه می‌شوند. در شکل ۹ و ۱۰ طبقه بندی جهت شیب و طبقه بندی شیب بام‌ها به نمایش در آمده است.

1. Area Solar Radiation
2. Slope
3. Aspect



شکل ۹ کلاس‌بندی جهت شیب



شکل ۱۰ طبقه بندی شیب بام‌ها و مشخص کردن بام‌های مسطح

سقف‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: سقف‌های صاف و سقف‌های شیب‌دار. در سقف‌های صاف، امکان تنظیم شیب و جهت پنل‌ها برای دریافت بیشترین نور خورشید وجود دارد، که این امر به بهینه‌سازی عملکرد پنل‌های خورشیدی کمک می‌کند. اما در سقف‌های شیب‌دار، به دلیل محدودیت‌های موجود در شیب و جهت، نصب پنل‌ها ممکن است چالش‌برانگیزتر باشد [۳۳]. علاوه بر این، در مناطق نزدیک به خط استوا، تأثیر زاویه تابش خورشید بر میزان انرژی دریافتی پنل‌های خورشیدی نسبت به مناطق دیگر کمتر است، زیرا در این مناطق خورشید به طور عمودی‌تر می‌تابد و تغییرات زاویه تابش کمتر محسوس است [۲۳]. سقف‌هایی با شیب بین ۰ تا ۱۰ درجه و سقف‌هایی با شیب بین ۱۰ تا ۶۰ درجه به‌طور کلی برای نصب سیستم‌های فتوولتائیک مناسب در نظر گرفته می‌شوند. سقف‌هایی با شیب بیشتر از ۶۰ درجه به دلیل محدودیت زاویه تابش و افزایش احتمال سایه‌اندازی معمولا بهره‌وری کمتری دارند و مناسب تلقی نمی‌شوند [۹]. همچنین شیب‌های زیاد ممکن است باعث افزایش افت انرژی ناشی از سایه سقف‌های مرتفع مجاور به ویژه در مناطق شهری متراکم شوند [۲۹]. شیب و جهت پنل‌های خورشیدی از عوامل مهم در بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها هستند. پنل‌های خورشیدی که به سمت جنوب قرار دارند، بیشترین میزان تابش نور خورشید را دریافت می‌کنند، بنابراین جهت مناسب در دریافت نور خورشید تأثیر زیادی دارد. علاوه بر جهت، شیب نیز نقش مهمی در بهینه‌سازی دریافت انرژی خورشیدی دارد. بهترین شیب برای نصب پنل‌های خورشیدی بستگی به عرض جغرافیایی دارد. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهند که تغییر شیب پنل‌ها بین ۲۰ تا ۶۰ درجه تنها ۱۰ درصد از تابش سالانه را کاهش می‌دهد، که این نشان‌دهنده اهمیت تطابق شیب با شرایط جغرافیایی است [۹]. زاویه شیب پنل‌های خورشیدی می‌تواند برای حداکثر کردن جذب انرژی در فصول مختلف تغییر کند و در مناطق با باد زیاد، شیب کمتر پنل‌های خورشیدی باعث کاهش فشار باد شود. گاهی برای کاهش سایه‌اندازی بین پنل‌ها، از شیب کمتری استفاده می شود [۳۱].

یکی از معیارهای بنیادی در ارزیابی فنی امکان‌سنجی نصب سیستم‌های فتوولتائیک بر روی پشت‌بام‌ها، مساحت مفید قابل استفاده است. سیستم‌های فتوولتائیک برای عملکرد مؤثر نیاز به حداقل سطح مشخصی دارند تا ماژول‌های خورشیدی بتوانند بدون تداخل فیزیکی یا سایه‌زنی نصب شوند. این مساحت باید نه تنها برای قرارگیری پنل‌ها کافی باشد، بلکه امکان تعمیر و نگهداری، گردش هوا، و دوری از موانع را نیز فراهم کند. حداقل مساحت قابل قبول برای نصب یک سیستم فتوولتائیک کوچک ۱۰ متر مربع در نظر گرفته می‌شود که برای نصب یک سیستم ۱/۵ کیلووات پیک[1] کافی است [۳۵]. چنین سیستمی می‌تواند نیازهای برق پایه یک واحد مسکونی کوچک را تا حدی پوشش دهد. برای ساختمان‌های مسکونی، مساحت مفید بین ۲۰ تا ۱۰۰ متر مربع برای نصب سیستم‌های متوسط تا بزرگ خانگی مناسب تلقی می‌شود و برای کاربری تجاری یا صنعتی، محدوده‌ای بین ۱۰۰ تا ۱۰،۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته می‌شود که متناسب با مقیاس مصرف انرژی و ظرفیت مورد انتظار طراحی می‌شود [۹]. در مطالعه‌ای در شهر ناگویا، ۹۹/۹٪ از ساختمان‌هایی که پنل خورشیدی بر روی آن‌ها نصب شده بود، دارای مساحتی بیش از ۱۰ متر مربع بودند، که تأییدی بر پذیرفته شدن این آستانه به‌عنوان حداقل معیار فنی است [۳۶].

