

## ارزیابی شاخص‌های تراکم شهری در امکان‌سنجی استفاده از پتانسیل انرژی خورشیدی با استفاده از GIS (مطالعه موردی منطقه ۴ اهواز)

کاظم رنگزن<sup>۱</sup>

نازنین قنبری<sup>۲</sup>

مصطفی کابلی زاده<sup>۳</sup>

پوریا مرادی<sup>۴</sup>

### چکیده

کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن و تاثیر آن بر روند گرمایش جهانی یکی از مهم‌ترین نتایج استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. در مناطق شهری، سیستم‌های خورشیدی مستقر در سقف‌های ساختمانی، مناسب‌ترین روش بهره‌گیری از منبع پایدار انرژی خورشید می‌باشد. تراکم یا فشردگی شهری یکی از پارامترهای فرم و شکل شهر است که دسترسی به انرژی تجدیدپذیر خورشیدی را در مناطق ساخته شده تحت تاثیر قرار می‌دهد، بنابراین ضروریست که اثرات تراکم شهری بر بهره‌گیری ساختمان‌ها از انرژی خورشید بررسی شود. هدف این مطالعه ارزیابی پتانسیل انرژی خورشید در مناطق شهری و تعیین ارتباط بین شاخص‌های تراکم شهری و پتانسیل انرژی

<sup>۱</sup>. دانشیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز  
<sup>۲</sup>. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز (نویسنده مسئول)

Email: [ghanbari\\_nazanin70@yahoo.com](mailto:ghanbari_nazanin70@yahoo.com)

<sup>۳</sup>. استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز  
<sup>۴</sup>. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

خورشید در مقیاس محلی می‌باشد. در این مطالعه مدل‌سازی تابش سالیانه خورشید برای هر یک از سطوح ساختمانی منطقه مورد مطالعه، در طول یک سال، با استفاده از مدل Solar Analyst انجام گردید. از طرف دیگر ارتباط بین چندین شاخص تراکم شهری از جمله شاخص‌های پوشش سایت، نسبت طرح، نسبت حجم-سطح، آنتروپی، تراکم جمعیت و تراکم ساختمانی با تابش سالیانه رسیده به منطقه مورد مطالعه بحث شد و با استفاده از مدل رگرسیونی حداقل مربعات، روابط بین تابش خورشید و شاخص‌های تراکم شهری مشخص گردید. همچنین پتانسیل استفاده از دو نوع سیستم خورشیدی فعال شامل سیستم‌های یکپارچه فتوولتائیک ساختمانی (PV) و کلکتورهای حرارتی خورشیدی (STC) ارزیابی شد. طبق نتایج میزان تابش سالیانه خورشیدی از ۵۰۷ (در نواحی فشرده) تا ۷۴۱ (در نواحی پراکنده) کیلو وات ساعت بر متر مربع افزایش پیدا می‌کند. شاخص نسبت حجم-سطح بیشترین ضریب تعیینی،  $R^2$  برابر با ۰/۸۰۵ را با تابش سالیانه خورشید نشان می‌دهد. همچنین در منطقه مورد مطالعه پتانسیل سقف‌های ساختمانی جهت توسعه سیستم‌های PV خیلی بیشتر از سیستم‌های STC تحت تاثیر درجه فشردگی شهری می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** آنتروپی، انرژی تجدیدپذیر، تراکم شهری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، فتوولتائیک، کلکتورهای حرارتی خورشیدی

## مقدمه

امروزه نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند که حدود ۷۵ درصد از منابع جهانی را استفاده می‌نمایند (لی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶: ۷۴۹). مناطق شهری در دهه‌های گذشته گسترش زیادی یافته‌اند و به احتمال زیاد در دهه‌های آینده این روند ادامه خواهد داشت (مهاجری و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶: ۴۶۹). با افزایش جمعیت و نگرانی‌های زیست محیطی، تقاضای انرژی‌های کارآمد برای این سکونتگاه‌های شهری به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (رامیرز و لوپز<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲، پاناوو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). بخش ساختمان یکی

<sup>۱</sup>. Lee et al

<sup>۲</sup>. Mohajeri et al

<sup>۳</sup>. Ramirez & Lopez

از عمده‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده انرژی است و به همین سبب لازم است توجه ویژه‌ای به مقوله بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان مبذول نمود. از نقطه نظر کلی می‌توان گفت که با آگاه ساختن مردم و تدوین قوانین مناسب می‌توان گام موثری در جهت بهبود مصرف سوخت در ساختمان‌ها برداشت، اما جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به طور اعم به جای سوخت‌های فسیلی که عمده‌ترین منبع تامین انرژی در کشورمان محسوب می‌شوند، راه حلی است که مشخصه اصلی آن، آینده‌نگری و رعایت توأمان حقوق نسل‌های فعلی و آتی است (پایگاه کتاب تخصصی انرژی، ۱۳۹۵). انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر با بیشترین پتانسیل است و می‌تواند بزرگ‌ترین منبع برق در جهان تا سال ۲۰۵۰ باشد. با توجه به نقشه راه آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۴، فتوولتائیک خورشیدی و انرژی حرارتی خورشیدی می‌تواند تا سال ۲۰۵۰، به ۲۷ درصد از تولید جهانی برق کمک کند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۱۴). در میان تمام منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در دسترس در بافت شهری (مانند انرژی خورشیدی، باد و زمین گرمایی) انرژی خورشیدی محبوب‌ترین است و مطالعات فراوانی در مورد آن انجام شده است (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۹). یکی از مزایای بسیار آشکار انرژی خورشیدی این است که محل منبع انرژی معمولاً همان مکان استفاده انرژی است. منظور از کاربرد انرژی خورشیدی در ساختمان‌ها بهره‌گیری هر چه بهتر از انرژی خورشید در جهت تأمین نیازهای گرمایی و سرمایی و الکتریسیته ساختمان‌ها می‌باشد (پایگاه کتاب تخصصی انرژی، ۱۳۹۵). این امر به ویژه در مناطق شهری، که در آن پوشش ساختمان‌ها، دیوارها و سقف، برای گرفتن انرژی خورشیدی و تبدیل آن به گرما یا انرژی حرارتی و برق استفاده می‌شوند، قابل اجرا می‌باشد (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۹). از این رو تعیین پتانسیل انرژی خورشید و فناوری‌های موجود برای استفاده از انرژی خورشید در مناطق شهری، کمک شایانی به پیشبرد این مهم خواهد داشت. در دهه‌های اخیر نمونه‌های بسیاری از تحقیقات در زمینه تعیین پتانسیل خورشیدی شهرها برای سیستم‌های فعال و غیرفعال انجام شده است. سیستم‌های خورشیدی فعال از دستگاه-های مکانیکی و الکتریکی برای تبدیل تابش خورشیدی به گرما و برق استفاده می‌کنند. در

