

# ارائه یک روش کاربردی مبتنی بر پهباد فتوگرامتری به منظور تعیین دقیق محل های اتلاف حرارتی نمای ساختمان ها

سروش مطیب<sup>۱</sup>

فرهاد صمدزادگان<sup>۲</sup>

فرزانه دادرسی جوان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

\*\*\*\*\*

## چکیده

با توجه به اهمیت بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها به منظور ذخیره بالقوه انرژی و کاهش هزینه‌های تولید و مصرف انرژی مربوط به ساختمان، توجیه و منطقی‌سازی انرژی مصرفی ساختمان‌ها با توجه به افزایش هزینه‌های انرژی و دستورالعمل‌های مربوط به عملکرد انرژی به موضوع بسیار مهمی در صنعت ساختمان‌سازی و خصوصاً ساختمان‌های موجود با بافت قدیمی تبدیل شده است. در این راستا نماهای جانبی ساختمان به‌موجب اجزایی مانند درب، دیوار و پنجره بیشترین نقش را در اتلاف حرارتی یک ساختمان ایفا می‌کنند؛ بنابراین تشخیص و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی در نمای ساختمان به‌منظور ذخیره بالقوه انرژی و کاهش هزینه‌های مصرف انرژی امری ضروری است. در این تحقیق روشی برای بصری‌سازی و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان ارائه شده است. در روش پیشنهادی تحقیق با توجه سازگاری اورتوفتوموزاییک مادون‌قرمز حرارتی تولیدشده با الگوریتم‌های پردازش تصاویر رقومی و همچنین فراهم نمودن تحلیل‌های عددی و تفسیری ویژگی‌های حرارتی، از اورتوفتوموزاییک مادون‌قرمز حرارتی حاصل از پهباد فتوگرامتری و الگوریتم قطعه‌بندی منطقه مبنا به‌منظور تشخیص و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان استفاده شده است. در این راستا پس از تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان برای ارزیابی محل‌های اتلاف حرارتی تعیین شده از معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به‌عنوان دو معیار شناخته شده به‌منظور ارزیابی مدل در یادگیری ماشین استفاده شده است. بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به ترتیب مقادیر ۹۰ درصد و ۸۷ درصد حاصل شده است. در این راستا نتایج بیانگر افزایش دقت روش پیشنهادی در تعیین محل‌های اتلاف حرارتی بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش نسبت به تحقیقات مرتبط با موضوع پژوهش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهبود بهره‌وری انرژی، اتلاف حرارتی، اورتوفتوموزاییک، پهباد، الگوریتم قطعه‌بندی

\*\*\*\*\*

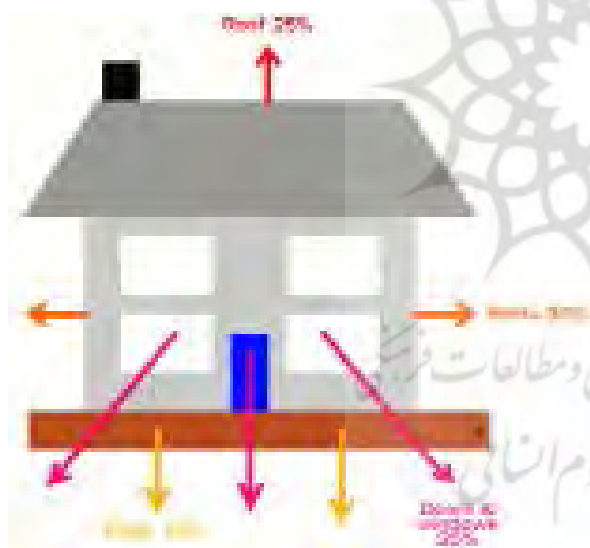
۱- کارشناسی ارشد نقشه‌برداری، فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران soroush.motayyeb@ut.ac.ir

۲- استاد دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) samadz@ut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران fdadrasjavan@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بنابراین اتلاف حرارت ناشی از افزایش و یا از دست دادن بی‌رویه انرژی از طریق ساختمان می‌باشد. محل‌های اتلاف حرارتی از نقص‌های مهم عایق کاری ساختمان به حساب می‌آیند که از طریق پل حرارتی<sup>۲</sup> و یا از دست دادن بیش از حد گرما، نشت هوا، عدم وجود و یا استفاده از عایق حرارتی آسیب‌دیده در اجزای ساختمان رخ می‌دهند (Kylili et al., 2014). از آنجا که نشت<sup>۳</sup> و نفوذ<sup>۴</sup> انرژی بیشتر در اطراف درها، پنجره‌ها و دیگر نقاط دسترسی به ساختمان رخ می‌دهد؛ بنابراین وجود محل‌های اتلاف حرارتی بیشتر در پیرامون چنین مناطقی ساختمان نمایان است (Kakillioglu et al., 2018a). در نگاره ۱، میزان اتلاف حرارتی بخش‌های مختلف ساختمان ارائه شده است.



نگاره ۱: نمایش میزان اتلاف حرارتی بخش‌های مختلف

ساختمان (www.explainthatstuff.com)

با توجه به اطلاعات ارائه شده در نگاره ۱، نمای ساختمان بیشترین میزان اتلاف حرارتی یک ساختمان را پوشش می‌دهد (www.explainthatstuff.com)؛ بنابراین با توجه به نبود اطلاعات کافی از عملکرد انرژی ساختمان‌ها و انجام

بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها در سال‌های اخیر به موضوع مهمی تبدیل شده است. با استفاده از فناوری‌های نوین، ساختمان‌های جدید با عملکرد انرژی بالاتری ساخته می‌شوند. در این راستا با در نظر گرفتن ساختمان‌های قدیمی تقاضای فزاینده‌ای برای بازرسی و بهبود بهره‌وری انرژی آن‌ها وجود دارد (Iwaszczu et al., 2017). در کشورهای اروپایی ساختمان‌ها ۴۰ درصد از انرژی تولید شده را مصرف می‌کنند که از این مقدار ۴۷ درصد انرژی مصرفی به‌منظور گرمایش در ساختمان‌ها استفاده می‌شود (Baden et al., 2006). با این حال با توجه به اهمیت و ضرورت این امر اقدامات نوسازی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد. یکی از دلایل این اهمال عدم اطلاع بسیاری از مالکان در مورد ذخیره بالقوه انرژی در ساختمان‌ها است (Zundel et al., 2011). همچنین با توجه به اهمیت به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز به‌منظور تعیین راه‌حل‌های بهینه‌سازی در بهبود بهره‌وری انرژی، مالکان اقدامات لازم در رابطه با اندازه‌گیری‌های میزان اتلاف انرژی ساختمان را نادیده می‌گیرند (Gorzalka et al., 2018). دستیابی به ذخیره قابل ملاحظه انرژی در بخش ساختمان نیازمند بازرسی‌های دقیق و قابل اعتماد انرژی است. در این راستا بررسی ذخیره‌سازی واقعی انرژی در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود اختلاف انرژی زیادی بین میزان ذخیره شده و پیش‌بینی شده انرژی را نشان می‌دهد. بنابراین بازرسی‌های غیردقیق انرژی می‌تواند منجر به تأثیرات منفی زیست محیطی، از بین رفتن میزان هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش نرخ پذیرش جهت بهبود بهره‌وری بهینه انرژی شود (Kakillioglu et al., 2018a; Shapiro, 2011).

بازرسی انرژی در بخش ساختمان به‌منظور شناسایی منابع نشت هوا، تشخیص رطوبت، نامناسب بودن پنجره‌ها، بررسی عایق‌ها و ارزیابی عملکرد سیستم تهویه هوا انجام می‌شود (Asdrubali et al., 2012; Eva Barreira & et al., 2007; Eva

2- Thermal Bridging

3- Exfiltration

4- Infiltration

1- Audits

بلکه به برآورد کمیت مقادیر انتقال حرارتی<sup>۶</sup> سطوح دیوار و سقف نیز با استفاده اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی کمک می کند.