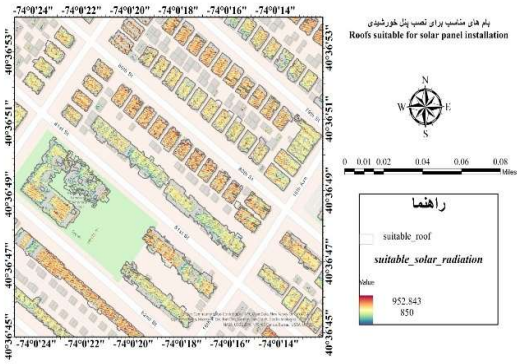
یکی دیگر از مهم‌ترین شاخص‌ها میزان تابش خورشیدی دریافتی توسط سطح بام است و اگر تابش کمتر از حد معینی باشد، سیستم به اندازه کافی انرژی تولید نخواهد کرد [۳۷]. سقف‌های با تابش پایین به‌دلیل کاهش تولید، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نبوده و بازگشت سرمایه را طولانی می‌کنند. برخی مطالعات نشان می‌دهند که سیستم‌های کوچک که روی مناطق با تابش کم نصب می‌شوند، به احتمال زیاد از نظر اقتصادی قابل توجیه نخواهند بود [۱۳]. با حذف سقف‌هایی که تابش خورشیدی آن‌ها از یک آستانه مشخص کمتر است، دقت ارزیابی پتانسیل سیستم فتوولتائیک در مقیاس شهری یا منطقه‌ای افزایش می‌یابد. این کار باعث می‌شود که تخمین‌های ظرفیت و تولید انرژی واقع‌بینانه‌تر باشند و از تخمین بیش از حد پتانسیل انرژی خورشیدی جلوگیری شود [۱۶, ۱۸]. در مطالعاتی، تمام بام‌هایی که کمتر از ۸۵۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع تابش دریافت می‌کردند، کنار گذاشته شدند زیرا مقادیر کمتر بازگشت سرمایه مناسبی نخواهند داشت و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۳۸, ۳۹].

با توجه به نکات ذکر شده و منطقه مطالعه، شرایط اعمال شده برای انتخاب بام‌های مناسب مطابق جدول ۳ می‌باشد. اعمال معیارهای آستانه‌ای مانند یک الگوریتم تصمیم‌گیری، بام‌های بهینه برای نصب پنل را بر اساس انرژی و صرفه‌جویی اقتصادی اولویت‌بندی کرده و امکان تکرار در مناطق دیگر را فراهم می‌کند. شکل ۱۱ بام‌های مناسب را برای نصب پنل خورشیدی با توجه به ویژگی های ذکر شده نشان می‌دهد. از ۱۰۳۶۹ ساختمان شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه، ۱۶۰۰ ساختمان تمام ویژگی‌های گفته شده را دارند و برای نصب پنل خورشیدی مناسب هستند.

1. KWp

جدول ۳ ویژگی‌های انتخاب بام مناسب برای پنل خورشیدی

ویژگی	مقدار
شیب	شیب ≥ ۶۰°
میزان تابش خورشیدی	تابش خورشیدی ≥ ۸۵۰ kWh/m²
جهت شیب	۲۲/۵ ≤ جهت ≤۳۳۷/۵
مسطح بودن	شیب ≥ ۱۰°
مساحت	حداقل مساحت ≤ ۴۰ m²