---

<sup>1</sup> . Panao et al

مقابل سیستم‌های خورشیدی غیر فعال، از طراحی ساختمان برای به تصرف درآوردن گرمای خورشید بهره می‌برند تا مصرف انرژی را برای گرمایش و سرمایش فضا کاهش دهند (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۹). مطالعات بسیاری در زمینه تأثیرات فرم شهری بر روی پتانسیل انرژی خورشیدی در مقیاس‌های ساختمانی تا شهری و ناحیه‌ای انجام شده است (مونتاون<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰، پسنلنر و مهدوی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳، کانتز و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۴، ویجینتون و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰). لی و همکاران روشی برای ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در مقیاس شهری و ارتباط بین تراکم ساختمانی و طراحی شهری با استفاده از برنامه‌های شبیه‌سازی فراهم کرده‌اند. براساس نتایج این تحقیق دسترسی به انرژی خورشیدی سقف‌ها و نماهای ساختمانی به تراکم ساختمان‌ها مرتبط است (لی و همکاران، ۲۰۱۶: ۷۵۵). سارالد و همکاران<sup>۵</sup> در پژوهش خود از مدل‌های آماری برای کشف روابط بین شاخص‌های فرم شهری و پتانسیل انرژی خورشیدی در منطقه شهری لندن بهره برده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که با بهینه‌سازی متغیرهای فرم شهری، تابش خورشیدی از سقف‌های ساختمانی تا ۹ درصد و از نماهای ساختمانی تا ۴۵ درصد افزایش می‌یابد (سارالد و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۶). لی و همکاران<sup>۶</sup> در مطالعه‌ای تأثیر سه پارامتر نسبت ابعاد ساختمان، آزیموت و پوشش سایت را در پتانسیل انرژی خورشیدی ساختمان‌ها ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش نسبت ابعاد ساختمان و پوشش سایت منجر به افزایش پتانسیل انرژی خورشیدی می‌شود. علاوه بر این دامنه‌های از آزیموت‌های ساختمانی را بدست آورده‌اند که تحت آن‌ها عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک افزایش می‌یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۳۳). نالت و همکاران تأثیرات فرم شهری بر روی پتانسیل انرژی خورشید، برای ساختمان‌های جدید در فاز اولیه طراحی را، بررسی کرده‌اند و تأکیدی بر تجدیدنظر و تعریف فاز اولیه طراحی محلات شهری دارند (نالت و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۵: ۶۹۰). اگرچه تراکم شهری در

<sup>۱</sup>- Montavon

<sup>۲</sup>- Pessenlehner & Mahdavi

<sup>۳</sup>- Kanters et al

<sup>۴</sup>- Wiginton et al

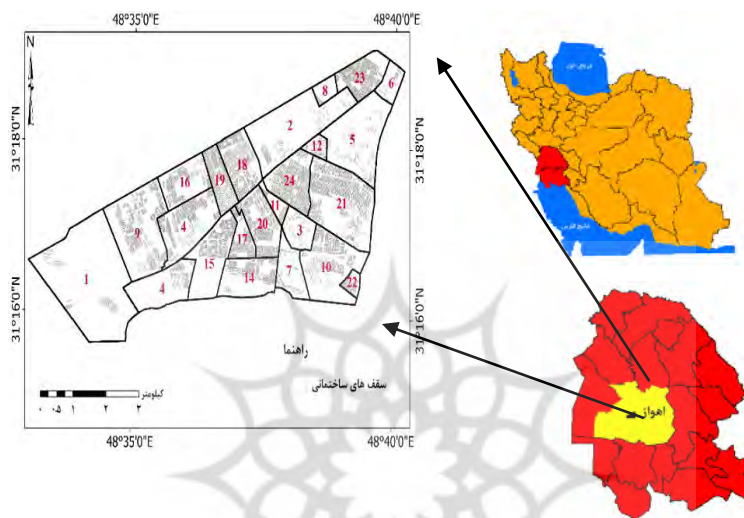
<sup>۵</sup>- Sarralde et al

<sup>۶</sup>- Li et al

<sup>۷</sup>- Nault et al

مطالعات بسیاری و به روش‌های مختلفی بدست آمده است ولی اطلاعات کمی در مورد تاثیرات آن بر پتانسیل خورشیدی ساختمان‌ها وجود دارد. علاوه براین، کارآمدترین فناوری برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در سقف‌های ساختمانی مناطق شهری را نمی‌دانیم (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۷۰). در این مطالعه تاثیرات تراکم شهری بر روی پتانسیل خورشیدی با توجه به فن‌آوری‌های فعال انرژی خورشیدی در سطح منطقه ۴ شهرستان اهواز، بررسی شده است. در این منطقه با توجه به روند رو به افزایش انبوه‌سازی و ساخت مجتمع‌های مسکونی، استفاده از انرژی طبیعی خورشید در ساختمان‌ها ضروری است و از طرفی طراحی تراکم شهری باید به صورت سازگار و هماهنگ با طرح‌های خورشیدی باشد. این تحقیق بر تعیین پتانسیل تکنولوژی‌های خورشیدی فعال، در ارتباط با سقف‌های ساختمانی متمرکز است. هدف اصلی تحقیق حاضر این است که با توجه به اطلاعات بدست آمده از روابط بین مورفولوژی شهری و پتانسیل خورشیدی، کمک به ایجاد شهری کند که برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مناسب باشد. جهت تعیین توزیع تابش خورشید در منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی انرژی خورشیدی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، انجام گردید. چندین شاخص تراکم شهری، برای ارزیابی در دسترس بودن پتانسیل خورشید در ۲۴ محله‌ی منطقه مورد مطالعه بکار برده شده است.

منطقه مورد مطالعه: شهرستان اهواز بین ۴۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۰ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۵ دقیقه از خط استوا قرار گرفته است (سازمان مدیریت و برنامه ریزی خوزستان، ۱۳۹۰). منطقه چهار اهواز به عنوان محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (شکل ۱). موقعیت منطقه چهار بر اساس طرح جامع به این شرح است: این منطقه از شمال به ریل راهنمایی و رانندگی، از شرق به رودخانه کارون، از جنوب به میدان شهید بقایی و از غرب به ریل قطار اهواز- خرمشهر محدود می‌شود. این منطقه دارای ۵ ناحیه خدماتی و ۴ ناحیه فضای سبز می‌باشد (آمارنامه شهرداری اهواز، ۱۳۹۲) که قسمت جنوب غربی شهرستان اهواز را تشکیل می‌دهد.



شکل (۱) نقشه منطقه مورد مطالعه به همراه ساختمان‌های موجود

### مبانی نظری پژوهش

تراکم یا فشردگی شهری<sup>۱</sup> یکی از رایج‌ترین شاخص‌های شکل شهر می‌باشد. پارامترهای بسیاری به‌وسیله محققان معرفی شده‌اند که می‌توانند شاخص‌هایی از ویژگی‌های شهری باشند. در این مطالعه، برخی از این شاخص‌های تراکم شهری برای تعیین فرم شهری منطقه در مقیاس محلی، بکار برده شده است. شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد:

(۱) نسبت حجم-سطح<sup>۲</sup>: عبارت است از حجم کل ساختمان‌ها در یک محله تقسیم بر مساحت کل محله. این شاخص نشان‌دهنده ارتفاع ساختمان‌هاست و ارائه‌ای سه بعدی از