هدف و تمرکز اصلی این تحقیق تعیین دقیق محل های اتلاف حرارتی نمای ساختمان ها به منظور بهبود بهره وری انرژی و عملکرد بهینه ذخیره انرژی ساختمان می باشد. به طور کلی روش پیشنهادی تحقیق از دو مرحله اساسی تشکیل شده است. مرحله اول شامل اخذ تصاویر مادون قرمز حرارتی با استفاده از پهپاد مجهز به مازول کینماتیک پس پردازشی (PPK)<sup>۷</sup> با قابلیت ارتفاع پرواز کم به منظور اخذ تصاویر از نمای ساختمان و تولید اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی است. سپس در مرحله دوم محل های مربوط به اتلاف حرارتی در نمای ساختمان با استفاده از الگوریتم های بینایی - کامپیوتر بر روی اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی آشکارسازی و تعیین می شوند. در ادامه با توجه به اهمیت مصرف بهینه انرژی در ساختمان ها و همچنین تعیین محل های مربوط به اتلاف حرارتی به بررسی مطالعات مرتبط با تولید محصولات فتوگرامتری (ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک) و روش های تعیین محل های اتلاف حرارتی پرداخته شده است.

در تحقیق (Hoegner et al., 2016)، با استفاده از پارامترهای توجیه بهینه حاصل از تصاویر متوالی، نداشت مدل سه بعدی به تصاویر و استخراج بافت های نما را انجام داده اند. سپس با استفاده از الگوریتم های قطعه بندی<sup>۸</sup> و بررسی مقادیر درجات خاکستری قطعه های مورد نظر نسبت به مقادیر درجات خاکستری میانگین، محل های اتلاف حرارتی بر روی مدل سه بعدی بافت دار ساختمان آشکار شده اند.

در تحقیقی دیگر (López-Fernández et al., 2017)، از یک سیستم موبایل-مپینگ<sup>۹</sup> به همراه یک سنجنده حرارتی برای به دست آوردن داده های مورد نیاز از جمله ابرنقاط

اصلاحات و مقاوم سازی، بصری سازی و تعیین محل های اتلاف حرارتی نمای ساختمان ها به منظور بهبود بهره وری انرژی ساختمان امری ضروری است.

روش های معمول بازرسی انرژی ساختمان کم دقت، زمان بر و پرهزینه هستند. همچنین روش های کیفی و تفسیری از جمله آزمایش ها رطوبت<sup>۱</sup> و آزمون فشار پنکه<sup>۲</sup> که به منظور شناسایی نقص های حرارتی در پوسته ساختمان استفاده می شوند از نظر ارزیابی جامع عملکرد حرارتی محدود می باشند (Danielski et al., 2015). در این راستا روش ترموگرافی حرارتی<sup>۳</sup> یک روش کمی، سریع و دقیق جهت بررسی مفید سازه ها است که تشخیص ناهنجاری ها<sup>۴</sup> در ساختمان را ممکن می سازد و نتایجی با قابلیت اعتماد بالا را ارائه می دهد (E. Barreira et al., 2016; Lagüela et al., 2014).

در سال های اخیر با توجه به ظهور و رشد پرند های هدایت پذیر از دور که قابلیت تجهیز به دوربین های مختلف از جمله دوربین حرارتی را دارا می باشند؛ بازرسی هوایی ساختمان ها مورد توجه بسیاری از فعالان این حوزه قرار گرفته است (Gorzalka et al., 2018). در این راستا با توجه به پیشرفت های صورت گرفته در حوزه فتوگرامتری و بینایی - کامپیوتر<sup>۵</sup> و ظهور پهپادها، اخذ تصاویر مادون قرمز حرارتی به عنوان یک فناوری پیشرفته برای تجزیه و تحلیل کمی و کیفی از ویژگی های حرارتی ساختمان فراهم شده است. با استفاده از اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی حاصل از روش پهپاد فتوگرامتری توانایی تحلیل های کمی و کیفی ویژگی های حرارتی (López-Fernández et al., 2017) اندازه گیری مسافت، زاویه ها و مختصات مسطحاتی به طور مستقیم ایجاد می شود (Watanabe et al., 2016). همچنین با استفاده از پهپادها می توان تصاویر مادون قرمز با کیفیت از سازه را از زاویه های مختلف اخذ نمود. این امر نه تنها موجب تجسم مادون قرمز سه بعدی و شناسایی پل های حرارتی می شود،

6- Heat transfer coefficient (U-value)

7- Post-Processing Kinematic

8- Segmentation

9- Mobile-Mapping

1- Moisture

2- Fan pressurization

3- Thermal thermography

4- Anomalies

5- Computer vision

مدل سازی سه بعدی ساختمان توسط نرم افزارهای پردازش تصاویر، با استفاده از مفهوم مدل ساختمان شیء گرا<sup>۲</sup> و ضرایب انتقال حرارتی میزان اتلاف انرژی محاسبه شده است.

در تحقیق (Rakha et al., 2018)، جهت تشخیص سریع عملکرد انرژی ساختمان و تهیه نقشه هوایی اتلاف حرارتی از تصاویر پهپاد استفاده نموده اند. بازرسی قسمت های مورد توجه اتلاف حرارتی در ساختمان با استفاده از الگوریتم های بینایی- کامپیوتر همانند فیلترهای تشخیص لبه و الگوریتم های قطعه بندی Region-Growing انجام شده است. به منظور ارزیابی تعیین محل های اتلاف حرارتی بر اساس دو معیار ارزیابی یادگیری ماشین<sup>۳</sup> از جمله صحت<sup>۴</sup> و پوشش<sup>۵</sup> به ترتیب مقادیر ۷۶ و ۷۴ درصد حاصل شده است. در تحقیقی دیگر (Kakillioglu et al., 2018b)، جهت تشخیص اتلاف حرارتی از الگوریتم قطعه بندی Region-Growing و اپراتورهای مورفولوژی استفاده شده است. به منظور ارزیابی تعیین محل های اتلاف حرارتی بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش برای مجموعه داده دوربین دستی به ترتیب مقادیر ۹۱ و ۸۹ درصد و برای مجموعه داده پهپاد ۳۴ و ۷۱ درصد حاصل شده است.

در تحقیق (Hou et al., 2019)، نتایج اولیه عوامل مؤثر بر تهیه نقشه سه بعدی حرارتی با استفاده از پهپاد ارائه شده است. از جمله این عوامل می توان به زاویه دوربین، الگوهای پرواز و هم پوشانی تصاویر جهت بررسی انرژی ساختمان ها در یک منطقه مهم اشاره نمود. در این راستا میزان تأثیر پیکربندی های مختلف پروازی پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تحقیقات انجام شده به منظور ثبت جزئیات بیشتر از سقف ساختمان تصاویر قائم (زاویه ۹۰ درجه) و ثبت جزئیات بیشتر از نماها تصاویر مایل (زاویه ۴۵ درجه) نتایج بهتری ارائه داده اند. همچنین در تحقیقی دیگر

سه بعدی مرئی و تصاویر حرارتی جهت تعیین مقدار اتلاف حرارتی فضای داخلی ساختمان استفاده شده است. این روش جهت اندازه گیری اتلاف حرارتی با اطلاعات هندسی و تصاویر حرارتی یک اورتوفتوموزاییک حرارتی را ارائه داده است. همچنین جهت تعیین نواحی مربوط به اتلاف حرارتی از الگوریتم قطعه بندی تصویر استفاده شده است. به این ترتیب اورتوفتوموزاییک حرارتی طبق الگوریتم خودکار قطعه بندی، جهت ارزیابی اتلاف حرارتی به مناطق مورد نظر با درجات خاکستری به دو گروه پیکسل ها با بالاترین و کمترین دما تقسیم بندی شده است

در تحقیق (Lin et al., 2018)، رویکردی خودکار جهت تهیه نقشه بافت دار حرارتی نمای ساختمان با استفاده از داده های دوربین حرارتی ارائه شده است. در این راستا ابر نقاط مترکم و مدل سه بعدی حرارتی بافت دار نمای ساختمان از یک مجموعه توالی تصویر حرارتی با استفاده از الگوریتم ساختار از حرکت (SfM)<sup>۱</sup> و نرم افزار Agisoft-PhotoScan تولید شده است.

در تحقیق (Edelman et al., 2018)، امکان دستیابی به مدل های سه بعدی بافت دار صحنه جرم تولید شده با استفاده از تصاویر مادون قرمز و حرارتی با به کارگیری از نرم افزار پردازش تصاویر فتوگرامتری Agisoft-PhotoScan بررسی شده است. بررسی ها نشان داده اند که دقت مدل های سه بعدی بافت دار به کیفیت تصاویر و میزان ویژگی های مشترک شناسایی شده توسط نرم افزار بستگی دارد؛ بنابراین توصیه شده است به منظور تأیید دقت اندازه گیری های فتوگرامتری، چندین شیء مرجع در هر صحنه اضافه شوند. در تحقیق (Gorzalka et al., 2018)، با استفاده از پهپاد تصاویر حرارتی و مرئی از کل نمای ساختمان اخذ شده است. علاوه بر این از یک دوربین چند طیفی نصب شده به روی پهپاد جهت حصول اطلاعات در مورد مواد سطحی اجزای ساختمان به عنوان ورودی اضافی به منظور تجزیه و تحلیل حرارتی ساختمان استفاده شده است. سپس پس از

2- Object-oriented building model

3- Machine Learning

4- Precision

5- Recall

1- Structure from Motion

تصاویر استفاده کرده‌اند. پس از اخذ تصاویر توسط پهپاد مجهز به دوربین حرارتی برای ایجاد ماسک جهت فیلتر کردن نواحی دارای بالاترین دما، تصاویر از فضای رنگی مادون قرمز به فضای رنگی رنگ، اشباع و ارزش (HSV)<sup>۶</sup> تبدیل شده‌اند.