شکل ۱۱ بزرگ‌نمائی بام‌های مناسب برای نصب پنل خورشیدی

۴-۳-۶- تخمین تولید برق

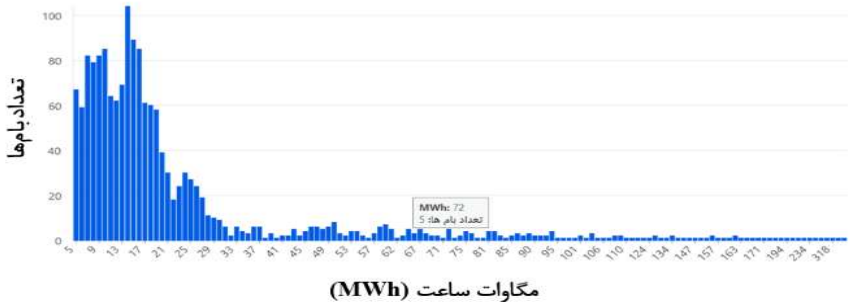
در تخمین برق تولید شده، دو پارامتر مهم بازدهی و تلفات سیستم فتوولتائیک بسیار مهم است. بازدهی یک سیستم فتوولتائیک به معنای نسبت انرژی الکتریکی تولید شده توسط سیستم به انرژی خورشیدی دریافتی است. به عبارت دیگر، نشان می‌دهد که چه مقدار از انرژی خورشیدی تابیده شده به سیستم‌های فتوولتائیک به انرژی الکتریکی قابل استفاده تبدیل می‌شود [۱۶]. عوامل زیادی از جمله نوع پنل، دما، سایه اندازی، میزان تابش خورشیدی و زاویه و جهت گیری پنل ها بر بازدهی آن ها تاثیرگذار است [۱۹, ۳۲]. بازدهی پنل‌های خورشیدی تجاری معمولاً بین ۱۵ تا ۲۳ درصد است. تلفات در سیستم فتوولتائیک به معنای کاهش انرژی خورشیدی تبدیل شده به انرژی الکتریکی است. این تلفات ناشی از عوامل مختلفی است که باعث کاهش راندمان سیستم و در نتیجه کاهش تولید برق می‌شود [۲۵, ۳۶].

انواع تلفات در سیستم‌های فتوولتائیک به چند دسته تقسیم می‌شوند که هرکدام می‌تواند بر عملکرد و بهره‌وری سیستم تأثیر بگذارد. یکی از این انواع تلفات، تلفات ناشی از سایه است. زمانی که سایه‌ای بر روی پنل‌های فتوولتائیک می‌افتد، تابش خورشید کاهش یافته و در نتیجه تولید برق کاهش می‌یابد [۴۰]. تلفات حرارتی نیز یکی دیگر از مشکلات سیستم‌های فتوولتائیک است. افزایش دمای پنل‌ها به‌طور مستقیم موجب کاهش راندمان و تولید برق می‌شود، زیرا پنل‌ها در دماهای بالا کارایی کمتری دارند. در کنار این موارد، تلفات ناشی از کابل‌ها و اتصالات نیز وجود دارد. مقاومت در کابل‌ها و اتصالات می‌تواند باعث ایجاد تلفات الکتریکی و کاهش کارایی سیستم شود. مبدل‌ها که برای تبدیل جریان مستقیم[1] به جریان متناوب[2] استفاده می‌شوند، خود دارای تلفات خاصی هستند. این تلفات به دلیل فرآیند تبدیل انرژی در مبدل‌ها ایجاد می‌شود و معمولاً بخش کوچکی از کل تلفات سیستم را تشکیل می‌دهند [۱۹]. علاوه بر این، تلفات ناشی از گرد و غبار یکی دیگر از عواملی است که بر کاهش بهره‌وری پنل‌های فتوولتائیک تأثیر می‌گذارد. تجمع گرد و غبار بر روی سطح پنل‌ها باعث کاهش میزان جذب نور خورشید و در نتیجه کاهش بازده سیستم می‌شود [۱۳]. در نهایت، تلفات کلی سیستم فتوولتائیک شامل تمامی این عوامل می‌شود. مقادیر تلفات و بازدهی ارائه شده تخمینی است و بسته به شرایط خاص سیستم و محیط ممکن است متفاوت باشد. در این پژوهش بازدهی پنل های خورشیدی ۱۵ درصد فرض شده است. همچنین، پژوهش میزان تلفات سیستم ۱۴ درصد در نظر گرفته شده که به این معنای حفظ شدن ۸۶ درصد از برق تولید شده می‌باشد. شکل ۱۲ توزیع فراوانی میزان برق تولیدی تخمین زده شده بر حسب مگاوات ساعت به تعداد بام‌ها، در محدوده مطالعه پژوهش نشان می‌دهد.

