

## سه‌بعدی سازی ساختار سطح روسازی و برداشت داده‌های خرابی سطح با استفاده از حسگر کینکت

ساینا فیروزی یگانه<sup>۱</sup>، احمدرضا محمودزاده<sup>۲</sup>، امیر گل‌رو<sup>۳\*</sup>، محمدرضا جهان‌شاهی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه تگزاس ای اند ام، تگزاس، آمریکا

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پردو، ایندیانا، آمریکا

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ خرداد ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۲ آبان ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۶ آذر ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۳ دی ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

مدیریت روسازی  
حسگر کینکت نوع دوم (V2)  
پردازش تصویر  
داده برداری از سطح روسازی  
سه‌بعدی سازی روسازی

**چکیده:** برداشت داده خرابی‌های سطحی روسازی از اهمیت بالایی برخوردار است و علی‌رغم وجود حسگرها و تجهیزاتی که اکنون موجود است و می‌توانند با دقت بسیار بالا به برداشت خرابی و بررسی وضعیت روسازی بپردازند، هزینه‌های مربوط به تهیه، استفاده و نگهداری از آن‌ها بسیار زیاد است که این امر دلیلی برای عدم پایش مداوم سلامت روسازی می‌شود و در نتیجه، خسارت زیادی به وجود می‌آورد. هدف این مقاله معرفی یک فناوری نوین و مقرون به صرفه است که بتواند با دقت قابل قبول به برداشت خرابی‌ها نظیر شیارشدگی بپردازد. فناوری مورد استفاده در این مطالعه، حسگر کینکت است. در این راستا وسیله‌ای طراحی و ساخته شد و از سطح روسازی داده‌برداری‌هایی صورت گرفت. در ادامه مراحل بهبود کیفیت تصاویر دریافت شده از قبیل کاهش نویز تصاویر با اعمال فیلتر بیان شده است. همچنین نتایج کالیبراسیون دوربین با استفاده از تصاویر برداشتی رنگی و عمق، و همچنین اصلاح شیب تصاویر با الگوریتم‌های SVD توضیح داده شده است. پس از آن با به کارگیری فناوری پردازش تصویر و الگوریتم‌های SURF و MSAC، تصاویر عمق مختلف به یکدیگر دوخته شد و یک ساختار سه‌بعدی از سطح روسازی به دست آمد تا بتوان با استفاده از آن به بررسی خرابی‌های دارای بعد عمق در سطح روسازی پرداخت.

### ۱- مقدمه

طبقه‌بندی نمود. هر کدام از این روش‌های جمع‌آوری داده مزایا و معایب خاص خود را دارند. در طی سال‌های گذشته، سیستم‌های برداشت و پردازش خودکار خرابی روسازی توسعه یافتند [۱]. از انواع این سیستم‌ها و فناوری‌ها می‌توان حسگرهای فراصوت، لیزر اسکنرها، حسگرهای مادون قرمز و دوربین‌های ثبت فیلم و عکس دیجیتال از سطح روسازی و خرابی‌های آن را نام برد. استفاده از این فناوری‌ها موجب افزایش دقت و سرعت در برداشت داده‌های خرابی روسازی شده‌است و در عین حال هزینه‌های مربوط به تهیه، استفاده و نگهداری از آن‌ها بسیار زیاد است. امروزه با پیشرفت‌هایی که در زمینه انواع فناوری‌های ثبت تصاویر رنگی و عمق به صورت خودکار صورت گرفته‌است امکان استفاده از یک فناوری مناسب و مقرون به صرفه در خصوص برداشت داده خرابی از سطح روسازی با دقت و صحت قابل قبول فراهم شده‌است. در بین انواع تکنولوژی‌های خودکار برداشت داده از سطح روسازی می‌توان از حسگر کینکت به عنوان یک فناوری نوین در این حوزه نام برد. این فناوری در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان و پژوهشگران در زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی پزشکی،

مدیریت روسازی در گذشته امری ناشناخته بود و تنها به نگهداری از روسازی توجه می‌شد. تجربه و قضاوت‌های مهندسی در انتخاب روش‌های نگهداری و تعمیر از روسازی عامل اصلی و تاثیرگذار محسوب می‌شد و به سایر عوامل و اولویت‌های مختلف توجه چندانی صورت نمی‌گرفت. امروزه با پیشرفت‌های صورت گرفته در علوم و فناوری نیاز به یک مجموعه روش‌های سیستماتیک برای تعیین ضرورت‌ها و اولویت‌های نگهداری و تعمیر از روسازی بیشتر احساس می‌شود و در اقتصاد امروز نیاز به مدیریت روسازی از نگهداری از شبکه‌های روسازی، ضروری تر است. فرآیند مدیریت روسازی از بخش‌های مختلفی تشکیل شده‌است که هسته آن یا به عبارتی مهمترین قسمت آن را می‌توان جمع‌آوری داده از سطح روسازی به منظور بررسی وضعیت و شرایط آن نام برد. جمع‌آوری داده از سطح روسازی را می‌توان به دو دسته اصلی شیوه دستی (سنسی) و شیوه خودکار یا نیمه‌خودکار

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: agolroo@aut.ac.ir

پلاستیکی شفاف تصاویری دریافت نمی‌شود. به همین دلیل در این مواقع باید از حسگرهای فراصوت استفاده کرد [۹]. تصاویر عمق دریافتی از سطوحی با بازتابندگی بالا و یا دارای رنگهای خیلی تیره، دقیق نمی‌باشد یعنی فاصله دریافتی از حسگر بیشتر از فاصله واقعی است [۶]. اما در مورد برداشت داده از سطوح روسازی تاکنون محدودیت و خطایی ارائه نشده‌است.