<sup>۱</sup>- Urban Compactness

<sup>۲</sup>- Volume - Area ratio

تراکم می‌باشد، ۲) پوشش سایت<sup>۱</sup>: عبارت است از کل مساحت ساخته شده در یک محله تقسیم بر مساحت کل محله. این شاخص ارائه دو بعدی از تراکم می‌باشد و توزیع افقی اشکال ساخته شده در مکان را نشان می‌دهد. هرچه این شاخص بیشتر باشد، فضای باز موجود کمتر است، ۳) نسبت طرح<sup>۲</sup>: عبارت است از مساحت کل طبقات در یک محله تقسیم بر مساحت کل محله، ۴) تراکم ساختمانی: عبارت است از تعداد کل ساختمان‌ها در یک محله تقسیم بر مساحت کل محله. تراکم ساختمانی نشان‌دهنده توزیع ساختمان‌ها در کل محله می‌باشد، ۵) تراکم جمعیت: عبارت است از تعداد کل افراد ساکن در یک محله تقسیم بر مساحت کل آن محله. این شاخص نشان‌دهنده توزیع جمعیت در کل محله است و ۶) آنتروپی<sup>۳</sup>: دیگر شاخص تراکم شهری که مهاجری و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در پژوهش خود از آن بهره بردند، آنتروپی می‌باشد (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۷۱). آنتروپی (S)، یک مفهوم اساسی در فیزیک آماری (و ترمودینامیک کلاسیک) و تئوری اطلاعات است (بایرلین<sup>۴</sup>، ۱۹۷۱، نلسون<sup>۵</sup>، ۲۰۰۶، ولکنستین<sup>۶</sup>، ۲۰۰۹). در فیزیک آماری و تئوری اطلاعات، آنتروپی بر اساس احتمال است و در نتیجه می‌تواند برای تجزیه و تحلیل احتمال توزیع اندازه ساختمان، از جمله مساحت، محیط، حجم مورد استفاده قرار گیرد (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۳). معادله زیر که معادله آنتروپی شانون-گیس<sup>۷</sup> نام دارد، آنتروپی را برای توزیع کلی احتمالات، به ما می‌دهد، که در این رابطه t تعداد کلاس‌ها با احتمال غیر صفر اندازه ساختمانی و  $P_i$  احتمال اندازه ساختمان متعلق به کلاس i ام می‌باشد:

$$S = -K \sum_{i=1}^t P_i \ln P_i \quad (\text{معادله ۱})$$

<sup>3</sup>- Site coverage

<sup>4</sup>- Plot ratio

<sup>1</sup>- Entropy

<sup>2</sup>- Baierlein

<sup>3</sup>- Nelson

<sup>4</sup>- Volkenstein

<sup>8</sup>- Shannon-Gibbse

### مدل رقومی ارتفاع<sup>۱</sup>

مدل رقومی ارتفاع مجموعه‌ای از داده‌های رقومی می‌باشد که در تهیه مدل توپوگرافیک سطح زمین به کار می‌رود. بدین معنا که پدیده‌های سطح زمین را به صورت مدل‌های واقعی یا فرضی می‌سازد. فرمت‌های قابل استفاده برای DEM، در حالت رستری، شبکه سلولی منظم است که برای هر سلول مقدار ارتفاع موجود است و در حالت برداری مجموعه مشاهدات نقطه‌ای منظم است که هر نقطه دارای مختصات جغرافیایی (X و Y) و مقدار ارتفاع (Z) می‌باشد (قهرودی تالی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۵۹). در این تحقیق از مدل رقومی سطح به عنوان یکی از ورودی‌های مدل‌سازی تابش خورشید، استفاده شده است.

### مدل Solar Analyst

تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین بسیار قابل توجه و تغییرپذیر است. عوامل زیادی موجب این تغییرات می‌شوند. برای مثال، تغییرات فصلی در شدت تابش، سایه حاصل از توپوگرافی‌های مجاور، ویژگی‌های سطح و بطور خاص در مناطق شهری، ویژگی‌های ساختمان از قبیل اندازه سقف، شیب و جهت‌گیری، معمولاً مقدار نهایی تابش خورشیدی رسیده به سقف‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، آب و هوا و دیگر شرایط اتمسفری بر مقدار تابش نهایی خورشیدی اثرگذار است. به منظور محاسبه این عوامل و برآورد پتانسیل تابش خورشیدی برای مکانی خاص، فو و ریچ<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) الگوریتم میدان دید نیمکره‌ای به سمت بالا<sup>۳</sup> را که مبتنی بر GIS می‌باشد، ارائه کردند (فو و ریچ، ۲۰۰۰: ۳۵۸). مدل Solar Analyst، تابش جهانی یا تابش کل و تابش‌های مستقیم و پراکنده را به صورت جداگانه محاسبه می‌کند. این محاسبات می‌توانند هم برای نقاط و هم نواحی خاص انجام شوند. این مدل با استفاده از الگوریتم میدان دید نیمکره‌ای، توسعه داده شده است که تابش هر سلول یک رستر ارتفاعی را در یک دوره زمانی و یک موقعیت مشخص محاسبه

<sup>۱</sup> . Digital Elevation Model: DEM

<sup>۲</sup> . Fu & Rich

<sup>۳</sup> . Upward-looking Hemispherical Viewshed Algorithm



می‌کند. در کنار مدل ارتفاعی که یکی از ورودی‌های این مدل می‌باشد، کسر پخشیده<sup>۱</sup> و تراگسیلایی جوی<sup>۲</sup> نیز باید مشخص باشند (فو و ریچ، ۱۹۹۹: ۱۰). اجرای این مدل برای تمام سلول‌های رستر ارتفاعی از طریق ۵ مرحله زیر قابل انجام است:

۱. محاسبه سایه‌نما<sup>۳</sup>: منظور از سایه نما در یک نقطه، توزیع زاویه‌ای قابلیت دید آسمان در مقابل موانع موجود بر سر راه تابش برای رسیدن به نقطه موردنظر است (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۹۹۴: ۱۹). ۲- محاسبه نقشه خورشید<sup>۴</sup>: نقشه خورشیدی یک نمایش رستری است که نمایانگر مسیر حرکت خورشید در زمان‌های متفاوت می‌باشد. نقشه خورشید برای محاسبه تابش مستقیم به کار می‌رود (فو و ریچ، ۱۹۹۹: ۸). ۳- محاسبه نقشه آسمان<sup>۵</sup>: نقشه آسمان یک نقشه رستری است که با تقسیم آسمان به قطعات کوچک تر و با در نظر گرفتن زوایای سمت الرأس خورشیدی ساخته می‌شود (سبزی‌پرور و همکاران، ۲۰۰۱: ۳۹۴). نقشه آسمان برای محاسبه تابش پراکنده به کار می‌رود. ۴- هم‌پوشانی نقشه سایه‌نما با نقشه‌های خورشید و آسمان: زمانی که سایه‌نما، نقشه خورشید و نقشه آسمانی محاسبه شدند، هم‌پوشانی انجام می‌شود. در نهایت محاسبه میزان تابش پراکنده و مستقیم دریافت شده بوسیله یک موقعیت مشخص بر روی مدل رقومی ارتفاعی نتیجه حاصل از این مرحله می‌باشد (وانگ و بیل<sup>۶</sup>، ۲۰۱۶: ۳۹). ۵- جمع تابش‌های مستقیم و پراکنده و محاسبه تابش کل خورشید<sup>۷</sup>: بعد از محاسبات چهار مرحله گفته شده، خروجی‌ها برای محاسبه میزان تابش کل دریافت شده بوسیله یک موقعیت مشخص بر روی مدل رقومی ارتفاعی بکار می‌روند و یک نقشه تابش

<sup>۳</sup>- Diffuse Radiation Proportion

<sup>۴</sup>- Atmospheric Transmittivity

<sup>۵</sup>- Viewshed

<sup>۶</sup>- Sun map

<sup>۷</sup>- Sky map

<sup>۱</sup>- Wang & Bill

<sup>۲</sup>- Global solar radiation

خورشیدی برای کل منطقه ایجاد می‌شود. تابش خورشیدی کل یا تابش جهانی خورشید مجموع تابش مستقیم و پراکنده تمام بخش‌ها می‌باشد (ESRI, 2014).