در تحقیق (Vorajee et al., 2020)، استفاده از یک دوربین حرارتی مقرون به صرفه و با دسترسی راحت پیشنهاد شده است. در این مطالعه فرض شده است که یک دوربین کم هزینه با قدرت تفکیک مکانی پایین و درجه مصرف کننده می تواند یک گزینه اقتصادی برای ارزیابی دوره‌ای ساختمان را فراهم کند. جهت آشکار کردن محل‌ها و میزان اتلاف حرارتی در این رویکرد الگوریتم‌های مختلف قطعه‌بندی تصویر بررسی شده‌اند. سرانجام پس از ارزیابی نتایج، الگوریتم قطعه‌بندی منطقه-مبنا<sup>۷</sup> بهترین نتایج را جهت تعیین محل‌های اتلاف حرارتی ارائه داده است.

با مروری بر روش‌های مورد استفاده در تحقیقات پیشین، نیاز به پژوهشی جهت تعیین دقیق محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی نمای ساختمان‌ها مبتنی بر استفاده از اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی حاصل از پهپاد فتوگرامتری دیده می‌شود؛ بنابراین در روش پیشنهادی این تحقیق به منظور اخذ تصاویر مادون قرمز حرارتی از نمای ساختمان از یک پهپاد مجهز به ماژول PPK با قابلیت ارتفاع پرواز کم به عنوان سکو هوایی تصویربرداری استفاده شده است. سپس با استفاده از الگوریتم‌های SfM و استریو چندنمایی (MVS)<sup>۸</sup> محصولات فتوگرامتری از جمله ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی تولید می‌شوند. در این راستا با توجه به بررسی‌های صورت گرفته (Vorajee et al., 2020) در سال ۲۰۲۰ در مورد الگوریتم‌های قطعه‌بندی تصادفی<sup>۹</sup> همچون روش‌های مبتنی لبه، حد آستانه و منطقه-مبنا جهت تعیین محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی،

(Dlesk et al., 2019)، رویکردی در مورد چگونگی اخذ تصاویر حرارتی از یک منزل مسکونی، نحوه پردازش تصاویر حرارتی با استفاده از روش فتوگرامتری و چگونگی دستیابی به ابرنقاط حرارتی ارائه شده است. در این تحقیق ابرنقاط حرارتی با استفاده از الگوریتم SfM و نرم افزار Agisoft-PhotoScan تولید شده است. در این راستا جهت زمین مرجع سازی و ارزیابی دقت ابرنقاط حرارتی با استفاده از ۹ نقطه کنترل و ۱۱ نقطه چک، خطای جذر میانگین مربعات ۰/۰۱۹ متر برای ۱۱ نقطه چک حاصل شده است. در مطالعه‌ای دیگر (Zhong et al., 2019)، یک روش تجزیه و تحلیل برجستگی<sup>۱</sup> جهت تشخیص اتلاف حرارتی خطوط لوله با استفاده از تصاویر مادون قرمز حرارتی و مرئی اخذ شده توسط پهپاد و داده‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی ارائه شده است. در روش تشخیص اتلاف حرارتی سامانه‌های گرمایش منطقه‌ای مبتنی بر میزان برجستگی، نقشه برجستگی مادون قرمز حرارتی به منظور افزایش تشخیص اهداف اتلاف حرارتی ایجاد می‌شود. سرانجام با استفاده از قطعه‌بندی هدف تطبیقی<sup>۲</sup> با حداکثر آنتروپی<sup>۳</sup>، در نقشه برجستگی نهایی اهداف اتلاف حرارتی بالقوه به صورت خودکار تشخیص داده شده‌اند. همچنین در تحقیق (Sledz et al., 2020)، با به کارگیری از تصاویر مرئی، مدل رقومی سطح<sup>۴</sup> و با استفاده از تصاویر حرارتی اورتوفتوموزاییک حرارتی را تولید نموده‌اند. در این راستا جهت شناسایی مناطق با دمای بالا از روی اورتوفتوموزاییک حرارتی، از آشکار ساز دایره‌ای لاپلاسی-گوسین (LoG)<sup>۵</sup> استفاده شده است. سپس با استفاده از الگوریتم قطعه‌بندی و طبقه‌بندی محلی سازی ناهنجاری‌های حرارتی انجام شده است. در تحقیقی دیگر (Baktykery et al., 2020)، جهت آشکار کردن مناطق اتلاف حرارتی از زبان برنامه نویسی پایتون و الگوریتم‌های توسعه داده شده پردازش رقومی

6- Hue, Saturation, Value

7- Region-based segmentation

8- Multi-View Stereo

9- Stochastic segmentation algorithms

1- Saliency

2- Adaptive target segmentation

3- Entropy

4- Digital Surface Model (DSM)

5- Laplacian of Gaussian

## ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی، تصاویر مادون قرمز حرارتی نمای ساختمان از عمارت پدرسالار در روستای علی‌آباد شهرستان آرادان- گرمسار واقع در استان سمنان اخذ شده‌اند. منطقه مورد مطالعه در نگاره ۲ نمایش داده شده است. با توجه به نگاره ۲، منطقه مورد مطالعه در مختصات طول جغرافیایی ۵۲/۳۰۳۴ و عرض جغرافیایی ۳۵/۱۶۰۰ واقع شده است.

## ۲-۲- پهپاد و دوربین مادون قرمز حرارتی

برای اخذ داده‌های مورد نظر از پهپاد عمود پرواز با قابلیت ارتفاع پرواز کم، مجهز به ماژول PPK و دوربین مادون قرمز حرارتی MC1-640s محصول شرکت KeiiElectro Optics Technology با نرخ ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. همچنین با استفاده از تجهیزات مخابراتی، رایانه و نرم‌افزار Mission Planner، امکان کنترل و هدایت پهپاد فراهم گردیده است. اطلاعات جامع‌تر در ارتباط با مشخصات فنی دوربین و پهپاد مورد استفاده در این تحقیق در جداول ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

با توجه به مشخصات فنی پهپاد ارائه شده در جدول ۲، مسیر پرواز جهت اخذ داده از نمای ساختمان به صورت عمود بر نمای ساختمان و در فاصله ۱۱ متری و ارتفاع پرواز ۱/۷۰ متری طراحی شده است. در ادامه به شرح روش پیشنهادی تحقیق پرداخته شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی دوربین مادون قرمز حرارتی

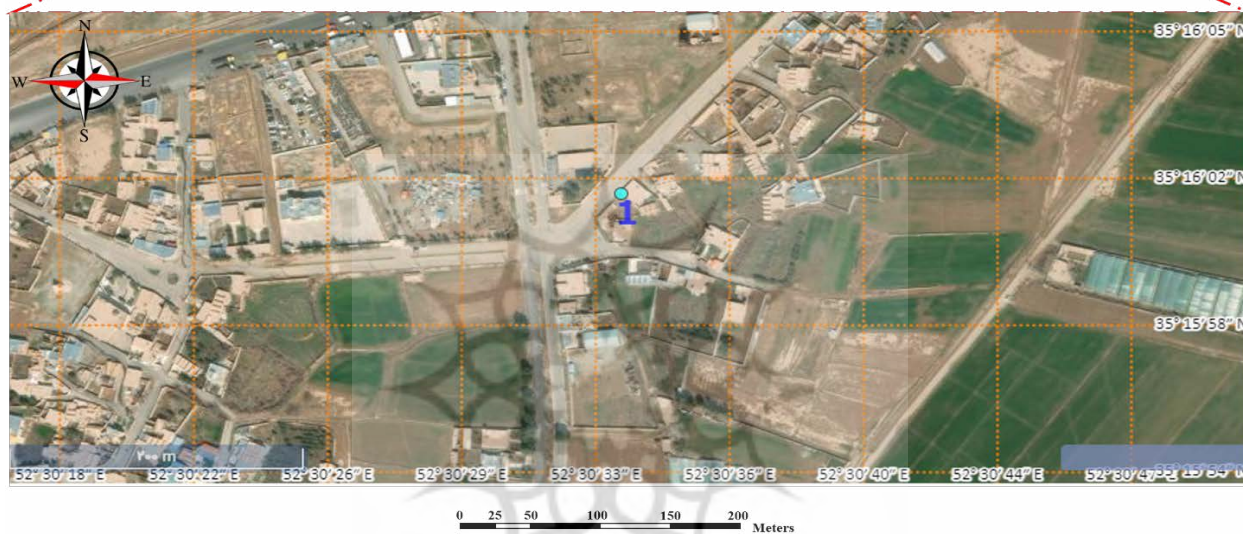
مورد استفاده		پارامترها
مقادیر	پارامترها	
۲۵ میلی‌متر	فاصله کانونی	
۴۸۰×۶۴۰	ابعاد تصویر	
۱۷ میکرومتر	ابعاد حس‌گر	
۳۰-۰/۳ درجه سانتی‌گراد	حساسیت حرارتی	

## ۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها تحقیق

روش‌های مبتنی بر منطقه عملکرد بهتری را ارائه نموده‌اند. بنابراین در این تحقیق با توجه سازگاری اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی تولید شده با الگوریتم‌های پردازش تصاویر رقومی و همچنین فراهم نمودن تحلیل‌های عددی و تفسیری ویژگی‌های حرارتی، جهت استخراج و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان‌ها از الگوریتم قطعه‌بندی منطقه مینا Region-Growing استفاده شده است. از جمله دستاوردهای اهداف این تحقیق می‌توان به بصری‌سازی وضعیت حرارتی نمای ساختمان‌ها و همچنین تشخیص و تعیین خودکار محل‌های اتلاف حرارتی در نمای ساختمان اشاره نمود. در این راستا با استفاده از پهپاد به‌عنوان سکوی تصویربرداری عدم دسترسی به مناطق غیرقابل دسترس و خارج از دید، جهت بررسی و اخذ داده به روش ترموگرافی سنتی برطرف می‌گردد و با افزایش سرعت و دقت موجب بازرسی اتلاف حرارتی محدوده بیشتری از ساختمان‌ها می‌شود. همچنین با استفاده از پهپاد به‌عنوان سکوی اخذ داده و الگوریتم‌های خودکار بینایی کامپیوتر جهت تشخیص و تعیین خودکار محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان مشارکت و مسئولیت عامل انسانی دخیل در ترموگرافی کاهش داده می‌شود. در این راستا در بخش ۲ منطقه مورد مطالعه و داده‌ها تحقیق ارائه شده است. در بخش ۳ روش پیشنهادی تحقیق و در بخش ۴ پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. سرانجام نتیجه‌گیری به همراه پیشنهادها آتی در بخش ۵ و ۶ ارائه می‌شوند.

به‌منظور اخذ داده‌های مورد نیاز جهت دستیابی به اهداف تحقیق، پس از طراحی شبکه و تنظیم پارامترهای پرواز، اقدام به انجام عملیات پرواز توسط سکوی هوایی بدون سرنشین و تصویربرداری از نمای ساختمان با پوشش طولی ۸۰ درصد می‌شود.





نگاره ۲: منطقه مورد مطالعه

### ۳- روش پیشنهادی

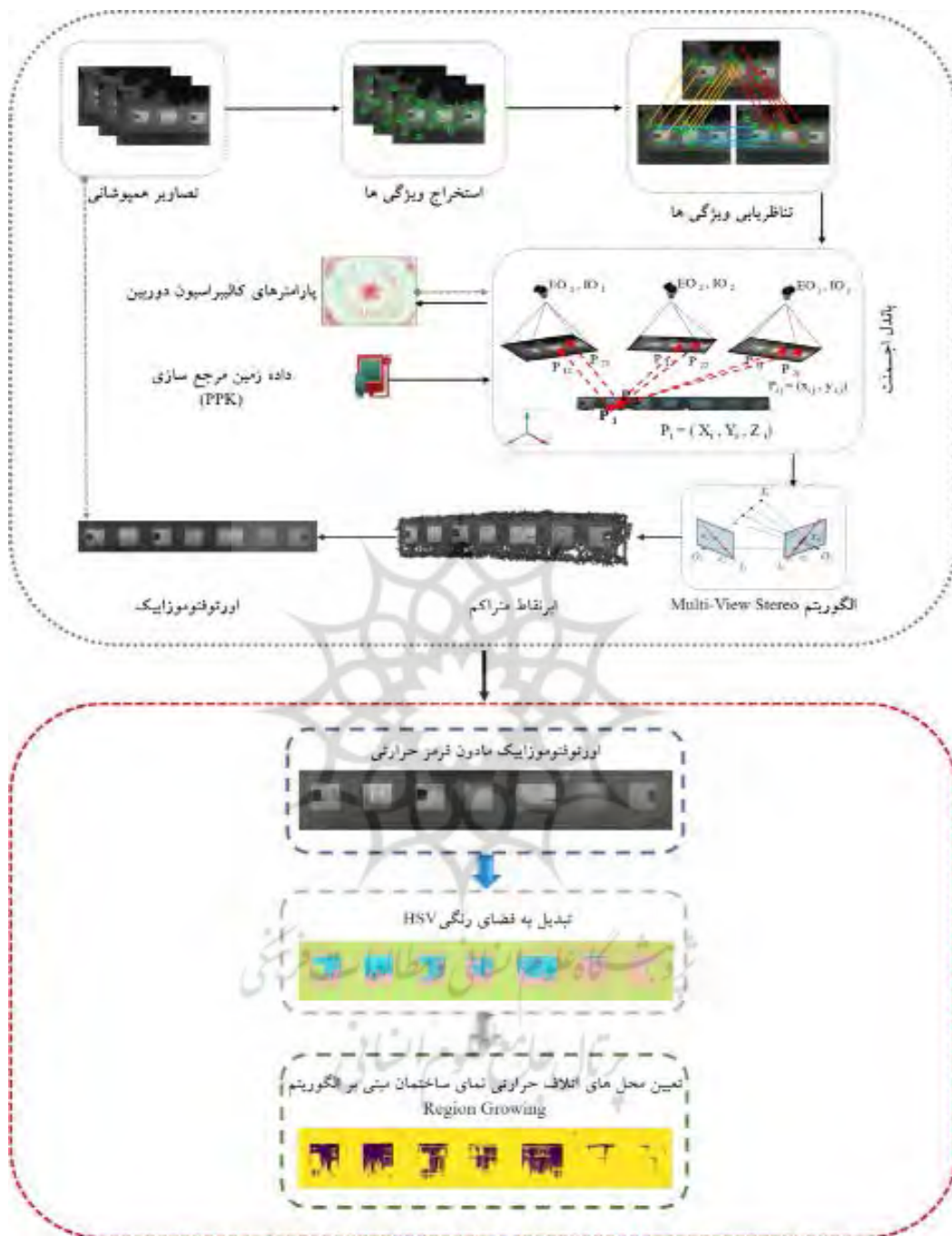
در این تحقیق هدف اصلی تشخیص و تعیین دقیق محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان با استفاده از اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی حاصل پهپاد فتوگرامتری به منظور بهبود بهره‌وری انرژی و عملکرد بهینه ذخیره انرژی ساختمان می‌باشد. در نگاره ۴ دیاگرام روش پیشنهادی ارائه شده است.