به منظور بهبود تصاویر دریافتی از حسگر کینکت در ابتدا مراجع خطاهایی که داده‌ها را دچار انحراف از واقعیت می‌کند، بیان می‌گردد. اولین خطا، خطای سیستماتیک است که توسط کالیبراسیون حسگر برطرف می‌شود [۱۰]. خطای دیگر مربوط به شیوه داده‌برداری است که با طراحی ابزار مناسب این خطا را نیز می‌توان کاهش داد. در مطالعات مختلف به منظور کاهش خطاها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌است. از آنجایی که داده‌های کناری در هر فریم دارای نویز می‌باشد، به همین دلیل نمی‌توان از کل آرایه‌های ماتریس استفاده کرد [۳ و ۱۱]. به همین دلیل میانگین‌گیری از فریم‌ها و استفاده از پیکسل‌های مرکزی توصیه می‌گردد [۱۰]. به منظور بررسی وضوح تصویر، می‌توان ابتدا در فواصل مختلف عمق را با کینکت اندازه‌گیری کرده و سپس فریم مربوط به هر فاصله را شناسایی کرده و داده‌های مربوطه را مرتب کرد. با کم کردن مقادیر مینیمم و ماکسیمم این داده‌ها می‌توان دقت و یا وضوح تصویر را محاسبه کرد، که در نهایت نتیجه می‌شود با افزایش فاصله بین حسگر و سطح مقابل، وضوح تصویر کاهش می‌یابد [۱۱].

در هنگام برداشت داده‌های خرابی از سطح روسازی انواع گوناگونی از خرابی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. خرابی‌های سطح روسازی موجب کاهش قابلیت سرویس‌دهی روسازی، کاهش کیفیت سواری، بروز مشکلاتی درخصوص ایمنی مسیر و ناراضایتی کاربران از راه و به طور کلی از بین رفتن سرمایه‌های ملی می‌شوند. برداشت خرابی شامل برداشت نوع، شدت و وسعت یک خرابی است. اگرچه که این اطلاعات مربوط به خرابی‌ها با توجه به کاربرد زیادی که دارند به عنوان مبنا در تصمیم‌گیری‌ها مطرح هستند، اما تنوع بسیار زیادی در چگونگی برداشت، ثبت، تحلیل، خلاصه‌سازی و ذخیره این اطلاعات وجود دارد.

امروزه سیستم‌های خودکار و نیمه‌خودکار برای برداشت داده‌های سطح روسازی توجه بیشتری صورت می‌گیرد تا بتوان به صورت سه‌بعدی وضعیت و شرایط روسازی را مشخص و مورد بررسی و ارزیابی قرارداد. حسگر کینکت به عنوان یک فناوری نوین و مقرون‌به‌صرفه این توانایی را دارد که مشخصات سطح روسازی را به صورت سه‌بعدی و پیوسته در اختیار کاربر قرار بدهد چرا که با توجه به ارتفاع از سطح زمین و زاویه دید حسگر V2 می‌تواند در هر سه میلی‌متر یک برداشت داده از سطح روسازی انجام بدهد.

### ۳- ادبیات موضوع

با وجود تحقیقات بسیار در خصوص استفاده از قابلیت ثبت تصویر عمق توسط کینکت، تنها تعداد محدودی مطالعه به قابلیت استفاده از آن

نقشه‌برداری، روباتیک و غیره قرار گرفته‌است و با توجه به قابلیت این حسگر در برداشت تصاویر رنگی و عمق می‌توان از آن به عنوان یک فناوری کاربردی و عملیاتی در برداشت داده خرابی از سطح روسازی به ویژه خرابی‌های دارای عمق مثل چاله، ترک خوردگی، شیارشدگی استفاده کرد.

### ۲- پیش‌زمینه

حسگر کینکت توسط شرکت مایکروسافت و با همکاری شرکت پرایمسنس<sup>۱</sup> توسعه یافت و برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ رونمایی و نهایتاً در سال ۲۰۱۰ به بازار عرضه شد. نسخه اول حسگر کینکت از یک دوربین ثبت تصاویر رنگی (RGB)، شتاب‌سنج، میکروفون، یک فرستنده و یک دریافت کننده پرتو مادون قرمز، تشکیل شده‌است [۲]. کینکت نوع دوم (V2)، چهارسال بعد وارد بازار شد که دارای وضوح تصویر بیشتری نسبت به حسگر نوع اول (V1) و دارای قابلیت ثبت تصاویر عمق با دقت بالاتر می‌باشد. این حسگر از فناوری زمان سیر امواج<sup>۲</sup>، استفاده می‌کند و می‌تواند همانند حسگر نوع اول تصاویر رنگی، عمق و صدا را دریافت کند [۳]. حسگر کینکت نیز همانند سایر فناوری‌ها و حسگرها دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. حسگر کینکت نوع دوم (V2)، قابلیت اندازه‌گیری فاصله‌های کمتر از ۰/۸ متر و تا ۶ متر را داراست، درحالی که حسگر کینکت نوع اول (V1) که مطالعات علمی بیشتری روی آن صورت گرفته است، قابلیت اندازه‌گیری در فاصله کمتر از ۰/۸ متر را به صورت معمولی ندارد [۴] مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهند که خطای اندازه‌گیری حسگر نوع دوم ارتباطی به فاصله از شی ندارد اما در حسگر نوع اول با افزایش فاصله این خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد [۵]. از جمله نرم‌افزارهای قابل استفاده توسط هر دو نوع دوربین کینکت می‌توان open NI، MATLAB SDK را نام برد. در این مقاله از نرم‌افزار MATLAB R2016a به منظور برداشت و پردازش نتایج استفاده شده‌است که این قابلیت را دارد که حسگر کینکت (V2) را به آن متصل کرد و هر دو تصاویر رنگی و مادون قرمز و همچنین ماتریس‌های عمق را برداشت کند.