۴-۳-۷- تحلیل اقتصادی برای بررسی صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی

محاسبه بازده سرمایه‌گذاری و دوره بازگشت سرمایه از مهم‌ترین مراحل ارزیابی پروژه‌های خورشیدی است. این شاخص‌ها به سرمایه‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا پیش از اجرای پروژه، دیدگاه دقیقی نسبت به سودآوری و بازگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری به دست آورند. بازده سرمایه‌گذاری، معیاری برای سنجش میزان سودآوری یک پروژه نسبت به سرمایه‌گذاری اولیه است که به صورت درصد بیان می‌شود. این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$ROI = \frac{\text{سود خالص}}{\text{هزینه سرمایه‌گذاری}} \times 100 \qquad (۱)$$



شکل ۱۲ توزیع فراوانی مقدار برق تولیدی تخمین‌زده‌شده برای بام‌های مناسب در فصل بهار و تابستان

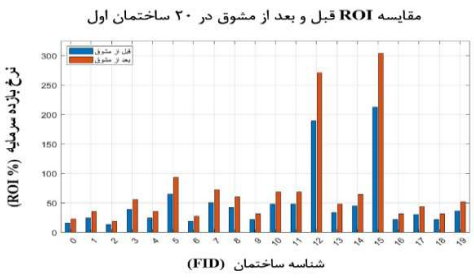
1. DC
2. AC

مقدار مثبت و بالای بازده سرمایه‌گذاری نشان‌دهنده اقتصادی بودن طرح است و بیان می‌کند که به ازای هر واحد سرمایه‌گذاری، چه میزان سود به دست آمده است. در کنار آن، دوره بازگشت سرمایه مدت زمانی را نشان می‌دهد که طول می‌کشد تا سرمایه‌گذاری اولیه از محل درآمدهای پروژه جبران شود. کوتاه بودن این دوره نشان‌دهنده ریسک کمتر و جذابیت بیشتر برای سرمایه‌گذاری است. این شاخص از رابطه (۲) به دست می‌آید:

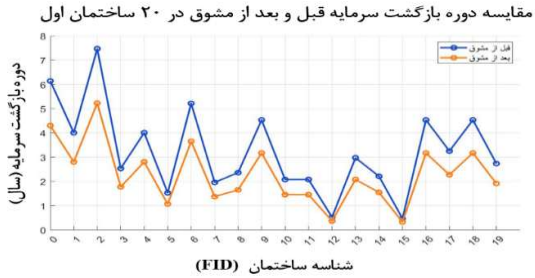
$$Payback\ Period = \frac{\text{هزینه کل}}{\text{صرفه‌جویی سالانه}} \qquad (۲)$$

برای به دست آوردن این دو شاخص، نیاز به نرخ تعرفه برق و هزینه سیستم فتوولتائیک منطقه مطالعه است. در این پژوهش با توجه به منطقه مطالعه، نرخ تعرفه برق ۰/۲۴۳۷ دلار بر کیلووات ساعت است. برای سیستم‌های مسکونی متوسط هزینه در منطقه مطالعه ۲/۸۱ دلار بر وات است و به وات سیستم فتوولتائیک بستگی دارد که بعد از اعمال مشوق‌ها اعتبار مالیاتی فدرال ۳۰ درصد کاهش می‌یابد [۴۱]. به طور کلی، سامانه‌های کوچکتر به دلیل ثابت بودن برخی هزینه‌های نرم (مانند مجوزها و نیروی کار) هزینه واحد بالاتری دارند و با بزرگ‌تر شدن سیستم هزینه متوسط هر وات اندکی کاهش می‌یابد. در مناطق مسکونی، هزینه نگهداری نیز ۳۰ دلار به ازای هر کیلووات در سال است. در سیستم های تجاری و اداری هزینه سیستم به دلیل بهره‌وری مقیاس ۱/۶ تا ۱/۹ دلار بر وات می‌باشد و هزینه نگهداری آن ۱۷ تا ۱۸ دلار بر کیلوات در سال است. هزینه نگهداری بر واحد ظرفیت در این سیستم‌ها کمتر است زیرا تجهیزات و پیمانکاری نگهداری در مقیاس بزرگ مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌شود [۴۲]. سیاست‌های تشویقی دولتی نقش مهمی در اقتصادی شدن نصب سامانه‌های خورشیدی دارند. دولت فدرال آمریکا یک اعتبار مالیاتی سرمایه‌گذاری خورشیدی[1] معادل ۳۰ درصد هزینه کل سیستم اعطا می‌کند تا پرداختی مالک را کاهش دهد. همچنین ایالت نیویورک یارانه نقدی نصب به سامانه‌های خورشیدی اعطا می‌کند که مستقیما توسط پیمانکار از هزینه پروژه کسر می‌شود [۴۳].