### سیستم‌های فعال خورشیدی

با توجه به محدودیت‌های انرژی فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آن، طراحی و اجرای ساختمان‌هایی که بتوانند از انرژی خورشیدی حداکثر استفاده را ببرند، از اهمیت زیادی برخوردار است. با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به دو روش سیستم‌های فعال و غیرفعال می‌توان نیازهای ساختمان‌ها را در این زمینه تامین نمود. به طور عمده دو نوع سیستم فعال استفاده می‌شود: ۱- سیستم‌های یکپارچه فتوولتائیک ساختمانی<sup>۱</sup> و ۲- کلکتورهای حرارتی خورشیدی<sup>۲</sup>. در مناطق شهری فضاها مناسب برای نصب این سیستم‌ها، شامل سقف‌ها، نماها و دیگر موقعیت‌های ساختمانی که به خوبی در معرض تابش خورشید قرار دارند، می‌باشد (وانگ و بیل، ۲۰۱۶: ۱۱). سیستم‌های فتوولتائیک از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند: ۱- ماژول یا پنل‌های خورشیدی که مبدل انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی می‌باشد، ۲- قسمت واسطه یا بخش توان مطلوب، که این بخش انرژی الکتریکی حاصل از سیستم‌های فتوولتائیک را بر اساس طراحی انجام شده، متناسب با نیاز مصرف کننده، مدیریت و القا می‌نماید و ۳- مصرف کننده یا بار الکتریکی که کلیه مصرف کنندگان الکتریکی اعم از مصارف برق مستقیم را متناسب با میزان مصرف شامل می‌گردد (سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۸۷: ۴). کلکتورهای حرارتی خورشیدی، جذب کننده‌های انرژی خورشیدی هستند که در آن‌ها انرژی تشعشعی خورشیدی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. در اغلب این سیستم‌ها، حرارت جذب شده توسط کلکتور به یک سیال انتقال داده می‌شود (پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۹۵).

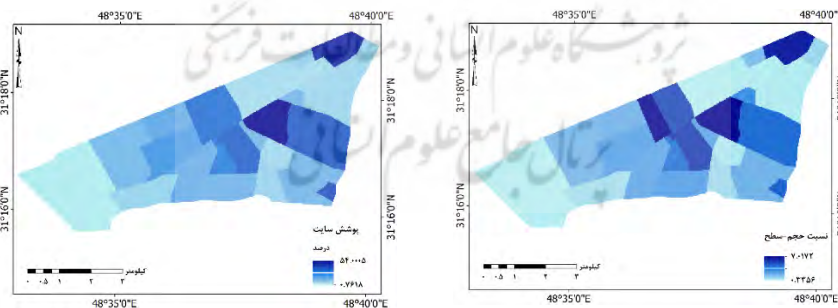
<sup>3</sup>- Building Integrated Photovoltaic systems: BiPV or PV

<sup>4</sup>- Solar Thermal Collectors: STC

## مواد و روش‌ها

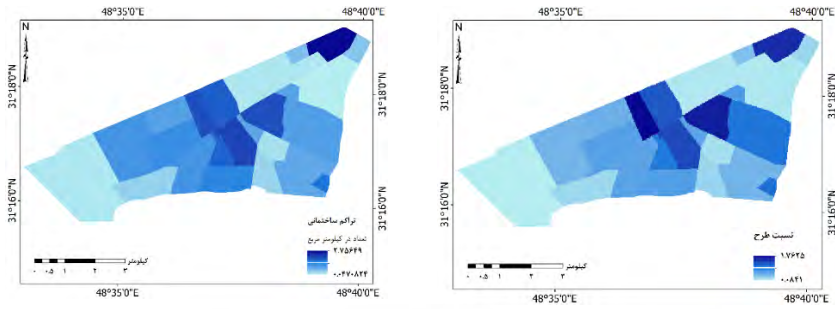
اساس روش تحقیق این پژوهش توصیفی - تحلیلی و نوع آن کاربردی است. داده‌های مورد نیاز شامل نقشه‌های ممیزی املاک مطالعات طرح جامع شهر اهواز، اطلاعات جمعیتی به تفکیک بلوک‌های ساختمانی و نقشه کاربری اراضی شهری می‌باشد. جهت ارزیابی شاخص‌های تراکم شهری در امکان‌سنجی استفاده از پتانسیل انرژی خورشیدی، ابتدا داده‌های مورد نیاز در این مقاله جمع‌آوری شد و سپس بر اساس این اطلاعات لایه‌های شاخص‌های تراکم بدست آمد. نتایج این پژوهش با تحلیل لایه‌های تراکم شهری و روابط آماری بین آن‌ها بدست آمده است.

شاخص‌های تراکم شهری: در این مطالعه شاخص‌های نسبت حجم به سطح، پوشش سایت، نسبت طرح، تراکم ساختمانی و تراکم جمعیت با استفاده از داده‌های مکانی موجود و نرم افزار ArcGIS10.3 برای ۲۴ محله‌ی منطقه مورد مطالعه محاسبه شدند. این داده‌های مکانی که عمدتاً اطلاعات حاصل از طرح جامع ممیزی املاک منطقه ۴ اهواز می‌باشند، شامل داده‌های مربوط به ساختمان‌های منطقه، داده‌های کاربری اراضی و اطلاعات جمعیتی منطقه ۴ می‌باشند. همه این شاخص‌ها، یک اندازه‌گیری از درجه فشردگی هستند و جنبه‌های مختلف پیکربندی شهری را نشان می‌دهند (شکل ۲).



ب

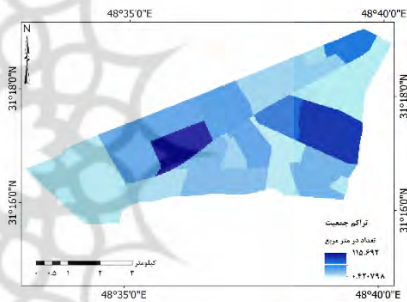
الف



ت

ب

شکل (۲) تغییرات شاخص‌های الف)نسبت حجم-  
سطح، ب)پوشش سایت، پ)نسبت طرح، ت)تراکم  
ساختمانی و ث) تراکم جمعیت در ۲۴ محله



ث

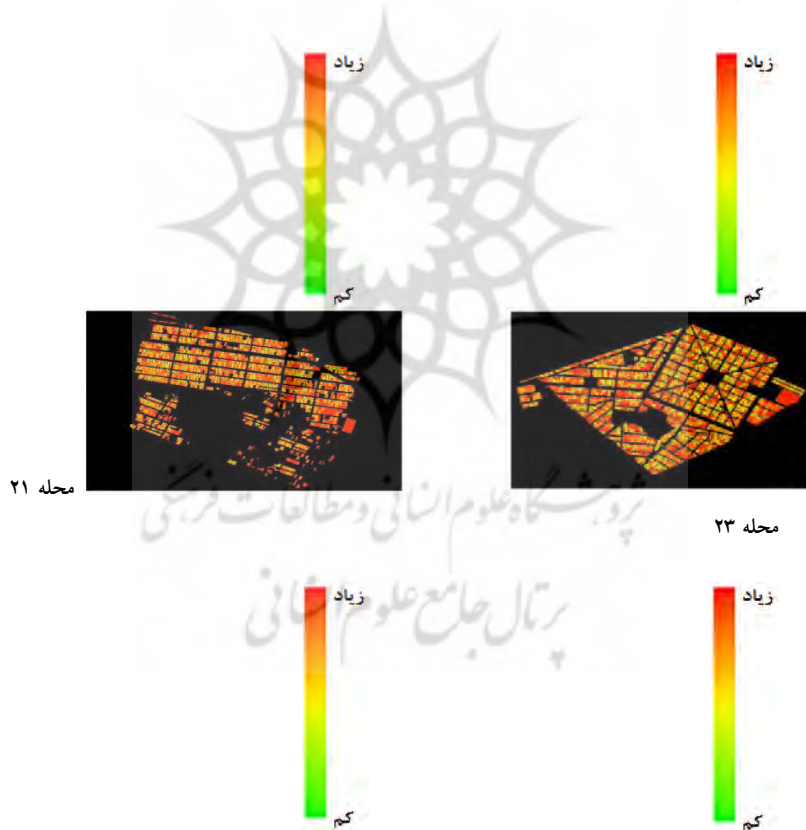
شاخص‌های تراکم تغییراتی در مقادیرشان در منطقه، بین ۲۴ محله نشان می‌دهند، ولی هنوز بسیاری از شاخص‌ها به طور هماهنگ تغییر می‌کنند. برای مثال شاخص‌های پوشش سایت، نسبت طرح و نسبت حجم-سطح دارای مقدار بالای خود در زون ۱۹ و ۲۴ و همین-طور کمترین مقدار خود در زون ۱ هستند. تراکم ساختمانی در منطقه از ۰/۰۴۷ تا ۲/۷۵ ساختمان در هر کیلومتر مربع در تغییر است و زون‌های ۵ و ۲۳ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار می‌باشند. با توجه به نقشه تراکم جمعیت زون‌های ۵، ۶ و ۲۲ کمترین و ۲۱ و ۲۴ بیشترین تراکم جمعیت را دارند.