کینکت نوع اول با توجه به فناوری تصویر برداری خود، قابلیت تصویر برداری در محیط خارجی را ندارد اما نوع دوم به کمک فناوری زمان سیر موج این امکان را فراهم می‌کند [۶ و ۷]. اما به طور کلی بهترین شرایط برای داده‌برداری توسط حسگر کینکت از سطح روسازی در شرایطی است که تابش مستقیم نور خورشید وجود نداشته باشد که با استفاده از سایبان می‌توان این شرایط را فراهم کرد و نیازی به داده‌برداری در شب نیست درحالی که تعدادی از تکنولوژی‌های مورد استفاده در سیستم‌های خودکار داده‌برداری تنها در طول شب قابل استفاده هستند [۸].

حسگر کینکت در تصویربرداری از سطوح مختلف محدودیت‌هایی دارد که به کیفیت سطوح از نظر رنگ و سختی وابسته است. از سطوح شیشه و

1 PrimeSense  
2 Time of Flight

پرداخته‌است و ارائه کرده است که این حسگر اطلاعات ژئومتری قابل قبولی در مورد خرابی روسازی در اختیار قرارمی‌دهد و این الگوریتم در تشخیص ترک‌های با شدت بیشتر عملکرد بهتری دارد [۱۹]. در سال‌های اخیر چن<sup>۵</sup> و همکاران، از چند حسگر کینکت و شتاب‌سنج‌های سه محوره در یک سیستم برداشت داده از سطح روسازی استفاده کردند و به برداشت خرابی‌های سطح روسازی پرداختند [۲۰]. تمامی بررسی‌های صورت گرفته تا کنون، از حسگر کینکت نوع اول (V1) استفاده کرده‌اند و تاکنون توسط نسخه جدید (V2) این حسگر که از فناوری زمان سیر امواج استفاده می‌کند و به تازگی وارد بازار شده و دقت و وضوح تصویر بالاتری دارد، در حوزه تشخیص و برداشت خرابی روسازی مانند خرابی شیارشدگی، ناهمواری روسازی و چاله که از انواع خرابی‌های بحرانی است، مطالعه‌ای صورت نگرفته‌است.

#### ۴- هدف و قلمرو تحقیق

هدف این پژوهش بکارگیری و کالیبراسیون حسگر کینکت نوع دوم (V2) به عنوان یک فناوری نوین و مقرون به صرفه در حوزه روسازی و برداشت داده‌های مختلف از جمله داده‌های خرابی از سطوح روسازی می‌باشد. دستگاه طراحی و ساخته شده در این پژوهش قابلیت برداشت داده در حالت استاتیک و متحرک را داشته و از این فناوری در سطوح روسازی آسفالتی که دارای خرابی‌های شیارشدگی، چاله و ناهمواری است داده‌برداری صورت گرفته‌است و عملیات دوختن تصاویر رنگی و عمق و تشکیل موزاییک سطح روسازی با شیوه‌ای نوین و کارآمد صورت گرفته‌است.

#### ۵- روش تحقیق

با توجه به ویژگی‌های حسگر انتخاب شده دستگاهی به منظور داده‌برداری از سطح روسازی طراحی و ساخته شده‌است. در مرحله بعدی داده‌برداری‌هایی به صورت آزمایشی در محیط آزمایشگاه و در محل انجام شده‌است تا در نهایت با توجه به ویژگی‌ها و مشخصات تصاویر رنگی و عمق، عملیات داده‌برداری اصلی با دقت قابل قبول و در نظر گرفتن همه شرایط انجام شود. در داده‌برداری آزمایشی در محل و آزمایشگاه مجموعه‌ای از تصاویر رنگی، مادون قرمز و عمق متناظر و همچنین ابرنقاط نیز ذخیره شدند. پس از آن کالیبراسیون دوربین انجام شد و ماتریس نگاشت تصاویر رنگی و مادون قرمز به دست آمد.

پس از جمع‌آوری داده به دو صورت دستی و با استفاده از حسگر کینکت باید به پیرایش داده‌ها و حذف نویزها و خطاهای موجود در داده‌های خام پرداخت تا بتوان با استفاده از داده‌های تصحیح شده و انجام کالیبراسیون بر روی داده‌های عمق و رنگی و دوختن این مجموعه تصاویر، تصویر سه بعدی از سطح روسازی ساخت و نیمرخ عرضی و طولی مسیر را از آن استخراج کرد. شکل ۱ روش انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

در زمینه برداشت خرابی‌های دارای عمق روسازی پرداخته‌اند [۱۲]. معظم<sup>۱</sup> و همکاران از حسگر کینکت نوع اول (V1)، برای برداشت و محاسبه حجم چاله استفاده کردند. آنها از خرابی چاله در دو نوع روسازی‌های بتنی و آسفالتی عکسبرداری کردند و برای مشاهده بهتر چاله‌ها از مش بندی تصاویر استفاده کردند. مساحت چاله‌ها با توجه به عمق تحلیل شدند و حجم تقریبی چاله با استفاده از قانون دوزنقه، محاسبه شد. علاوه بر این، مساحت، طول و عرض چاله نیز محاسبه شد. تصاویر با قراردادن حسگر در فاصله ۰/۸ تا ۰/۹ متری بالای سطح زمین گرفته شد. نتیجه حاصل از این بررسی مقدار خطای حدود  $\pm 15\%$  درصد را در مقایسه با داده‌های مرجع برداشت شده در محل نشان می‌دهد [۱۳]. آنها همچنین در بررسی اخیر خود از چاله‌های مصنوعی با ابعاد مشخص استفاده کردند تا عملکرد روش خود را در ارزیابی شرایطی که چاله‌ها با آب تمیز، گل‌آلود و روغنی پر شده‌است بررسی کنند [۱۴].