با توجه به دیاگرام ارائه شده در نگاره ۳، روش پیشنهادی تحقیق از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک با استفاده از تصاویر پوشش‌دار مادون قرمز حرارتی اخذ شده توسط پهپاد، با استفاده باندل اجسمنت و با به‌کارگیری الگوریتم‌های SfM و MVS تولید می‌شوند. در مرحله دوم اورتوفتوموزاییک

### جدول ۲: مشخصات فنی پهپاد مورد استفاده

مقادیر	پارامترها
۳۰-۴۰ دقیقه	طول پرواز
۳۰۰ متر	ارتفاع پرواز
۶/۵ کیلوگرم	بیشینه وزن
۰/۹ متر	ابعاد
۵۰ (km/h)	سرعت کروز
۳۵ (km/h)	مقاومت در برابر باد





### نگاره ۳: دیاگرام روش پیشنهادی

مادون قرمز حرارتی جهت انتخاب پیکسل‌ها بذرا مورد استفاده در الگوریتم قطعه‌بندی منطقه مبنا Region-Growing به فضای رنگی HSV منتقل می‌شود. سپس پس از معرفی پیکسل‌ها بذرا به الگوریتم Region-Growing محل‌ها اتلاف پیکسل‌ها به صورت خودکار تعیین می‌شوند. در این تحقیق پیش‌فرض مسئله در نظر گرفتن مناطق با ساختمان‌های پراکنده و یا مناطق صنعتی است. در این تحقیق با توجه به اینکه پهباد از لحاظ صرف هزینه و زمان نسبت به ابزار و تجهیزات دیگر مقرون به صرفه بوده و

مادون قرمز حرارتی جهت انتخاب پیکسل‌ها بذرا مورد استفاده در الگوریتم قطعه‌بندی منطقه مبنا Region-Growing به فضای رنگی HSV منتقل می‌شود. سپس پس از معرفی پیکسل‌ها بذرا به الگوریتم Region-Growing محل‌ها اتلاف پیکسل‌ها به صورت خودکار تعیین می‌شوند. در این تحقیق پیش‌فرض مسئله در نظر گرفتن مناطق با ساختمان‌های پراکنده و یا مناطق صنعتی است. در این تحقیق با توجه به اینکه پهباد از لحاظ صرف هزینه و زمان نسبت به ابزار و تجهیزات دیگر مقرون به صرفه بوده و



خارجی دوربین جهت تولید ابرنقاط کم تراکم حل می شوند. در این راستا پارامترهای توجیه داخلی بیانگر ویژگی های نوری دوربین مانند فاصله کانونی، مختصات نقطه اصلی<sup>۴</sup>، ضریب کج شدن<sup>۵</sup>، ضرایب اعوجاج شعاعی و مماسی عدسی و پارامترهای توجیه خارجی موقعیت و دوران مرکز عدسی دوربین هنگام اخذ تصویر را توصیف می کنند.

مدل بازسازی شده با استفاده از نقاط کنترل و یا داشتن اطلاعات ناوبری دقیق موقعیت مرکز عدسی دوربین با استفاده GPS به روش PPK به سیستم مختصات زمینی (توجیه مطلق) نگاشت می شود. در ادامه این داده ها به مدل وارد می شوند و باندل اجسمنت دوم انجام می شود. سپس با استفاده از الگوریتم MVS و براساس ثبات عکسی پیکسل های موجود در بلوک توجیه شده خروجی باندل اجسمنت، نقشه عمق برای پیکسل های تصویر ایجاد شده و ابرنقاط متراکم مادون قرمز حرارتی تولید می شود (Furukawa et al., 2010). سپس با استفاده از ابرنقاط متراکم دیگر محصولات فتوگرامتری همچون اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی تولید می شود.

### ۳-۲- تعیین محل های اتلاف حرارتی

در این تحقیق جهت تعیین محل های مربوط به اتلاف حرارتی از الگوریتم قطعه بندی منطقه- مبنا Region-Growing استفاده شده است. با توجه به دیاگرام روش پیشنهادی، در مرحله اول پیکسل ها با درجات خاکستری در بازه مادون قرمز در اورتوفتوموزاییک به فضای رنگی HSV منتقل می شود. با توجه به اینکه فضای رنگی HSV در تفسیر بصری مفهوم نور عملکرد بهتری دارد. لذا پیکسل های بذر جهت معرفی به الگوریتم قطعه بندی از بین پیکسل ها با بیشترین درجات خاکستری در فضای رنگی HSV انتخاب می شوند. در نگاره ۵ توزیع و پراکنش پیکسل ها در فضای رنگی HSV نمایش داده شده است.

همچنین پوشش از محدوده های وسیع و محل های غیرقابل دسترس را فراهم می کنند به عنوان سکوی مورد نظر جهت اخذ تصاویر مادون قرمز حرارتی انتخاب شده است. در این تحقیق از یک پهپاد با قابلیت پرواز در ارتفاع کم و قابل تجهیز شدن به دوربین مادون قرمز حرارتی ارزان قیمت استفاده شده است. همچنین با در اختیار داشتن اطلاعات ناوبری دقیق سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، با استفاده از روش PPK، می توان زمین مرجع سازی را انجام داد. در ادامه مراحل روش پیشنهادی تشریح می شوند.

### ۳-۱- تولید ابرنقاط مادون قرمز حرارتی

با استفاده از روش های بازسازی مبتنی بر تصویر مانند SfM می توان مدل های سه بعدی با قدرت تفکیک مکانی بالا را از تصاویر پهپاد تولید نمود. الگوریتم SfM یک رویکرد فتوگرامتری نسبتاً جدید است که جهت تولید محصولات نقشه برداری با قدرت تفکیک مکانی بالا (ابرنقاط و تصاویر اورتوفتوموزاییک) از تصاویر اخذ شده با سنجنده های ارزان قیمت، با پوشش های طولی و عرضی (به طور معمول، ۷۵-۸۰ درصد) مورد استفاده قرار می گیرد (Khaloo et al., 2018; Slocum et al., 2017). در ادامه مراحل کلی الگوریتم های SfM و MSV جهت تولید ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی بیان شده است.

در ابتدا پردازش با استخراج خودکار ویژگی های کلیدی از تصاویر پوشش دار آغاز می شود. ویژگی های استخراج شده توسط یک توصیف گر چندی بعدی همچون تبدیل ویژگی مقیاس تغییرناپذیر (SIFT)<sup>۱</sup> با ۱۲۸ بردار تعریف می شوند (Lowe, 2004). همچنین تناظریابی بین ویژگی های استخراج شده براساس حداکثر احتمال چندبعدی توصیف گرها (Szeliski, 2010) و معیار رد کردن داده های خارج از محدوده<sup>۲</sup> انجام می شود (Crandall et al., 2011). در ادامه با انجام باندل اجسمنت به صورت هم زمان پارامترهای توجیه داخلی و

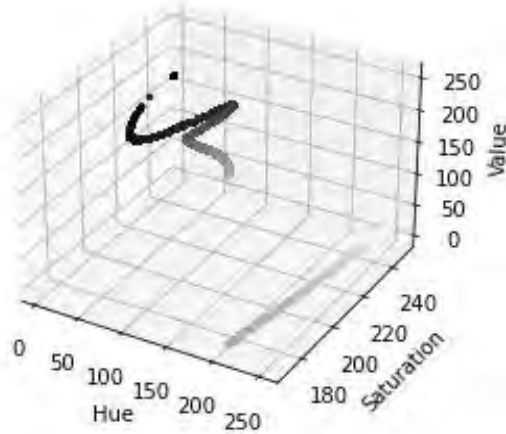
1- Global Positioning System

2- Scale-Invariant Feature Transform

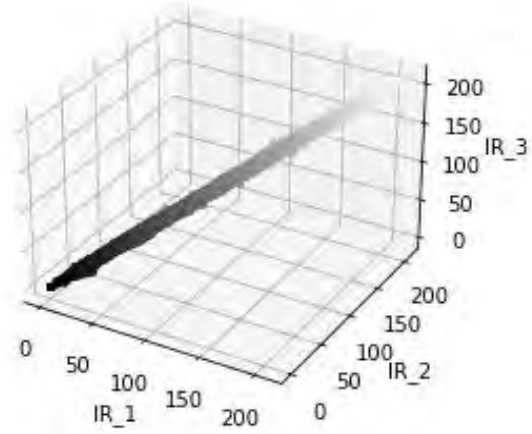
3- Outlier rejection criteria

4- Principal point

5- Skew coefficient

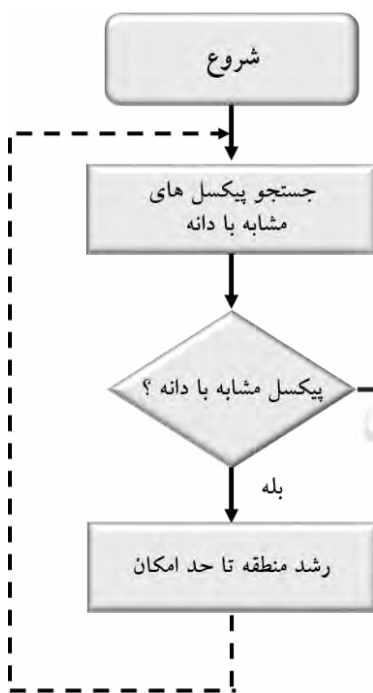


ب) فضای رنگی HSV



الف) مادون قرمز حرارتی

نگاره ۴: نمایش خروجی توزیع و پراکنش پیکسل‌ها در فضای رنگی HSV



نگاره ۵: دیاگرام الگوریتم قطعه‌بندی Region-Growing

با توجه به دیاگرام ارائه شده در نگاره ۵، الگوریتم Region-Growing رویکردی است که براساس معیارهای از پیش تعیین شده رشد، پیکسل‌ها یا مناطق تصویر را به مناطق بزرگ‌تر گروه‌بندی می‌کند. این روش بر این اساس