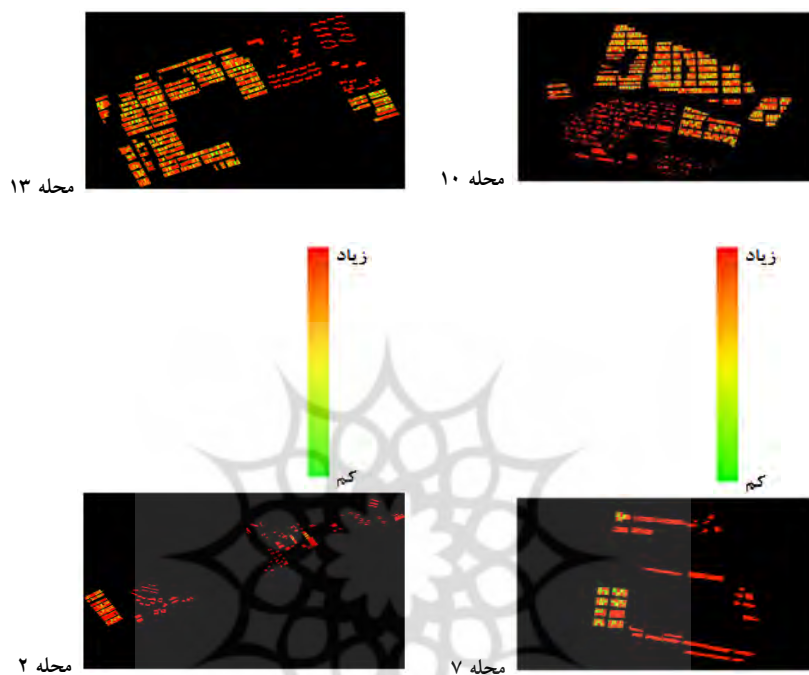
ایجاد مدل رقومی سطح: در مناطق شهری، ارزیابی انرژی تابش خورشیدی نیاز به اطلاعات جزئی از ساختمان‌ها و سطوحی دارد که برای نصب سیستم‌های خورشیدی مناسب می‌باشند. توسعه سریع تکنولوژی‌های جغرافیایی، ابزارهای بسیاری را برای تولید موثر مدل‌های سه بعدی شهری در اختیار قرار داده است. تکنولوژی کنونی GIS، تعداد زیادی از روش‌ها و ابزارهای تهیه یک مدل واقع‌گرایانه شهری را فراهم آورده است که می‌توانند در تخمین پتانسیل انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه نرم‌افزار ArcGIS برای تولید یک مدل مناسب از منطقه شهری مورد مطالعه به کار برده شد. این مدل در طی مراحل زیر ایجاد شد: ۱- جمع‌آوری داده‌ها از جمله اطلاعات دقیق بلوک‌های ساختمانی به همراه فیلدهای توصیفی آن‌ها؛ داده‌های ساختمانی منطقه ۴ اهواز از طرح جامع ممیزی املاک منطقه ۴ تهیه شد. ۲- شناسایی و تعیین نواحی سقف‌های ساختمانی با استفاده از داده‌ها و نقشه‌های موجود و بهره‌گیری از ابزارهای GIS، ۳- تولید یک مدل رقومی سطح از منطقه مورد مطالعه؛ داده‌های جمع‌آوری شده حاوی ارتفاع ساختمان‌ها به صورت یک فیلد توصیفی می‌باشند. در این مطالعه، داده‌های برداری ارتفاع ساختمان‌ها به فرمت رستر تبدیل شد.

### یافته‌ها و بحث

مدل‌سازی تابش خورشید: مدل رقومی سطح برای تجزیه و تحلیل فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور برآورد دقیق تابش خورشیدی برای منطقه مورد مطالعه، نقشه تابش خورشیدی با رزولوشن بالا، با استفاده از ماژول Area Solar Radiation موجود در ArcGIS 10.3 محاسبه شده است. مهم‌ترین ورودی‌های این مدل، مدل ارتفاعی حاصل از مرحله قبل، ضریب انتقال جوی و نسبت تابش پراکنده شده می‌باشد. در این مدل میدان‌های دید نیمکره‌ای با استفاده از توپوگرافی‌های اطراف، برای هر نقطه بر روی سطح رستری ایجاد شد. این میدان‌های دید بر روی نقشه‌های خورشیدی و آسمان قرار گرفتند. سپس تابش کلی رسیده (مستقیم+ پراکنده) به هر سلول سطح در یک دوره زمانی مشخص، در این جا یک سال، بدست آمد. در نهایت این فرآیند برای تمام سلول‌ها در رستر تکرار شد.

نقشه‌های شبکه‌ای حاصل شامل ۱۲ نقشه ماهانه و یک نقشه مجموع سالیانه تابش افقی جهانی برای منطقه ۴ می‌باشند. در این تحقیق، مقادیر پیش‌فرض ۰/۵ برای انتقال جوی و مقدار ۰/۳ برای نسبت تابش پراکنده شده، استفاده شده است. شکل ۳ تابش سالیانه خورشید برحسب  $\text{kwh m}^{-2}$  برای ۲۴ محله‌ی منطقه ۴ را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج اصلی در رابطه با تابش افقی جهانی بر سقف‌های ساختمانی و همچنین سیستم‌های فعال برای تبدیل تابش خورشیدی به الکتریسیته و گرما در سطح سقف‌ها، برای ۲۴ محله در کل منطقه ۴ بحث شده است.



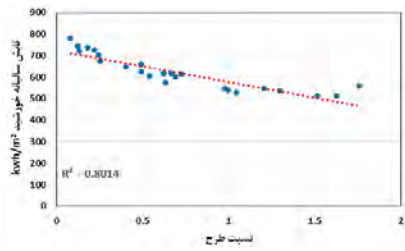


شکل (۳) نمونه‌ای از محاسبه تابش سالیانه خورشید بر حسب  $\text{kwh m}^{-2}$  برای ۶ محله از منطقه ۴ اهواز