برای محاسبه سود خالص و صرفه‌جویی سالانه قبل و بعد از مشوق، سیستم ۳ کیلوواتی در نظر گرفته و با توجه به اطلاعات بالا محاسبه شد. همچنین فرض می‌شود در نیمه دوم سال سیستم‌ها هیچ سودی نخواهند داشت زیرا این پژوهش پتانسیل خورشیدی را با توجه به آب و هوای منطقه مطالعه در نیمه اول سال محاسبه کرده است. بعد از محاسبه سود خالص و صرفه‌جویی سالانه، نمودار بازده سرمایه‌گذاری قبل و بعد از مشوق برای ۲۰ ساختمان اول مطابق شکل ۱۳ رسم شد. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد بازده سرمایه‌گذاری بعد از اجرای مشوق‌ها افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۴ نیز نمایانگر دوره بازگشت سرمایه قبل و بعد از مشوق است که بازگشت سرمایه بعد از مشوق سریع‌تر اتفاق می‌افتد. سپس تعداد ساختمان‌ها با دوره بازگشت کمتر از ۲ سال محاسبه شد که ۶۳/۷۵ به دست آمد.

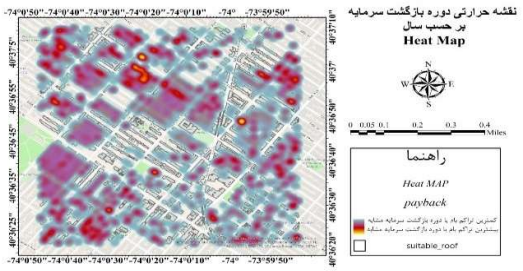


شکل ۱۳ نمودار مقایسه بازده سرمایه‌گذاری قبل و بعد از مشوق در ۲۰ ساختمان اول



شکل ۱۴ نمودار مقایسه دوره بازگشت سرمایه قبل و بعد از مشوق در ۲۰ ساختمان اول

استفاده از این شاخص‌ها در پروژه‌های خورشیدی به دلیل نیاز به تحلیل دقیق اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این محاسبات نه‌تنها به ارزیابی سودآوری پروژه کمک می‌کنند، بلکه امکان تخصیص بهینه منابع مالی و کاهش ریسک‌های سرمایه‌گذاری را نیز فراهم می‌آورند. از طرفی، نمایش سودآوری اقتصادی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند سیاست‌گذاران را به اتخاذ تصمیم‌های پایدارتر در حوزه انرژی ترغیب کند. در نهایت نقشه حرارتی دوره بازگشت سرمایه پس از طرح‌های حمایتی برای سیستم‌های ۳ کیلوواتی تهیه شد تا به صورت بصری بتوان تشخیص داد چه بام‌هایی از نظر اقتصادی هم به صرفه هستند. در شکل ۱۵، تناژ رنگی زرد بیانگر بیشترین تراکم بام‌ها با دوره بازگشت سرمایه مشابه و نواحی آبی نشان‌دهنده کمترین تراکم بر حسب سال هستند.



شکل ۱۵ نقشه حرارتی دوره بازگشت سرمایه برای سیستم‌های ۳ کیلوواتی بعد از مشوق

1. ITC

۵- بحث

در مقایسه با روش این پژوهش که دقت هندسی بالایی در مدل‌سازی بام‌ها، تحلیل سایه‌زنی و محاسبه تابش خورشیدی فراهم می‌کند، سایر رویکردهای نوین نیز هر یک دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند. روش یادگیری عمیق که توسط گوئی و همکاران [۲۰] به‌کار گرفته شده، با قابلیت اتوماسیون بالا و مقیاس‌پذیری گسترده، در استخراج خودکار ویژگی‌ها از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای عملکرد بسیار مطلوبی دارد. این روش قادر است الگوهای پیچیده سقف را شناسایی کرده، تقسیم‌بندی معنایی پشت‌بام‌ها و تفکیک سایبان درختان را با دقت انجام دهد. با این حال، نیاز به حجم زیادی از داده‌های آموزشی برای دستیابی به دقت مناسب دارد و در غیاب چنین داده‌هایی، کارایی آن کاهش می‌یابد. در مقابل، روش‌های ارائه‌شده توسط اشلمینگر و همکاران [۳۴] و سوتو کالوو و لی [۴۴] که مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و رهگیری پرتو هستند، با دقت بالا در شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک، گزینه‌ای مناسب برای طراحی بهینه در شرایط سایه‌زنی جزئی محسوب می‌شوند؛ هرچند این روش‌ها نیازمند مدل‌های سه‌بعدی دقیق و پردازش‌های سنگین هستند. در مجموع، انتخاب روش مناسب باید با توجه به هدف پژوهش، سطح دقت مورد نیاز و میزان دسترسی به داده‌های ورودی انجام گیرد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند لیدار و سیستم اطلاعات مکانی می‌تواند راهکاری کارآمد برای شناسایی بام‌های مناسب جهت نصب پنل‌های خورشیدی در مناطق شهری باشد. بررسی‌های انجام‌شده در منطقه‌ای از شهر نیویورک نشان داد که از میان ۱۰۳۶۹ ساختمان استخراج شده، ۱۶۰۰ ساختمان دارای شرایط مطلوب برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی هستند و ۶۳/۷۵ درصد از بام‌های مناسب، دوره بازگشت سرمایه کمتر از دو سال داشتند و از لحاظ اقتصادی مناسب بودند. تحلیل‌ها تأیید کردند که شیب و جهت بام‌ها، در کنار عوامل محیطی مانند سایه‌اندازی و میزان تابش خورشیدی، نقش اساسی در تعیین بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک ایفا می‌کنند. یافته‌ها اهمیت مدل‌های سه‌بعدی و تحلیل مکانی را در ارزیابی انرژی‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهند و نقش آن‌ها را در بهینه‌سازی فضاهای شهری و توسعه پایدار انرژی تأیید می‌کنند.