ژوبرت<sup>۲</sup> و همکاران، یک سیستم ارزان قیمت را که می‌تواند بر روی وسیله نقلیه نصب شود و به صورت خودکار به برداشت داده‌های خرابی چاله بپردازد، ارائه کردند. این سیستم همچنین می‌تواند عکس، داده ابر و نقطه سه بعدی و محل چاله را ثبت کند. این اطلاعات پس از آن تحلیل می‌شوند تا عرض و عمق چاله را محاسبه کنند، محل چاله نیز بر روی یک نقشه از مسیر جاده قرار داده می‌شود. این سیستم قابلیت نصب بر روی یک وسیله که با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت در حرکت است را دارا می‌باشد. در زمان ارائه این گزارش پروژه آنها در مراحل اولیه کار و به صورت تئوری بوده‌است ولی تعدادی آزمایش در محل برای تعیین قابلیت استفاده از کینکت نوع اول (V1) در تشخیص چاله صورت گرفته‌است [۱۵ و ۱۶]. کوچ<sup>۳</sup> و همکاران، از دوربین کینکت برای ثبت تصاویر ویدیویی از خرابی چاله استفاده کردند و با توجه به ساختار و بافت سطح سالم روسازی محل‌های دارای خرابی چاله را در فریم‌های برداشتی تشخیص دادند [۱۷].

جهانشاهی و همکاران به بررسی خرابی‌های چاله، وصله و ترک در سطح روسازی با استفاده از حسگر کینکت نوع اول (V1) پرداختند. حسگر کینکت در فاصله ۷۷/۸ سانتیمتری از سطح روسازی قرار داده شد و تصاویر عمق از روسازی گرفته شد. در این بررسی بدون انجام تنظیمات خاصی برای حسگر کینکت خرابی چاله، وصله و ترک با دقت‌های متناظر ۰/۹۲٪، ۰/۸۰٪ و ۰/۷۸٪ تشخیص داده شدند. این سیستم برای تشخیص خرابی‌های که عرض حداقل ۱۵ میلی‌متر و عمق حداقل ۱۲ میلی‌متر دارند مناسب بوده‌است، بنابراین ترک‌های با شدت کم با استفاده از این رویکرد و حسگر کینکت نوع اول (V1) به خوبی قابل تشخیص نبوده‌اند [۱۸].

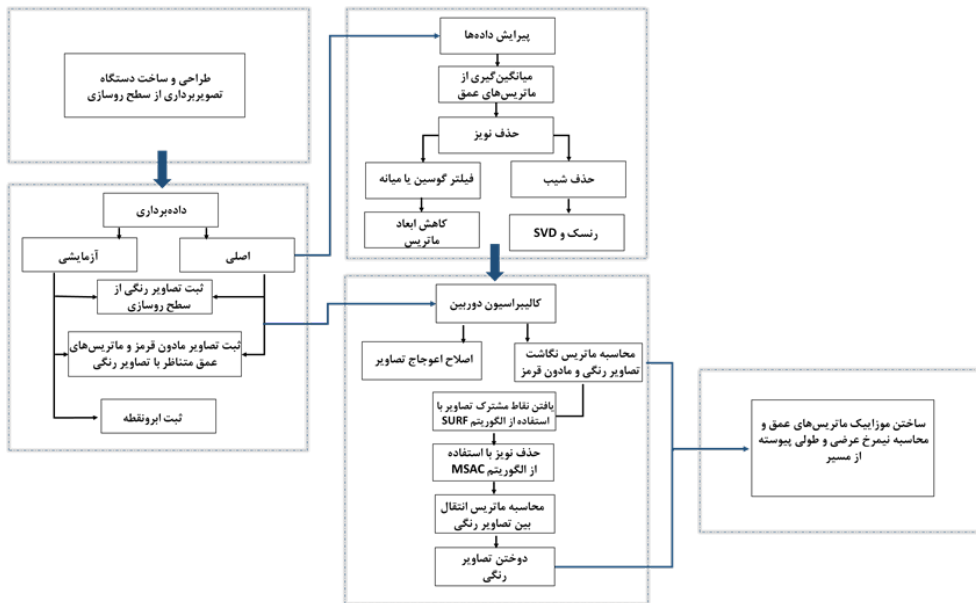
زی<sup>۴</sup> در پایان نامه خود با اندازه‌گیری عمق، عرض، طول و مساحت انواع مختلف ترک‌ها مثل ترک‌های پوست سوسماری، طولی، عرضی و دیگر موارد به تشخیص و بررسی شدت آنها توسط حسگر کینکت نوع اول (V1)