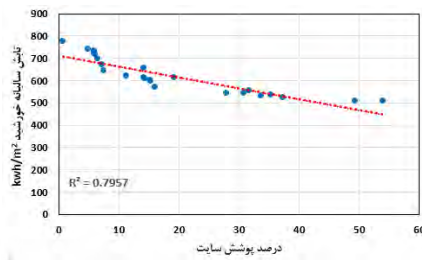
تابش سالیانه خورشید و شاخص‌های تراکم شهری: در این‌جا پنج شاخص پوشش سایت، نسبت طرح، نسبت حجم-سطح، تراکم جمعیت و تراکم ساختمانی با تابش سالیانه رسیده به ۲۴ محله‌ی منطقه ۴ مقایسه شده است. با استفاده از مدل رگرسیونی حداقل مربعات، روابط بین تابش خورشید و شاخص‌های تراکم شهری مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهند که همبستگی خطی قوی و منفی بین پوشش سایت، نسبت طرح و نسبت حجم-سطح با تابش سالیانه خورشید ( $\text{Kwh m}^{-2}$ ) وجود دارد. همه این شاخص‌ها، معیاری از فشردگی هستند به این معنی که مقدار بالای آن‌ها، میزان بالای فشردگی در محله را نشان می‌دهد (شکل ۴). اگرچه هرکدام از این شاخص‌ها، به جنبه‌های مختلفی از فرم ساختمانی اشاره دارند. ضریب تعیینی،  $R^2$  بین شاخص‌ها و تابش خورشید از ۰/۲۸ (تراکم جمعیت) تا

۰/۸۰۵ (نسبت حجم-سطح) تغییر می‌کند. بنابراین ۲۸ تا ۸۰ درصد از تابش خورشیدی دریافت شده در منطقه مورد مطالعه می‌تواند با تغییر در این شاخص‌ها در ارتباط باشد و یا براساس این شاخص‌ها پیش‌بینی شود. به‌طور کلی نواحی با ساختار فشرده (مانند محله ۲۳) انرژی خورشیدی کمتری را نسبت به نواحی با ساختار غیرمتراکم (مانند محله ۷) دریافت می‌کنند. این امر به دلیل تأثیرات سایه ناشی از ساختمان‌های مجاور می‌باشد. شاخص نسبت حجم-سطح بهترین همبستگی را با تابش سالیانه خورشید نشان می‌دهد. شاخص دیگری که با پتانسیل انرژی خورشیدی مورد مقایسه قرار گرفت، تراکم ساختمانی در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که هرچه تراکم ساختمانی افزایش یابد، تابش خورشیدی کم می‌شود. این به آن معناست که نواحی با ساختار فشرده‌تر، تابش کمتری را دریافت می‌کنند. سایه حاصل از ساختمان‌های نواحی متراکم به همراه تراکم بالای ساختمانی، دسترسی به سطوح مناسب برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی را محدود می‌کند. ضریب تعیینی بین میزان تابش خورشید و تراکم ساختمانی ۰/۷۷ است. بنابراین ۷۷ درصد از تغییر تابش خورشید می‌تواند مربوط به تغییر در تراکم ساختمانی باشد. با مقایسه شاخص تراکم جمعیت و تابش سالیانه خورشید، مشخص شد که هرچه تراکم جمعیت بیشتر باشد، میزان تابش خورشیدی کمتر می‌شود. از آنجایی که ضریب تعیینی بین تراکم جمعیت و تابش سالیانه خورشید به نسبت کم است (۰/۲۸)، می‌توان نتیجه گرفت که تراکم جمعیت شاخصی قابل اعتماد برای تعیین پتانسیل خورشیدی نیست. از این پنج شاخص، چهار شاخص تأثیر واضحی بر میزان تابش خورشیدی رسیده دارند. در ادامه تأثیرات شاخص آنتروپی شهری بر تابش خورشیدی بحث شده است.

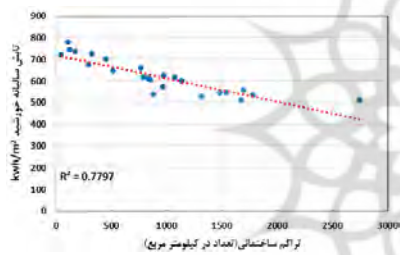




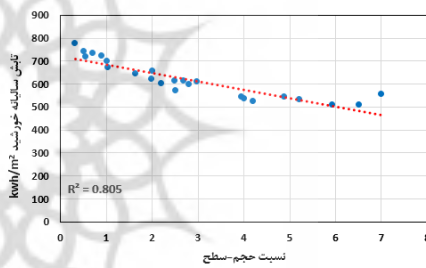
ب



الف

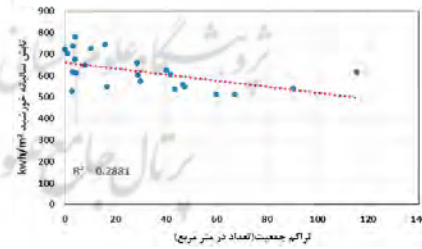


ت



پ

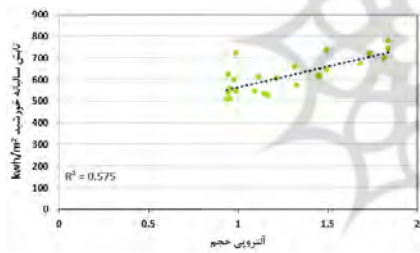
شکل (۴) تابش سالیانه خورشید ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) در مقابل الف) پوشش سایت، ب) نسبت طرح، ب) نسبت حجم-سطح، ت) تراکم ساختمانی و ن) تراکم جمعیت برای ۲۴ محله



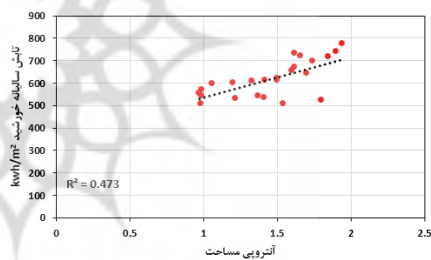
ث

پتانسیل انرژی خورشیدی و آنتروپی شهری: همان‌طور که ذکر شد، آنتروپی معیار کمی توزیع اندازه‌های ساختمانی مثل مساحت، حجم و محیط است. آنتروپی در علم فیزیک

آماري و تئوري اطلاعات، معيار پراکندگي يا گسترش است که ناشی از شکل توزیع احتمال مربوطه می‌باشد. در این مطالعه، آنتروپی، معيار پراکندگي يا گسترش توزیع احتمال هندسه ساختمانی است. مقادير آنتروپی برای این سه ویژگی ساختمانی براساس معادله ۱ محاسبه شده است. مقادير میانگین پارامترهای مساحت، حجم و محیط در ۲۴ محله، همبستگی خطی با آنتروپی را نشان می‌دهند. به آن معنا که مقادير بالاتر میانگین مساحت، حجم و محیط، مقادير بالاتر آنتروپی را به دنبال دارند. نتایج نشان داد که هرچه آنتروپی این ویژگی‌ها در یک محله بیشتر باشد، پراکندگي بیشتر و تابش سالیانه دریافت شده توسط ساختمان‌های آن محله نیز بیشتر است (شکل ۵). همبستگی خطی مثبت بین آنتروپی این ویژگی‌ها و میزان تابش دریافتی خورشید وجود دارد. مقادير ضریب تعیینی از ۰/۴۷ تا ۰/۵۷ تغییر می‌کند.