با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری، از داده‌های لیدار و سامانه اطلاعات مکانی در مقیاس گسترده‌تری برای توسعه زیرساخت‌های انرژی خورشیدی بهره بگیرند. علاوه بر این، لازم است که در طراحی ساختمان‌های جدید، معیارهای مناسب برای استفاده بهینه از انرژی خورشیدی در نظر گرفته شود. به‌کارگیری مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل دقیق تأثیرات سایه‌اندازی، می‌تواند دقت محاسبات مربوط به تابش خورشیدی را افزایش داده و در نتیجه، تصمیم‌گیری‌های بهتری را برای نصب سیستم‌های خورشیدی ممکن سازد. بهینه‌سازی روش‌های پردازش داده‌های لیدار با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نیز می‌تواند به بهبود دقت شناسایی بام‌های مناسب و محاسبه تابش خورشیدی کمک کند. همچنین، بررسی اثرات تغییرات فصلی و شرایط جوی بر تولید انرژی خورشیدی، به‌ویژه در شهرهایی با آب‌وهوای متغیر، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های تابش واقعی، پیشنهاد می‌شود نتایج حاصل از این روش، با داده‌های واقعی ارزیابی و اعتبارسنجی گردد.

گسترش مطالعات به شهرها و اقلیم‌های مختلف می‌تواند به تدوین مدل استاندارد ارزیابی پتانسیل خورشیدی و تسهیل توسعه پایدار انرژی کمک کند. از منظر اقتصادی، کاهش هزینه‌های نصب و تعمیر و نگهداری پنل‌های خورشیدی می‌تواند به افزایش بازدهی سرمایه‌گذاری و کاهش دوره بازگشت سرمایه منجر شود. به‌ویژه، ارائه ضمانت‌ها و گارانتی‌های طولانی‌مدت برای پنل‌های خورشیدی می‌تواند هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به‌طور چشمگیری کاهش داده و جذابیت این سیستم‌ها را برای سرمایه‌گذاران و شهروندان افزایش دهد. همچنین، کاهش هزینه‌های اولیه نصب پنل‌ها از طریق مشوق‌های دولتی یا پیشرفت‌های فناوری، می‌تواند به ایجاد یک موج تشویق همگانی برای استفاده از انرژی خورشیدی را هموار سازد. این اقدامات نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند، بلکه گامی مهم در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شوند.

۷- مراجع

[1] G. Rees, L. Hebryn-Baidy, and C. Good, Estimating the potential for rooftop generation of solar energy in an urban context using high-resolution open access geospatial data: a case study of the city of Tromsø, Norway, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 14, No. 3, pp. 123, 2025.

[2] T. Soha, V. Sugár, and B. Hartmann, City-scale analysis of PV potential and visibility in heritage environment using GIS and LiDAR, *Energy and Buildings*, Vol. 311, pp. 114124, 2024.

[3] N. Malijanska Andreevska, G. Gjorgjiev, and E. Bozhinov, Assessment of solar photovoltaic potential of building rooftops based on multicriteria spatial analysis, *Tehnički glasnik*, Vol. 18, No. si1, pp. 29-36, 2024.