1 Moazzam

2 Joubert

3 Koch

4 Xie



شکل ۱. روند انجام پژوهش

Fig. 1. Research methodology

پس از بررسی‌ها و برداشت‌های مختلف با این دستگاه و بررسی و تحلیل اولیه بر روی داده‌های خروجی، درنهایت دستگاهی برای داده‌برداری طراحی و ساخته شد که این قابلیت را داشته‌باشد که بتوان از آن برای داده‌برداری‌های در حالت استاتیکی و متحرک در سطوح ارتفاعی مختلف استفاده کرد. این دستگاه با توجه به مشخصات و میدان دید حسگر کینکت به نحوی طراحی شده‌است که به بهترین صورت و با کمترین مقدار داده‌های پرت ایجاد شده، به دلیل زاویه دید دوربین، عمل کند و همچنین تصاویر دریافتی از آن یک خط عبور روسازی به عرض ۳/۶ متر را پوشش دهد. شکل ۳ طرح‌های اولیه دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. طرح اولیه دستگاه داده‌برداری

Fig. 3. The first scheme of the data collection device

الف) گام اول: طراحی و ساخت دستگاه تصویربرداری از سطح روسازی برای داده‌برداری از سطح روسازی نیاز است تا دستگاهی مورد استفاده قرار بگیرد که بتوان حسگر کینکت را بر روی آن نصب کرد و در سطح ارتفاعی مشخصی به تصویربرداری از سطح روسازی پرداخت. به این منظور ابتدا به عنوان طرح اولیه از یک سه‌پایه دوربین با ارتفاع متغیر از ۰/۵ تا ۱/۵ متر استفاده شده‌است که شکل ۲ نمونه اولیه دستگاه مورد استفاده در داده‌برداری‌های آزمایشی اولیه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. دستگاه اولیه مورد استفاده برای داده‌برداری، داده‌برداری با سه‌پایه دوربین از سطح روسازی

Fig. 2. The primary device used for data collection

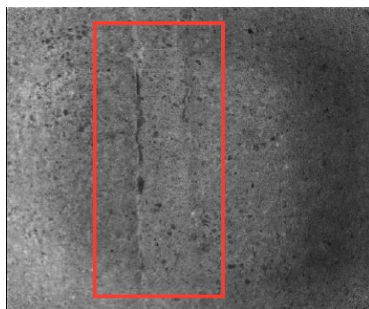


شکل ۵. داده برداری از سطح روسازی با سه پایه و حسگر کینکت  
 Fig. 5. Pavement data collection with a tripod and the Kinect sensor

در این عملیات داده برداری، تصاویری از سطح روسازی که دارای فرورفتگی‌هایی در محل بود گرفته شد. علاوه بر تصاویر رنگی و مادون قرمز، تصاویر عمق و ماتریس عمق متناظر هر تصویر نیز تهیه شد (شکل‌های ۶ و ۷).



(الف)

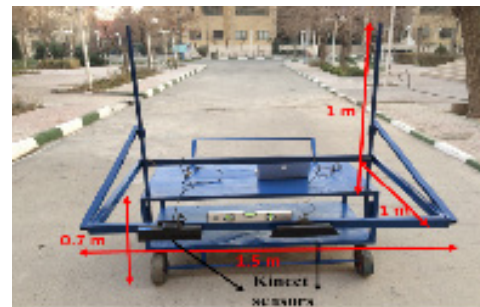


(ب)

شکل ۶. تصاویر رنگی (الف) و مادون قرمز (ب) از سطح روسازی شیارشده

Fig. 6. (a) RGB image, (b) IR image from the pavement surface

عرض دستگاه معادل با ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است که تقریباً معادل با فاصله محور تا محور چرخ‌های وسایل نقلیه برداشت داده خودکار خرابی می‌باشد و در محدوده ایمن و قابل قبول برای حرکت در یک خط از مسیر عبور می‌باشد. با در نظر گرفتن ارتفاع مناسب داده برداری در بازه ۰/۸ تا ۱/۲ متری و همچنین با توجه به زاویه دید دوربین که ۷۰ درجه در راستای عرض مسیر و ۶۰ درجه در راستای طولی مسیر می‌باشد، عرض تحت پوشش در هر سطح ارتفاعی را با توجه به فاصله دو حسگر می‌توان محاسبه نمود. که این مقدار از بازه ۱/۲ متری تا ۳/۲ متر برای ارتفاع ۰/۸ متر و ۱/۲ متری به طور متناظر تغییر می‌کند. در قسمت جلویی دستگاه محل‌هایی با فواصل مشخص برای نصب حسگرها در نظر گرفته شده است تا بتوان با توجه به سطح ارتفاع داده برداری فاصله بین حسگرها را نیز تغییر داد تا علاوه بر تامین همپوشانی لازم بین تصاویر، بیشترین عرض ممکن را نیز تحت پوشش قرار داد. شکل ۴ نمای کلی دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.



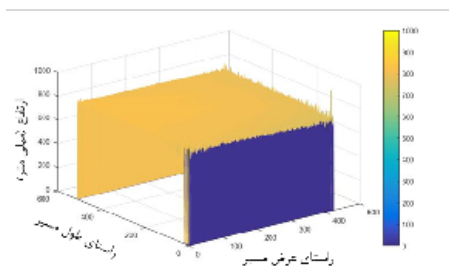
شکل ۴. دستگاه ساخته شده برای انجام پژوهش

Fig. 4. Data collection cart that was used in this study

برای افزایش دقت در داده‌های ارتفاعی نیاز است تا قسمت متحرک جلوی دستگاه که محل قرارگیری حسگر می‌باشد و همچنین خود حسگر تراز شوند و برای تعیین دقیق ارتفاع حسگر از سطح روسازی از متر لیزری استفاده شده است.