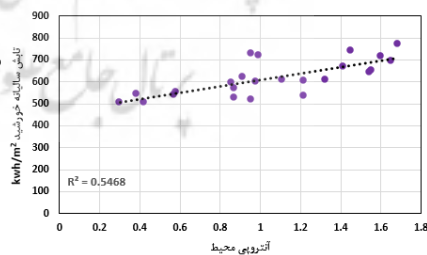


ب



الف

شکل (۵) تابش سالیانه خورشید ( $\text{Kwh m}^{-2}$ ) در مقابل آنتروپی (الف) مساحت، (ب) حجم و (پ) محیط برای ۲۴ محله



پ

ارزیابی پتانسیل سیستم‌های فعال تبدیل انرژی خورشیدی: در این جا دو فناوری تبدیل انرژی تابشی خورشید در ارتباط با پتانسیل آن برای شهر اهواز بررسی شده است. این فناوری‌ها شامل سیستم‌های یکپارچه فتوولتائیک ساختمانی (PV) و کلکتورهای حرارتی خورشیدی (STC) می‌باشند که هر دو نوع از سیستم‌های فعال می‌باشند. در این مطالعه، پتانسیل فناوری‌های فعال خورشیدی برای سقف‌های ساختمانی با استفاده از مقادیر آستانه-ای برآورد شده است. مقادیر آستانه‌ای برای سیستم‌های فعال PV و STC مورد استفاده در سقف‌ها، با استفاده از مطالعات کامپنن<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) به کار گرفته شده و در مطالعات بسیاری استفاده شده‌اند. مقادیر آستانه، حداقل میزان تابش سالیانه مورد نیاز برای فناوری‌های خورشیدی را، به طوری که به لحاظ اقتصادی به صرفه باشند، مشخص می‌کنند. جدول ۱ مقادیر آستانه‌ای برای دو نوع از سیستم‌های فعال مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. پتانسیل سیستم‌های PV و STC به صورت درصد سقف‌های ساختمانی که می‌توانند برای سیستم‌های تبدیل انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند، محاسبه شده است (جدول ۲).

جدول (۱) مقادیر آستانه تابش سالیانه خورشید (Kwh m<sup>-2</sup>) برای محاسبه پتانسیل تکنولوژی‌های فعال خورشیدی PV و STC

مقادیر آستانه‌ای تابش سالیانه خورشید	تکنولوژی خورشیدی
۱۰۰۰ Kwh m <sup>-2</sup>	سیستم‌های فتوولتائیک ساختمانی (PV)
۶۰۰ Kwh m <sup>-2</sup>	کلکتورهای حرارتی خورشیدی (STC)

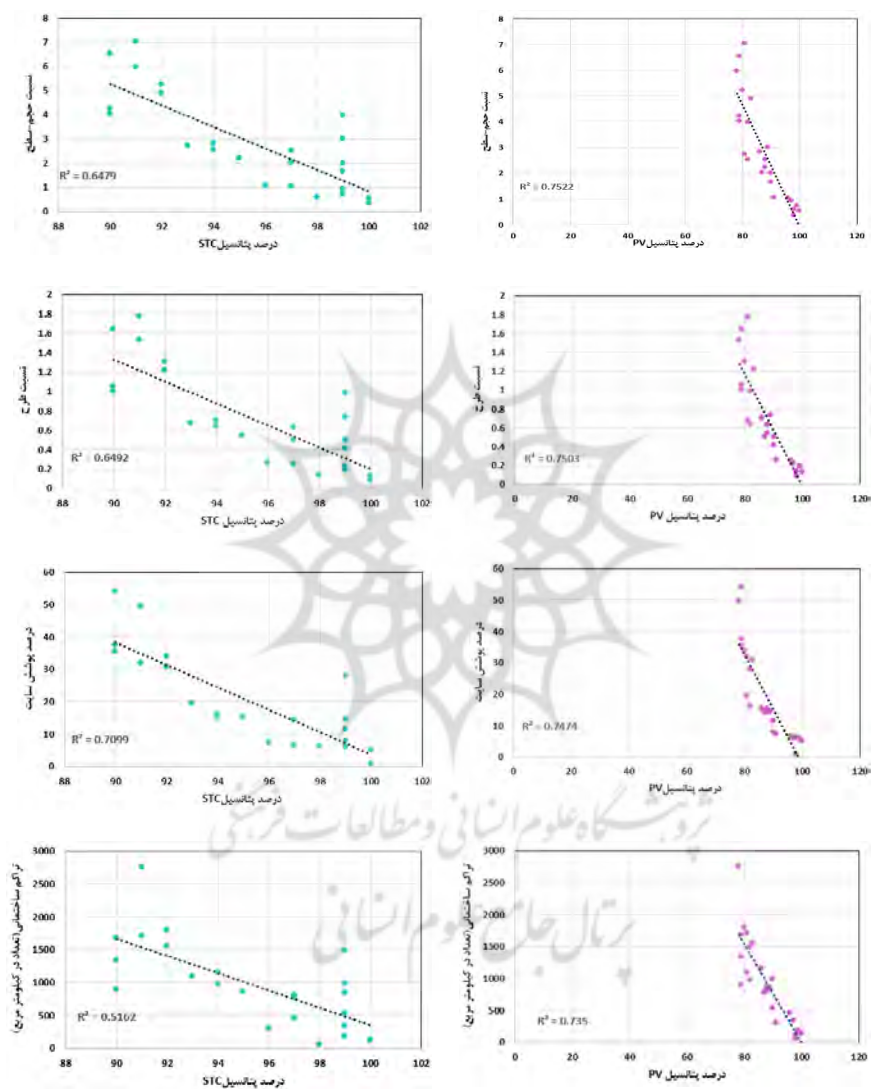
جدول (۲) درصد سقف‌های ساختمانی مناسب منطقه برای استفاده از تکنولوژی‌های فعال خورشیدی PV و STC

ID	درصد سیستم‌های PV	درصد سیستم‌های STC	ID	درصد سیستم‌های PV	درصد سیستم‌های STC
۴	۹۷	۹۹	۲۰	۸۰	۹۲
۱۴	۸۶	۹۴	۱۵	۸۲	۹۴

<sup>۱</sup>- Compagnon

۹۷	۹۶	۶	۹۱	۷۸	۲۳
۹۹	۸۲	۱۷	۹۶	۹۱	۷
۱۰۰	۹۸	۱	۹۹	۸۹	۱۲
۹۰	۷۹	۲۴	۹۹	۹۹	۳
۹۹	۹۰	۸	۹۷	۸۸	۱۱
۹۰	۷۹	۲۲	۹۹	۹۰	۹
۱۰۰	۱۰۰	۲	۹۰	۷۹	۲۱
۹۲	۸۳	۱۸	۹۵	۸۸	۱۳
۹۳	۸۱	۱۶	۹۷	۸۷	۱۰
۹۱	۸۱	۱۹	۹۸	۹۸	۵

پتانسیل سیستم‌های فعال در ارتباط با شاخص‌های تراکم شهری: در این مطالعه رابطه بین شاخص‌های تراکم شهری و درصد پتانسیل خورشیدی سقف‌های ساختمانی، برای سیستم‌های فعال تجزیه و تحلیل شده است. واضح است که درصدهای پایین پتانسیل خورشیدی سقف‌ها، در نواحی فشرده رخ می‌دهد (شکل ۶). همبستگی خطی منفی بین شاخص‌های پوشش سایت، نسبت طرح، نسبت حجم-سطح و تراکم ساختمانی از یک سو و درصد سقف‌های مناسب برای سیستم‌های PV و STC از سوی دیگر، وجود دارد. پتانسیل PV در تمام نواحی با افزایش پوشش سایت، نسبت طرح، نسبت حجم-سطح و تراکم ساختمانی کم می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار ترشولد بالای  $1000 \text{ Kwh m}^{-2}$  برای تابش خورشیدی، شاخص نسبت حجم-سطح بیشترین تاثیر را بر روی پتانسیل PV دارد. پتانسیل PV از ۱۰۰٪ در نواحی پراکنده تا ۷۸٪ در نواحی فشرده تغییر می‌کند. کمترین میزان ضریب تعیینی بین تراکم ساختمانی و درصد پتانسیل PV است. با در نظر گرفتن ترشولد بالای  $600 \text{ Kwh m}^{-2}$ ، همبستگی قوی بین پتانسیل STC و شاخص پوشش سایت وجود دارد.