[4] F. Vecchi and U. Berardi, Solar analysis for an urban context from GIS to block-scale evaluations, *Energy Policy*, Vol. 184, pp. 113884, 2024.

[5] R. Kassner, W. Koppe, T. Schüttenberg, and G. Bareth, Analysis of the solar potential of roofs by using official LiDAR data, in *Proceedings of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 399-404, 2008.

[6] T. Santos, N. Gomes, M. Brito, S. Freire, A. Fonseca, and J. A. Tenedório, Solar potential analysis in Lisbon using LiDAR data, in *Proceedings of the 31st EARSeL Symposium and 35th General Assembly*, *Remote Sensing and Geoinformation*, Prague, Czech Republic: EARSeL, pp. 13-20, 2011.

[7] B. Adams, *Mapping Solar Energy Potential Through LiDAR Feature Extraction*, Woolpert, Dayton, OH, pp. 1-5, 2012.

[8] Y. Ko, The effect of urban trees on residential solar energy potential, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, Vol. 42, No. 1, pp. 41-49, 2014.

[9] M. B. Boz, K. Calvert, and J. R. Brownson, An automated model for rooftop PV systems assessment in ArcGIS using LIDAR, *AIMS Energy*, Vol. 3, No. 3, pp. 401-420, 2015.

[10] S. Akbariyan, H. Arefi, S. M. Ebrahimi, and S. Rahimi, Evaluation of methods for calculating solar potential on building roof surfaces using LiDAR data, in *Proceedings of the 2nd International Congress on Earth Sciences and Urban Development*, Tabriz, Iran, 2016. (in Persian)

[11] P. B. Dąbek and J. Jurasz, GIS estimated potential of rooftop PVs in urban areas—case study Wrocław (Poland), in *E3S Web of Conferences*, Vol. 45, pp. 00014, 2018.

[12] I. Prieto, J. L. Izkara, and E. Usobiaga, The application of LiDAR data for the solar potential analysis based on urban 3D model, *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 20, pp. 2348, 2019.

[13] F. Mansouri Kouhestani, J. Byrne, D. Johnson, L. Spencer, P. Hazendonk, and B. Brown, Evaluating solar energy technical and

economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 10, pp. 13-32, 2019.
[14] Z. Zhang, T. Zhong, M. Chen, Z. Zhou, Y. Wang, and K. Zhang, Estimation of rooftop solar potential using publicly available geodata and deep learning, *Proceedings of the Applied Energy Symposium 2020: Low Carbon Cities and Urban Energy Systems (CUE2020)*, Tokyo, Japan, pp. D128, 2020.
[15] J. E. Fuentes, F. D. Moya, and O. D. Montoya, Method for estimating solar energy potential based on photogrammetry from unmanned aerial vehicles, *Electronics*, Vol. 9, No. 12, pp. 2144, 2020.
[16] M. Hu, Z. Liu, Y. Huang, M. Wei, and B. Yuan, Estimation of rooftop solar photovoltaic potential based on high-resolution images and digital surface models, *Buildings*, Vol. 13, No. 11, pp. 2686, 2023.
[17] V. Adjiski, G. Kaplan, and S. Mijalkovski, Assessment of the solar energy potential of rooftops using LiDAR datasets and GIS based approach, *International Journal of Engineering and Geosciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 188-199, 2023.
[18] M. Aslani and S. Seipel, Rooftop segmentation and optimization of photovoltaic panel layouts in digital surface models, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 105, pp. 102026, 2023.
[19] G. Molnár, L. F. Cabeza, S. Chatterjee, and D. Ürge-Vorsatz, Modelling the building-related photovoltaic power production potential in the light of the EU's solar rooftop initiative, *Applied Energy*, Vol. 360, pp. 122708, 2024.
[20] B. Gui, L. Sam, and A. Bhardwaj, From roofs to renewables: deep learning and geographic information systems insights into a comprehensive urban solar photovoltaic assessment for Stonehaven, *Energy 360*, Vol. 1, pp. 100006, 2024.
[21] M. Cenky, J. Bendik, P. Janiga, and I. Lazarenko, Urban-scale rooftop photovoltaic potential estimation using open-source software and public GIS datasets, *Smart Cities*, Vol. 7, No. 6, pp. 3962-3982, 2024.
[22] Y. Chen, Y. Liu, M. Slootweg, M. Hu, A. Tukker, and W.-Q. Chen, Unlocking rooftop potential for sustainable cities: a systematic review, *Frontiers of Engineering Management*, Vol. 12, pp. 223-237, 2025.
[23] A. Idrovo-Macancela, M. Velecela-Zhindón, A. Barragán-Escandón, E. Zalamea-León, and D. Mejía-Coronel, GIS-based assessment of photovoltaic solar potential on building rooftops in equatorial urban areas, *Heliyon*, Vol. 11, No. 1, pp. e41425, 2025.
[24] A. Seif and T. Mahmoodi, Lidar sensors and its applications, *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, Vol. 23, No. 89, pp. 72-80, 2014. (in Persian)
[25] L. El Chaar and N. El Zein, Review of photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, pp. 2165-2175, 2011.
[26] D. N. Aedelia and D. S. Wijayanto, Analysis of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic efficiency on dual-axis solar tracker system based on Internet of Things, *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, Vol. 12, No. 9, pp. 2993-3002, 2025.
[27] H. Medi, Feasibility study on site selection for installing a small scale PV plant, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 102-112, 2021. (in Persian)
[28] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *2013–2014 U.S. Geological Survey CMGP LiDAR: Post Sandy (New York City)*, Accessed 15 July 2025; https://www.fisheries.noaa.gov/inport/item/49891.
[29] K. Ihsan, A. Sakti, A. Higuchi, H. Takenaka, D. Suwardhi, and K. Wikantika, Comparison of potential energy of solar radiation in rooftop modeling using different building levels of detail, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 48, pp. 115-120, 2023.
[30] A. M. Martín, J. Domínguez, and J. Amador, Applying LIDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review, *AIMS Energy*, Vol. 3, No. 3, pp. 326-343, 2015.
[31] A. Chow, *3D Solar Photovoltaic Community Energy Modeling*, Ph.D. dissertation, Environmental Applied Science & Management, Ryerson University, Toronto, Canada, 2020.
[32] H. Zhang, Y. Liu, L. Wang, and S. Wang, Regional rooftop PV output potential assessment based on airborne LiDAR for precise consumption analysis, *in Proceedings of the 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems (ICEEPS)*, IEEE, pp. 348-353, 2024.
[33] Q. Chen, Application of geographic information system in assessing rooftop photovoltaic potential, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, Vol. 69, pp. 361-367, 2023.
[34] M. Schlemminger, D. Bredemeier, A. Mahner, R. Niepelt, M. H. Breitner, and R. Brendel, Rooftop PV potential determined by backward ray tracing: a case study for the German regions of Berlin, Cologne, and Hanover, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 32, No. 12, pp. 912-929, 2024.
[35] B. O. Sigrin and M. E. Mooney, *Rooftop Solar Technical Potential for Low-to-Moderate Income Households in the United States*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2018.
[36] X. Huang, K. Hayashi, T. Matsumoto, L. Tao, Y. Huang, and Y. Tomino, Estimation of rooftop solar power potential by comparing solar radiation data and remote sensing data—a case study in Aichi, Japan, *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 7, pp. 1742, 2022.
[37] X. Song, Y. Huang, C. Zhao, Y. Liu, Y. Lu, Y. Chang, et al., An approach for estimating solar photovoltaic potential based on rooftop retrieval from remote sensing images, *Energies*, Vol. 11, No. 11, pp. 3172, 2018.
[38] F. Biljecki, G. B. Heuvelink, H. Ledoux, and J. Stoter, Propagation of positional error in 3D GIS: estimation of the solar irradiation of building roofs, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 29, No. 12, pp. 2269-2294, 2015.
[39] J. Gooding, H. Edwards, J. Giesekam, and R. Crook, Solar City Indicator: a methodology to predict city level PV installed capacity by combining physical capacity and socio-economic factors, *Solar Energy*, Vol. 95, pp. 325-335, 2013.
[40] R. Margolis, P. Gagnon, J. Melius, C. Phillips, and R. Elmore, Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities, *Environmental Research Letters*, Vol. 12, No. 7, pp. 074013, 2017.
[41] *New York Solar Panel Costs: 2024 Data*, Accessed 17 July 2025; https://www.energysage.com/local-data/solar-panel-cost/ny/.
[42] V. Ramasamy, J. Zuboy, E. O'Shaughnessy, D. Feldman, J. Desai, M. Woodhouse, P. Basore, R. Margolis, *US Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2022*, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2022.
[43] NYSERDA, *Residential Solar Incentives*, Accessed 17 July 2025; https://nysolarmap.com/financing-solar/incentives/residential/.
[44] M. S. Calvo and H. S. Lee, Advanced geospatial analytics and multi-objective optimization framework for national rooftop solar assessment: Cuba case study, *Energy Reports*, Vol. 14, pp. 254-267, 2025.