در نگاره (۴-الف) توزیع و پراکنش پیکسل‌ها اورتوفتوموزاییک در فضای رنگی مادون قرمز حرارتی و در نگاره (۴-ب) توزیع و پراکنش پیکسل‌ها اورتوفتوموزاییک در فضای رنگی HSV نمایش داده شده است. در این راستا براساس پراکنش پیکسل‌های تصویر اورتوفتوموزاییک در فضاهای رنگی مادون قرمز حرارتی و HSV جهت استخراج محدوده‌ها با دمای بیشتر، پیکسل‌ها در فضای رنگی HSV تفکیک‌پذیری بالاتری را جهت قطعه‌بندی تصویر و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی ارائه می‌کنند. در بینایی-کامپیوتر هدف از قطعه‌بندی تصویر تقسیم‌بندی تصویر رقومی به چندین قطعه یا منطقه می‌باشد. هدف اصلی روش‌های قطعه‌بندی تصویر افزاز تصویر به تعدادی ناحیه با تغییرات اندک در درجات خاکستری است. به این صورت که هیچ ناحیه‌ای با دیگری اشتراک نداشته و از اجتماع تمامی ناحیه‌های کل تصویر حاصل شود (Gonzalez et al., 2004).

در این تحقیق جهت تعیین محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی از الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر منطقه Region-Growing استفاده شده است. در نگاره ۵، دیاگرام الگوریتم Region-Growing و نمایش مراحل پیاده‌سازی به صورت شماتیک ارائه شده است.

ناصحیح<sup>۲</sup> تعریف می‌شود. همچنین معیار پوشش به صورت تقسیم نمونه‌های مثبت صحیح نسبت به نمونه‌های مثبت به علاوه‌ی نمونه‌های منفی ناصحیح<sup>۳</sup> بیان می‌شود (Rakha et al., 2018).

در این راستا بازه هر دو معیار ارزیابی بین مقادیر صفر و یک می‌باشد و هرچه عدد خروجی به عدد یک و یا صد درصد نزدیک‌تر باشد روش پیشنهادی عملکردی قابل قبول‌تری برای هر دو معیار صحت و پوشش ارائه خواهد کرد. معیارهای ارزیابی صحت و پوشش با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$\text{Precision} = \frac{Tp}{Tp + Fp} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Recall} = \frac{Tp}{Tp + Fn} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط (۱) و (۲) متغیرها جهت تعریف معیارهای صحت و پوشش به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

- مثبت صحیح ( $T_p$ ): تعداد پیکسل‌هایی که الگوریتم پیشنهادی درست پیش‌بینی کرده است.
- مثبت ناصحیح ( $F_p$ ): تعداد پیکسل‌هایی که الگوریتم پیشنهادی نادرست پیش‌بینی کرده است.
- منفی ناصحیح ( $F_n$ ): تعداد پیکسل‌های که انتظار داریم پیش‌بینی شوند اما الگوریتم پیش‌بینی نکرده است.

#### ۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی توانایی روش پیشنهادی در تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان و دستیابی به اهداف تحقیق، روش پیشنهادی در محیط برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه نتایج مرحله پیاده‌سازی روش پیشنهادی که شامل بخش‌های تولید ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی و تعیین محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی نمای ساختمان ارائه شده است.

است که با مجموعه‌ای از نقاط بذر شروع به رشد در مناطق تصویر می‌کند و با افزودن پیکسل‌های همسایه به هر بذر که با خواص از پیش تعریف شده مشابه بذر (مانند دامنه‌ای خاص از درجات خاکستری یا رنگ) اقدام به قطعه‌بندی پیکسل‌های مشابه تصویر بر اساس معیار مورد نظر می‌کند. عملکرد این الگوریتم بر اساس این واقعیت است که پیکسل‌های نزدیک به یکدیگر دارای درجات خاکستری مشابه هستند.

سپس یک مجموعه اولیه از مناطق کوچک با توجه به معیارهای شباهت به صورت تکراری ادغام می‌شوند. زمانی که رشد یک منطقه متوقف شد، یک پیکسل بذر دیگری انتخاب می‌گردد که هنوز متعلق به هیچ منطقه‌ای نیست و دوباره مراحل الگوریتم از ابتدا شروع می‌شود. در صورتی که دیگر هیچ پیکسلی معیارهای ورود در آن قطعه را برآورده نکند، الگوریتم متوقف خواهد شد (Gonzalez et al., 2004). در این تحقیق با توجه به اینکه هدف قطعه‌بندی مناطق مربوط به اتلاف حرارتی می‌باشد پیکسل‌ها با بیشترین درجات خاکستری در فضای HSV به عنوان پیکسل بذر انتخاب می‌شوند.

#### ۳-۲-۱- معیار ارزیابی محل‌های اتلاف حرارتی تعیین شده

در این تحقیق به منظور ارزیابی روش پیشنهادی تعیین محل‌های اتلاف حرارتی از معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به عنوان دو معیار شناخته شده جهت ارزیابی مدل در یادگیری ماشین استفاده شده است. تمرکز اصلی معیار صحت بر روی درستی تشخیص محل‌های اتلاف توسط الگوریتم پیشنهادی و تمرکز اصلی معیار پوشش بر روی داده‌هایی است که به عنوان محل‌های اتلاف حرارتی به صورت صحیح توسط روش پیشنهادی تشخیص داده شده‌اند.

معیار صحت به صورت تقسیم نمونه‌های مثبت صحیح<sup>۱</sup> نسبت به همه نمونه‌های مثبت به علاوه‌ی نمونه‌های مثبت

2- False positive (Fp)

3- False negative (Fn)

1- True positive (Tp)



الف) ابرنقاط متراکم



ب) اورتوفتوموزاییک

#### نگاره ۶: نمایش خروجی ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی نمای ساختمان

بررسی اخذ شده‌اند. در نگاره ۶، خروجی ابرنقاط متراکم و اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی نمای ساختمان نمایش داده شده است. در نگاره (۶-الف)، ابرنقاط متراکم مادون قرمز حرارتی با چگالی  $1779.67$  نقطه در مترمربع، خطای رپروچکشن  $0.41$  پیکسل و فاصله نمونه برداری زمینی  $0.75$  سانتی متری نمایش داده شده است. همچنین در نگاره (۶-ب) اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی با فاصله نمونه برداری زمینی  $0.75$  سانتی متر ارائه شده است. در اورتوفتوموزاییک خروجی مناطق پیکسل‌ها با درجات خاکستری بالاتر بیانگر محل با حرارت بیشتر یا به عبارت دیگر محل‌های اتلاف حرارتی با اطلاعات رادیومتریکی بیشتر می‌باشند.

#### ۴-۲- تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان

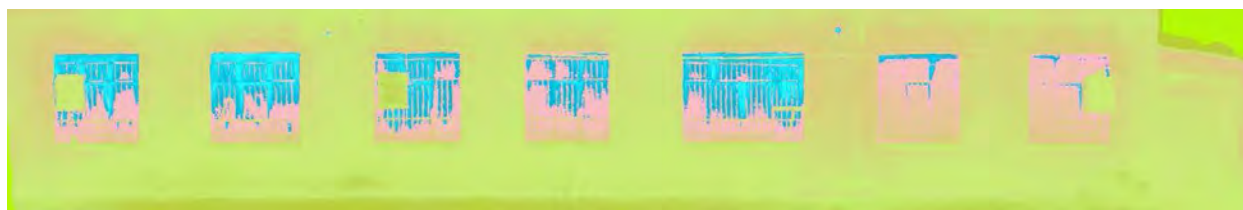
در این بخش جهت استخراج و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان از اورتوفتوموزاییک مادون قرمز

۴-۱- تولید ابرنقاط مادون قرمز حرارتی نمای ساختمان  
در این بخش به منظور تولید ابرنقاط متراکم مادون قرمز حرارتی از روش‌های مبتنی بر تصویر مانند الگوریتم‌های SfM و MVS استفاده شده است. جهت تولید ابرنقاط در ابتدا با استفاده از الگوریتم SIFT نقاط کلیدی از تصاویر استخراج و وارد مرحله تناظریابی نقاط کلیدی بین جفت تصاویر پوشش‌دار می‌شوند. سپس با استفاده از پارامترهای توجیه داخلی و خارجی به دست آمده از مرحله کالیبراسیون هندسی برای دوربین و حل هم‌زمان با استفاده از الگوریتم باندل اجسمنت، ابرنقاط غیرمتراکم تولید می‌گردد. سپس با استفاده از الگوریتم MVS، ابرنقاط سه‌بعدی متراکم از تصاویر پوشش‌دار مادون قرمز حرارتی تولید می‌شود. سرانجام با استفاده از ابرنقاط متراکم، اورتوفتوموزاییک مادون قرمز حرارتی نمای ساختمان تولید می‌شود.