شکل (۶) رابطه بین شاخص‌های تراکم شهری و درصد سقف‌های مناسب برای استفاده از تکنولوژی‌های فعال خورشیدی PV و STC در ۲۴ محله

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق شاخص‌های مختلف تراکم شهری برای ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در ۲۴ محله از منطقه ۴ شهر اهواز بررسی شد. این شاخص‌ها شامل پوشش سایت، نسبت طرح، نسبت حجم-سطح، تراکم جمعیت و تراکم ساختمانی هستند. همچنین شاخص دیگری تحت عنوان آنتروپی که معیار پراکندگی می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. اثرات شاخص‌های تراکم شهری بر تابش سالیانه دریافتی در مناطق شهری و پتانسیل سقف‌های ساختمانی برای بهره‌برداری از سیستم‌های فعال خورشیدی (PV و STC) برای منطقه مورد مطالعه، بررسی شد. طبق نتایج بدست آمده، نواحی فشرده تابش خورشیدی کمتری را نسبت به نواحی پراکنده دریافت می‌کنند. میزان تابش سالیانه خورشیدی از  $\text{Kwh m}^{-2}$  در نواحی فشرده تا  $741 \text{ Kwh m}^{-2}$  در نواحی پراکنده افزایش پیدا می‌کند. مهاجران و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که افزایش میزان تابش خورشیدی نواحی پراکنده از ۳۰ تا ۴۰ درصد، بسته به شاخص‌های تراکم، می‌باشد. افزایش شاخص پوشش سایت منجر به کاهش پتانسیل خورشیدی ساختمان‌ها می‌شود. پتانسیل PV و STC با افزایش پوشش سایت کاهش می‌یابد که این به دلیل سایه انداختن ساختمان‌ها در نواحی با پوشش سایت بالا می‌باشد. لی و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود یافتند که به طور کلی نواحی با تراکم کمتر، پتانسیل خورشیدی بالاتری دارند. همچنین نتایج نشان داد که تابش سالیانه خورشید با افزایش آنتروپی مساحت، حجم و محیط افزایش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه پتانسیل سقف‌های ساختمانی جهت توسعه سیستم‌های PV خیلی بیشتر از سیستم‌های STC تحت تاثیر درجه فشردگی شهری است. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص شد که انرژی خورشیدی پتانسیل بالایی هم در نواحی فشرده و هم در نواحی پراکنده منطقه ۴ اهواز دارد که آن هم بدلیل ویژگی‌های آب و هوایی اهواز می‌باشد. نتیجه اصلی تحقیق را می‌توان به این صورت بیان کرد که براساس مثال شهر اهواز، نواحی فشرده به لحاظ ساختمانی، استفاده از انرژی خورشید را کمی محدود می‌کنند که آن هم بدلیل تاثیر سایه می‌باشد. ولی با این حال در شهر اهواز بدلیل میزان بالای تابش خورشیدی استفاده از تکنولوژی‌های فعال خورشیدی توصیه می‌شود. لازم است به منظور بهره‌برداری از

پتانسیل خورشید در مناطق شهری، استانداردهای مربوط به تراکم ساختمانی در فاز اولیه فرایند طراحی رعایت شوند. به طور خاص ارزیابی ویژه‌ای جهت تعیین فشردگی بهینه نواحی شهری جهت استفاده از انرژی پاک خورشیدی، مورد نیاز است. با توجه به روند رو به رشد گسترش شهرها و افزایش تقاضای انرژی، لازم است که چنین ارزیابی‌هایی در بسیاری از مناطق شهری جهان انجام شود.

### منابع

- آمارنامه شهرداری اهواز، فصل اول، سرزمین و آب و هوا، معاونت توسعه و برنامه‌ریزی شهرداری اهواز، انتشارات روابط عمومی و امور بین‌الملل شهرداری اهواز، ۱۳۹۲
- پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان انرژی‌های نو ایران [www.suna.org.ir](http://www.suna.org.ir)
- پایگاه کتاب تخصصی انرژی <http://www.energybook.ir>
- سازمان انرژی‌های نو ایران، (۱۳۸۷)، آشنایی با سیستم‌های برق خورشیدی (بخش اول)، *نشریه سازمان انرژی‌های نو ایران*، سال دوم، شماره ۹.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی خوزستان، ۱۳۹۰.
- سبزی پرور، ع. ختار، ب. محب‌زاده، ح. (۱۳۹۴)، بررسی و مقایسه توانایی GIS در پهنه‌بندی توزیع فصلی و سالانه تابش خورشیدی کل (بررسی موردی: استان‌های مرکزی ایران)، *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۲۹-۱۴.
- قهرودی تالی، م. بابایی فینی، ا. عطایی، ه. (۱۳۹۴)، *درآمدی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی*، دانشگاه پیام نور.
- Baierlein, Ralph, (1971), *Atoms and Information Theory: an Introduction to Statistical Mechanics*, San Francisco, W.H. Freeman.
- Compagnon, R., (2004), Solar and daylight availability in the urban fabric, *Energy Build*, 36, 321-328.
- Esri. ArcGIS Help 10.3. (2014), Area Solar Radiation (Spatial Analyst). <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>.
- Fu, P. & Rich, P.M., (1999), Design and implementation of the Solar Analyst: an Arcview extension for modeling solar radiation at

- landscape scales. In Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference. Kansas, 1-33.
- Fu, P. & Rich, P.M., (2000), A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry. I-357-364.
  - International Energy Agency, (2014), World Energy Outlook, Paris, OECD Publishing.
  - Kanters, J., Wall, M., Dubois, M.C., (2014), Typical values for active solar energy in urban planning, *Energy Procedia*, 48, 1607-1616.
  - Lee, K.S., Lee, J.W., Lee, J.S., (2016), Feasibility study on the relation between housing density and solar accessibility and potential uses, *Renewable Energy*, 85, 749-758.
  - Li, D., Liu, G., Liao, S., (2015), Solar potential in urban residential buildings, *Sol. Energy*, 111, 225-235.
  - Mohajeri, N., Gudmundsson, A., Scartezzini, J.L., (2015), Statistical-thermodynamics modelling of the built environment in relation to urban ecology, *Ecol. Model*, 307, 32-47.
  - Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kampf, J and Scartezzini, J.S., (2016), Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469-482.
  - Montavon, Marylène, (2010), Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Energy, PhD thesis, *Ecole Polytechnique Federal De Lausanne*.
  - Nault, E., Peronato, G., Rey, E., Andersen, M., (2015), Review and critical analysis of early-design phase evaluation metrics for the solar potential of neighborhood designs, *Build. Environ*, 92, 679-691.
  - Nelson, Philip, (2006), *Biological Physics: Energy, Information, Life*, New York, W.H. Freeman.
  - Panao, M.J.O., Gonçalves, H.J., Ferrao, P.M., (2008), Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach, *Renewable Energy*, 33, 887-896.
  - Pessenlehner, W., Mahdavi, A., (2003), Building morphology, transparency, and energy performance, in: Proc. of IBPSA-2003. *8th International Conference on Building Simulation*, Eindhoven, Netherlands, 11-14.



- Ramírez, J., Lopez, R., (2012) Development of a methodology for quantifying insolation variables in windows and building openings, *Renewable Energy*, 37, 426-433.
- Sarralde, J.J., Quinn, D.J., Wiesmann, D., Steemers, K., (2015), Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London, *Renewable Energy*, 73, 10-17.
- Volkenstein, Mikhail V, (2009), *Entropy and Information*, Berlin, Birkhäuser Basel
- Wang. Z & Bill. A., (2016), *Energy and urban form*, Semester Project1.
- Wiginton, L.K., Nguyen, H.T., Pearce, J.M., (2010), Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy, *Comput. Environ. Urban Syst*, 34, 345-357.