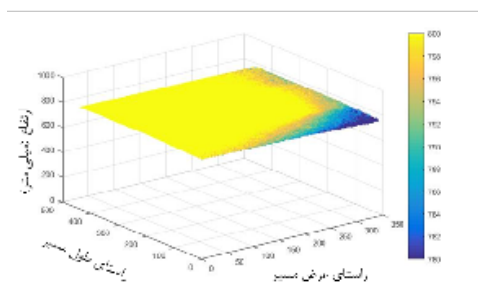
(ب) گام دوم: داده برداری از سطح روسازی

عملیات داده برداری در این پژوهش در چندین مرحله به صورت آزمایشی اصلی، در محل و در محیط آزمایشگاه صورت گرفته است. عملیات داده برداری ابتدا توسط سه پایه و دوربین انجام گرفت تا مشخصات و مشکلات تصاویر برداشتی به خوبی تشخیص داده شوند تا بتوان برای طراحی دستگاه اصلی این خطاها و عوامل آن‌ها را شناسایی کرده و برطرف نمود. شکل ۵ داده برداری آزمایشی در سطح روسازی را توسط سه پایه و حسگر کینکت نشان می‌دهد.



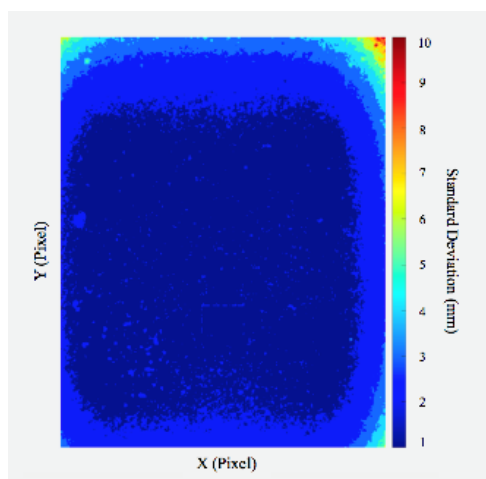
شکل ۸. وجود داده‌های پرت در نقاط پیرامونی

Fig. 8. Noise existence in the peripheral part of the depth data



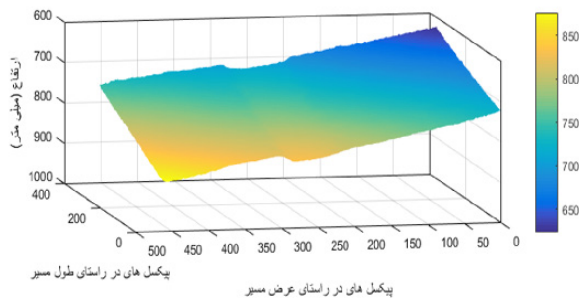
شکل ۹. تصویر عمق پس از حذف نویز (در نظر گرفتن قسمت میانی ماتریس عمق)

Fig. 9. Depth data after noise reduction



شکل ۱۰. انحراف معیار هر پیکسل در ۵۰۰ فریم برداشتی

Fig. 10. The standard deviation of each pixel over 500 depth frames



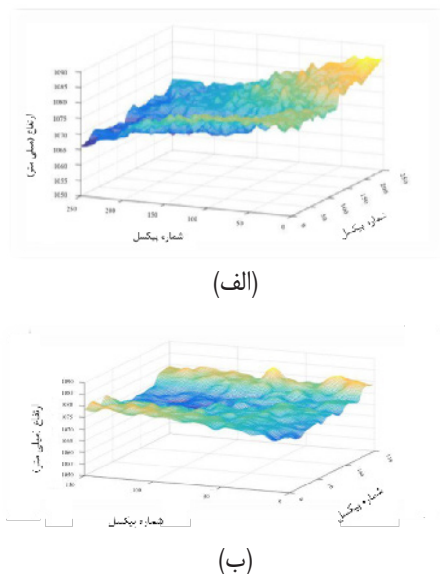
شکل ۷. تصویر سه بعدی از داده‌های ارتفاعی

Fig. 7. Sample of depth data from a pavement surface

همان‌طور که در تصاویر بالا مشخص است تصاویر عمق گرفته شده با حسگر کینکت دارای مقداری شیب است که در سطح روسازی وجود نداشته است و در داده‌برداری اصلی سعی شده است تا با تراز کردن دستگاه و دوربین این خطا را به حداقل رساند و در ادامه نیز شیوه حل این مشکل به طور کامل توضیح داده شده است.

(ج) گام سوم: پیرایش داده‌ها

نخستین مرحله پس از تصویربرداری و تهیه داده‌های خام، پیرایش اطلاعات، اصلاح و یا حذف نویزها و خطاها می‌باشد. از جمله خطاهایی که در تصاویر و داده‌های عمق برداشتی با حسگر کینکت مشاهده می‌شود، وجود نویز در نقاط گوشه تصاویر می‌باشد به نحوی که مقادیر ماتریس عمق متناظر با این نقاط برابر با صفر است (شکل ۸). که این موضوع در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است [۱۰]. در ابتدا برای افزایش دقت داده‌برداری و سه‌بعدی سازی سطح روسازی از هر سطح روسازی تعداد ۱۰۰ فریم برداشت شد و میانگین آن‌ها به صورت پیکسل به پیکسل به عنوان داده‌های ارتفاعی سطح مورد نظر، در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، تصاویر و داده‌های عمق در نقاط گوشه و اطراف دارای نویز هستند. در اینجا به دلیل نیاز به دقت بالا در محاسبات داده‌های ارتفاعی، امکان جایگذاری این نقاط با میانگین و یا مقادیر داده‌های مربوط به خانه‌های کناری مناسب نیست به همین دلیل برای حل این مشکل قسمت میانی هر تصویر به اندازه ۳۷۰ در ۴۱۰ برای محاسبات در نظر گرفته شد (شکل ۹). شکل ۱۰، انحراف معیار هر پیکسل در ۵۰۰ فریم برداشت شده از یک تکه از سطح آسفالتی، پس از کنار گذاشتن ۶۰ پیکسل کناری در محور افقی و عمودی را نشان می‌دهد. علت کنار گذاشتن ۶۰ پیکسل کناری، حداکثر بودن نویز در آن قسمت هاست. همان‌طور که از این تصویر مشخص است، با حرکت کردن به قسمت مرکزی ماتریس داده‌ها، انحراف معیار داده‌ها کمتر می‌شود، و این امر باعث گردید تا قسمت مرکزی داده‌ها جهت تحلیل مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۱. چرخش صفحه مربوط به داده‌های سطح روسازی توسط الگوریتم SVD. (الف) تصویر اولیه. (ب) تصویر پس از اعمال SVD