در این راستا ۴۵ تصویر مادون قرمز حرارتی به صورت عمود بر نمای ساختمان و در فاصله ۱۱ متری و ارتفاع پرواز  $1/70$  متری توسط پهپاد مورد استفاده از نمای ساختمان مورد

1- Reprojection error

2- Ground Sample Distance (GSD)



نگاره ۷: نمایش اورتوفتوموزاییک حرارتی در فضای رنگی HSV



نگاره ۸: نمایش تعیین محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی با استفاده از الگوریتم قطعه‌بندی Region-Growing

اتلاف حرارتی می‌باشد. با توجه به اینکه هدف قطعه‌بندی محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی در نمای ساختمان می‌باشد؛ بنابراین پیکسل با بیشترین درجات خاکستری در فضای HSV به‌عنوان پیکسل بذر انتخاب می‌شود. مراحل پیاده‌سازی الگوریتم قطعه‌بندی Region-Growing به شرح ذیل می‌باشد:

- انتخاب یک پیکسل بذر براساس بیشترین درجات خاکستری و مقایسه با پیکسل‌های همسایه براساس معیار تشابه درجات خاکستری.
- هر قطعه با افزودن پیکسل‌های همسایه مشابه، موجب افزایش اندازه قطعه اولیه شروع شده از پیکسل بذر می‌شود.
- زمانی که رشد یک قطعه متوقف شد، پیکسل بذر دیگری انتخاب می‌گردد که هنوز متعلق به هیچ قطعه‌ای نیست و دوباره مراحل از بالا شروع می‌شود.
- روند تا زمانی ادامه می‌یابد که همه پیکسل‌ها به قطعه‌ای تعلق داشته باشند.

در نگاره ۸، نتایج قطعه‌بندی الگوریتم Region-Growing جهت تعیین محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی بر روی اورتوفتوموزاییک نمایش داده شده است. در نگاره ۸، محل‌های قطعه‌بندی شده اتلاف حرارتی نمای ساختمان با استفاده از الگوریتم Region-Growing نمایش داده شده است. در این راستا در تصویر خروجی مناطق با رنگ بنفش

حرارتی استفاده شده است. در این تحقیق جهت تعیین محل‌های اتلاف حرارتی از الگوریتم قطعه‌بندی منطقه-مبنا Region-Growing استفاده شده است. در این راستا به‌منظور تعیین دقیق‌تر محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی نیاز به انجام چند مرحله پیش‌پردازشی مهم از جمله تبدیل فضای رنگی است.

با توجه به این نکته که پراکنش پیکسل‌ها در فضای رنگی HSV، برای استخراج مناطق با دمای بالاتر تفکیک‌پذیری بیشتری دارند؛ لذا پیکسل‌های اورتوفتوموزاییک در بازه درجات خاکستری مادون‌قرمز حرارتی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون به فضای رنگی HSV منتقل می‌شوند. در نگاره ۷، خروجی تبدیل فضای رنگی اورتوفتوموزاییک به فضای رنگی HSV نمایش داده شده است. با توجه به نگاره ۷، اورتوفتوموزاییک خروجی در فضای رنگی HSV مناطق بارنگ آبی بیان‌کننده نواحی با دمای بالاتر و محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی می‌باشند. سپس به‌منظور قطعه‌بندی پیکسل‌ها و مناطق مربوط به اتلاف حرارتی در نمای ساختمان مورد پژوهش از الگوریتم قطعه‌بندی Region-Growing استفاده شده است.

الگوریتم پیشنهادی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده است. در این راستا نیاز به معرفی پیکسل‌های بذر جهت انجام قطعه‌بندی محل‌های مربوط به



جدول ۳: ارزیابی نتایج روش پیشنهادی جهت تعیین محل‌های ناهنجاری حرارتی

داده	$T_p$ (pixel)	$F_p$ (pixel)	$F_n$ (pixel)	صحت (درصد)	پوشش (درصد)
اورتوفتوموزاییک	۱۰۷۰۳۲	۱۰۹۳۲	۱۴۶۶۸	۹۰	۸۷

HSV کسر شود.

در جدول ۳، نتایج ارزیابی روش پیشنهادی جهت تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان مورد پژوهش بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش ارائه شده است. در این راستا نتایج تعیین محل‌های اتلاف حرارتی توسط کارشناس خبره ترموگرافی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، در روش پیشنهادی تحقیق جهت تشخیص و تعیین محل‌ها اتلاف حرارتی نمای ساختمان براساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به ترتیب دقت‌های ۹۰ درصد و ۸۷ درصد حاصل شده است. در این راستا تعداد پیکسل‌هایی که الگوریتم پیشنهادی درست پیش‌بینی کرده ۱۰۷۰۳۲ پیکسل، تعداد پیکسل‌هایی که الگوریتم پیشنهادی نادرست پیش‌بینی کرده ۱۰۹۳۲ و تعداد پیکسل‌های که انتظار داریم پیش‌بینی گردند اما الگوریتم پیش‌بینی نکرده ۱۴۶۶۸ پیکسل می‌باشند. در جدول ۴، بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از روش پیشنهادی و تحقیقات مرتبط با موضوع تحقیق انجام شده است.

جدول ۴: بررسی نتایج حاصل از روش پیشنهادی و تحقیقات مرتبط با موضوع تحقیق

روش	صحت (درصد)	پوشش (درصد)
روش Kakillioglu, B و همکاران	۳۴	۷۱
روش Rakha, T و همکاران	۷۶	۷۴
روش پیشنهادی	۸۷	۹۰

با توجه به ارزیابی و مقایسه انجام شده در جدول ۴، نتایج بیانگر افزایش دقت روش پیشنهادی در تعیین محل‌های اتلاف حرارتی براساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش می‌باشد.

بیانگر محل‌های مربوط به اتلاف حرارتی نمای ساختمان می‌باشند. در ادامه به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین محل‌های اتلاف حرارتی از دو معیار ارزیابی صحت و پوشش استفاده گردیده است. خروجی معیارهای ارزیابی صحت و پوشش در بازه اعداد بین صفر و یک می‌باشد. در این راستا هرچه نتایج خروجی به عدد یک و یا صد در صد نزدیک‌تر باشند بیانگر عملکرد قابل قبول روش پیشنهادی است.

به منظور پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج، از دو اورتوفتوموزاییک در فضای رنگی HSV و قطعه‌بندی شده استفاده شده است. لازم به ذکر است که اورتوفتوموزاییک در فضای رنگی HSV به عنوان مرجع ارزیابی و مقایسه تعیین محل‌های اتلاف حرارتی انتخاب شده است. در این راستا جهت ارزیابی نتایج در ابتدا بایستی مقادیر درجات خاکستری پیکسل‌های اورتوفتوموزاییک‌های فضای رنگی HSV و قطعه‌بندی شده، نرمالایز شده و در بازه اعداد یکسان قرار گیرند. در مرحله بعد هر دو اورتوفتوموزاییک با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون به صورت پیکسل‌به‌پیکسل مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. سرانجام پس از انجام مقایسه، ماتریس خروجی به صورت ماتریس منطقی با درایه‌های صفر و یک حاصل می‌گردد.

محاسبه متغیرهای معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به صورت زیر بیان می‌شود:

- در ماتریس منطقی درایه‌ها با ارزش عددی یک برابر بیانگر متغیر  $T_p$  است.
- در ماتریس منطقی درایه‌ها با ارزش عددی صفر برابر بیانگر متغیر  $F_p$  است.