Fig. 11. Rotation of pavement depth data using SVD algorithm, (a) before rotation, (B) after performing SVD

(د) گام چهارم: کالیبراسیون دوربین

باتوجه به فناوری متفاوت کینکت نوع اول و دوم پارامترهای کالیبراسیون محاسبه شده برای کینکت نوع اول را نمی‌توان برای نوع دوم مورد استفاده قرارداد [۲۶]. بنابراین در این پژوهش در ابتدا نیاز است تا با توجه به فناوری حسگر کینکت که تصاویر رنگی و مادون قرمز توسط دو دوربین مختلف گرفته می‌شوند که دارای زاویه دید متفاوت هستند و با یک فاصله از هم قراردارند، ارتباط و نگاشت بین این تصاویر محاسبه شود تا بتوان از آن برای دوختن تصاویر عمق استفاده کرد. به طور کلی عملیات کالیبراسیون شامل دو مرحله می‌باشد. اصلاح اعوجاج و انطباق بین تصاویر رنگی و مادون قرمز (تصاویر عمق).

لنز دوربین باعث ایجاد اعوجاج در تصاویر می‌شود و در هر دو دوربین مادون قرمز و رنگی این اتفاق رخ خواهد داد. ابزارهایی برای تعیین پارامترهای ذاتی دوربین وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان جعبه ابزارهای موجود در برنامه متلب را نام برد. مجموعه‌ای از تصاویر رنگی و مادون قرمز مورد استفاده قرارگرفت تا نقاط گوشه صفحه شطرنجی در تصاویر مشخص شوند، سپس با حل معادلات مربوط به نقاط گوشه متناظر و روش بهینه سازی غیرخطی برای کاهش میزان خطا، پارامترهای درونی دوربین مثل فاصله کانونی<sup>۲</sup>، نقاط اصلی<sup>۳</sup> و میزان انحراف<sup>۴</sup> تعیین شد و پس از آن اعوجاج

علاوه بر این، از فیلتر گوسین به منظور بهینه‌سازی تصاویر استفاده شده است. این فیلتر با میانگین‌گیری وزن دار سلول‌های مجاور که در غالب یک ماتریس حداقل مرتبه سه به نرم‌افزار تفهیم می‌شوند، بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. وزن اعمالی بر روی پیکسل‌های مجاور بر حسب توزیع نرمال محاسبه می‌شود به نحوی که با دورشدن از سلول اصلی (سلول هدف)، وزن اعمالی کاهش می‌یابد. در این فیلتر که یکی از انواع فیلتر پایین‌گذر است، داده‌های موجود در ماتریس، نرم شده و اثر تغییرات کوچک در داده‌ها (تغییرات سریع یا نویز)، کمرنگ می‌شود. علی‌رغم این که قبل از انجام داده‌برداری دوربین و دستگاه نسبت به زمین کاملاً تراز شدند، همچنان تصاویر حاصله دارای مقداری شیب در هر دو جهت هست که به منظور رفع این مشکل می‌توان از الگوریتم‌های مختلفی استفاده کرد. جهان‌شاهی و همکاران از الگوریتم RANSAC استفاده کردند [۱۸]. در این الگوریتم به صورت تصادفی تعدادی نقطه از مجموعه نقاط تشکیل دهنده صفحه توسط الگوریتم انتخاب می‌شود و صفحه عبوری از این نقاط محاسبه می‌گردد. با توجه به ماهیت این الگوریتم صفحه انتخابی و برازش شده به مجموعه داده‌ها در هر بار کاملاً متفاوت از قبل بوده و خاصیت تکرارپذیری صادق نمی‌باشد. در مطالعه کمال و همکاران از روش فیلتر میانگین برای اصلاح چرخش در دوربین کینکت نوع اول (V1) استفاده شده است [۱۴].

در این مقاله برای صاف کردن صفحه داده‌ها ابتدا از الگوریتم SVD استفاده شد، که حول مرکز داده‌ها، جهت پراکندگی را تشخیص داده و صفحه را می‌چرخاند [۲۱]. الگوریتم SVD کاربردهای زیادی دارد که تشخیص جهتی که توزیع داده‌ها در آن جهت انجام شده و یافتن بهترین تقریب که داده‌های اصلی کمترین انحراف را نسبت به آن داشته باشند، از جمله آن‌ها است [۲۲]. الگوریتم SVD جهت داده‌ها را در فضا با توجه به پراکندگی اکثریت داده‌ها (نه همه داده‌ها) تشخیص داده و سپس آن را حول صفحه XY می‌چرخاند. به بیان جامع‌تر، با اعمال ریاضی روی ماتریس اولیه، عملیات چرخاندن و تصویر سازی داده‌ها را با این شرط که طول ماتریس ثابت بماند، انجام می‌دهد [۲۳ و ۲۴]. لازم به ذکر است که در این الگوریتم می‌توان یک حد آستانه تعریف کرد که مقادیری که از آن کمتر هستند را وارد محاسبات نکند [۲۵]. شکل ۱۱ تصویری از چرخش داده‌های برداشتی از سطح روسازی را با استفاده از این روش است.