همچنین برای محاسبه متغیر  $F_n$  بایستی مقدار عددی متغیر  $T_p$  به دست آمده از تعداد کل پیکسل‌های مربوط به محل‌های اتلاف حرارتی در اورتوفتوموزاییک فضای رنگی

دیوارها و سقف می‌تواند در ادامه این پژوهش انجام پذیرد. همچنین با توجه پیش‌فرض بیان شده در این تحقیق در خصوص اخذ داده‌ها از مناطق با ساختمان‌های پراکنده و یا مناطق صنعتی، پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج الگوریتم پیشنهادی برای داده‌ها با ساختار پیچیده‌تر و مناطق پیچیده شهری به‌عنوان پیشنهاد آتی تحقیق ارائه می‌شود.

### منابع و مأخذ

- 1- Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2012). A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*, 97, 365-373. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054
- 2- Baden, S., Fairey, P., Waide, P., de T'serclaes, P., & Laustsen, J. (2006). Hurdling financial barriers to low energy buildings: experiences from the USA and Europe on financial incentives and monetizing building energy savings in private investment decisions. Paper presented at the Proceedings of.
- 3- Baktykery, A., & Zhanaliyev, A. (2020). Thermal vision camera equipped drone for predictive maintenance of grid sub-stations.
- 4- Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Delgado, J. M. P. Q. (2016). Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. *Construction and Building Materials*, 110, 251-269. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026
- 5- Barreira, E., & de Freitas, V. P. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 21(1), 218-224. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.049
- 6- Barreira, E., & Freitas, V. (2005). Importance of thermography in the study of ETICS finishing coatings degradation due to algae and mildew growth. Paper presented at the 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components.
- 7- Crandall, D., Owens, A., Snavely, N., & Huttenlocher, D. (2011, 20-25 June 2011). Discrete-continuous optimization for large-scale structure from motion. Paper presented at the CVPR 2011.
- 8- Danielski, I., & Fröling, M. (2015). Diagnosis of

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها برای ذخیره بالقوه انرژی و کاهش هزینه‌های تولید و مصرف انرژی مربوط به ساختمان، به دست آوردن اطلاعات موردنیاز به‌منظور تعیین راه‌حل‌های بهینه‌سازی به‌منظور ذخیره بالقوه انرژی مصرفی خصوصاً در ساختمان‌ها بافت قدیمی‌تر امری ضروری است. در این راستا با توجه به اینکه نمای ساختمان دارای بیشترین سهم در میزان اتلاف حرارتی یک ساختمان است. لذا هدف و تمرکز اصلی در این تحقیق تشخیص و تعیین محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان به‌منظور بصری سازی و بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم قطعه‌بندی Region-Growing محل‌های اتلاف حرارتی نمای ساختمان بر روی اورتوفتوموزاییک مادون‌قرمز حرارتی حاصل از پهپاد فتوگرامتری تعیین شده‌اند. در این راستا با توجه به اینکه توزیع و پراکنش پیکسل‌ها جهت استخراج مناطق با دمای بالا تفکیک‌پذیری بیشتری در فضای رنگی HSV دارند؛ پیکسل‌های بذر برای معرفی به الگوریتم قطعه‌بندی، Region-Growing از فضای رنگی HSV انتخاب می‌شوند. سرانجام با استفاده از معیارهای ارزیابی صحت و پوشش تعیین خودکار محل‌های اتلاف حرارتی بر روی اورتوفتوموزاییک مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو جهت ارزیابی دقت تعیین محل‌های اتلاف حرارتی روش پیشنهادی بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش به ترتیب مقادیر ۹۰ درصد و ۸۷ درصد حاصل شده است. در این راستا نتایج بیانگر افزایش دقت روش پیشنهادی در تعیین محل‌های اتلاف حرارتی بر اساس معیارهای ارزیابی صحت و پوشش نسبت به تحقیقات مرتبط با موضوع پژوهش می‌باشد.

### ۶- پیشنهادها

با توجه به ضرورت بهبود بهره‌وری انرژی، تعیین محل‌های اتلاف حرارتی از کل نمای ساختمان شامل

- presented at the Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Smart Cameras, Eindhoven, Netherlands. <https://doi.org/10.1145/3243394.3243696>
- 18- Khaloo, A., Lattanzi, D., Cunningham, K., Dell'Andrea, R., & Riley, M. (2018). Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(1), 124-136.
- 19- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531-549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- 20- Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Armesto, J., & Arias, P. (2014). Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM. *Construction and Building Materials*, 51, 55-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.021>
- 21- Lin, D., Jarzabek-Rychard, M., Schneider, D., & Maas, H.-G. (2018). THERMAL TEXTURE SELECTION AND CORRECTION FOR BUILDING FACADE INSPECTION BASED ON THERMAL RADIANT CHARACTERISTICS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).
- 22- López-Fernández, L., Lagüela, S., González-Aguilera, D., & Lorenzo, H. (2017). Thermographic and mobile indoor mapping for the computation of energy losses in buildings. *Indoor and Built Environment*, 26(6), 771-784.
- 23- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- 24- Plesu, R., Teodoriu, G., & Taranu, G. (2012). Infrared thermography applications for building investigation. *Buletinul Institutului Politehnic Din Lasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 58(1), 157.
- 25- Rakha, T., Liberty, A., Gorodetsky, A., Kakillioglu, B., & Velipasalar, S. (2018). Heat mapping drones: an autonomous computer-vision-based procedure for building envelope inspection using unmanned aerial systems (UAS). *Technology| Architecture+ Design*, 2(1), buildings' thermal performance-a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow. *Energy Procedia*, 83, 320-329.
- 9- Dlesk, A., & Vach, K. (2019). Point Cloud Generation of a Building from Close Range Thermal Images. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 29-33.
- 10- Edelman, G., & Aalders, M. (2018). Photogrammetry using visible, infrared, hyperspectral and thermal imaging of crime scenes. *Forensic science international*, 292, 181-189.
- 11- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362-1376. doi:10.1109/TPAMI.2009.161
- 12- Gonzalez, R. C., Eddins, S. L., & Woods, R. E. (2004). *Digital image publishing using MATLAB*: Prentice Hall.
- 13- Gorzalka, P., Estevam Schmiadt, J., Dahlke, D., Frommholz, D., Götsche, J., Hoffschmidt, B., . . . Plattner, S. (2018). Building Tomograph-From Remote Sensing Data of Existing Buildings to Building Energy Simulation Input.
- 14- Hoegner, L., & Stilla, U. (2016). Automatic 3D reconstruction and texture extraction for 3D building models from thermal infrared image sequences. *Quant. InfraRed Thermogr.*
- 15- Hou, Y., Soibelman, L., Volk, R., & Chen, M. (2019). Factors affecting the performance of 3D thermal mapping for energy audits in a district by using infrared thermography (IRT) mounted on unmanned aircraft systems (UAS). Paper presented at the Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC).
- 16- Iwaszczuk, D., & Stilla, U. (2017). Camera pose refinement by matching uncertain 3D building models with thermal infrared image sequences for high quality texture extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 33-47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprs.2017.08.006>
- 17- Kakillioglu, B., Velipasalar, S., & Rakha, T. (2018b). Autonomous Heat Leakage Detection from Unmanned Aerial Vehicle-Mounted Thermal Cameras. Paper

30-44.

26- Shapiro, I. (2011). 10 common problems in energy audits. *ASHRAE Journal*, 53(2), 26-31.

27- Sledz, A., Unger, J., & Heipke, C. (2020). UAV-based thermal anomaly detection for distributed heating networks. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 499-505.

28- Slocum, R. K., & Parrish, C. E. (2017). Simulated imagery rendering workflow for UAS-based photogrammetric 3D reconstruction accuracy assessments. *Remote Sensing*, 9(4), 396.

29- Szeliski, R. (2010). *Computer vision: algorithms and applications*: Springer Science & Business Media.

30- Vorajee, N., Mishra, A. K., & Mishra, A. K. (2020). Analyzing capacity of a consumer-grade infrared camera in South Africa for cost-effective aerial inspection of building envelopes. *Frontiers of Architectural Research*, 9(3), 697-710. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.05.004>

31- Watanabe, Y., & Kawahara, Y. (2016). UAV Photogrammetry for Monitoring Changes in River Topography and Vegetation. *Procedia Engineering*, 154, 317-325. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.482>

32- Zhong, Y., Xu, Y., Wang, X., Jia, T., Xia, G., Ma, A., & Zhang, L. (2019). Pipeline leakage detection for district heating systems using multisource data in mid- and high-latitude regions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 207-222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.021>

33- Zundel, S., & Stieß, I. (2011). Beyond profitability of energy-saving measures—attitudes towards energy saving. *Journal of Consumer Policy*, 34(1), 91-105.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی  
پرتال جامع علوم انسانی