2 Focal length  
3 Principal points  
4 Skew

1 Random sample consensus

عمق ابتدا تصاویر رنگی به هم متصل شد و با استفاده از رابطه بین تصاویر رنگی و مادون قرمز، ماتریس‌های عمق به‌همدیگر متصل شد. الگوریتم‌های دوختن تصاویر از پرکاربردترین انواع الگوریتم‌ها در مسائل بینایی کامپیوتر و بینایی ماشین می‌باشد [۲۷]. در این مقاله برای دوختن تصاویر رنگی حسگر کینکت ابتدا از روند ساختن تصاویر پانوراما، برای دوختن تصاویر به یکدیگر، با استفاده از نرم‌افزار متلب استفاده شد.

به طور کلی دو نوع الگوریتم برای هم تراز کردن تصاویر و دوختن آن‌ها به یکدیگر وجود دارد: مستقیم یا براساس مشخصه‌ها [۲۷]. شیوه مستقیم از تمامی اطلاعات و داده‌های عکس استفاده می‌کند و بنابراین دقت بالاتری دارد در حالی که دوختن تصاویر بر اساس مشخصه‌ها و ویژگی‌های تصاویر، سریع‌تر است و این قابلیت را نیز دارد تا به صورت خودکار همپوشانی بین تصاویر را تشخیص بدهد [۲۷ و ۲۸] ابتدا دو تصویر یا تصاویر مورد نظر از مقطع عرضی مسیر، در نرم‌افزار متلب فراخوانی شد. تصاویر شکل ۱۲ نمونه‌هایی از تصاویر اولیه گرفته شده با حسگر کینکت را نشان می‌دهند.

گام بعدی یافتن مشخصه‌های مشترک بین زوج تصاویر بود. در این مرحله با استفاده از الگوریتم SURF بین دو تصویر نقاط مشترک مشخص شد [۲۹]. الگوریتم SURF یک الگوریتم در حوزه علم بینایی ماشین است که برای استخراج ویژگی‌های مشخص از تصاویر برای ایجاد انطباق بین نماهای مختلف از یک تصویر و یا شناسایی اجسام به کار می‌رود. از جمله کاربردها و ویژگی‌های این الگوریتم تشخیص شیء، ثبت تصاویر، طبقه‌بندی تصاویر و ساختن ساختار سه‌بعدی می‌باشد. با توجه به این که تصاویری که از مقطع عرضی مسیر گرفته شده‌اند دارای هم‌پوشانی و نقاط مشترک هستند در این قسمت با استفاده از این الگوریتم نقاط مشترکی که بین دو تصویر گرفته شده وجود دارد تشخیص داده شده و برای دوختن تصاویر به یکدیگر استفاده می‌شود [۲۹].

شعاعی<sup>۱</sup> دوربین رنگی اصلاح شد.

انطباق بین تصاویر مادون قرمز و رنگی با محاسبه ماتریس انتقال بین آن‌ها انجام شد و با توجه به این موضوع که تصاویر عمق نیز با دوربین مادون قرمز ایجاد شده‌اند با این ماتریس انتقال، انطباق بین تصاویر عمق و رنگی نیز انجام گرفت. در اینجا ماتریس انتقال با استفاده از تصاویر مادون قرمز و رنگی به دست آمده است. ماتریسی که مختصات تصویر رنگی  $(x,y)$  را به مختصات تصویر مادون قرمز  $(X,Y)$ ، تبدیل می‌کند در زیر نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ماتریس معادله (۱) را با داشتن مقادیر مشخص ۸ پارامتر می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۲۶].

$$X = a_1 x + a_2 y + a_3 - a_7 x - a_8 y \quad (2)$$

$$Y = a_4 x + a_5 y + a_6 - a_7 x - a_8 y \quad (3)$$

مقادیر  $(x,y)$  و  $(X,Y)$  برای ۴ نقطه متناظر باید مشخص باشد تا بتوان معادله را حل نمود. در اینجا برای یافتن نقاط متناظر بین تصاویر رنگی و مادون قرمز از صفحه شطرنجی استفاده شد. این نقاط متناظر به صورت دستی انتخاب شدند و با استفاده از این نقاط، ۸ پارامتر مربوط به ماتریس انتقال محاسبه شد. در اینجا از ۵۰ جفت از نقاط متناظر تصاویر در یک فاصله محدود برای محاسبه معادلات ۲ و ۳ استفاده شد. ماتریس زیر، ماتریس انتقال محاسبه شده توسط روش به کار گرفته شده در این پژوهش، که برای کالیبراسیون تصاویر کینکت نوع دوم که در فواصل حدود ۷/۱۰ تا ۵/۱۰ گرفته شده‌اند، را نشان می‌دهد.

$$T = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.009 & 0 \\ 0.003 & 0.3531 & 0.0001 \\ -101.593 & 13.6311 & 0.999 \end{bmatrix}$$

اندازه تصاویر رنگی و مادون قرمز و همچنین زاویه دید این تصاویر باهم متفاوت می‌باشد. اندازه اصلی تصاویر رنگی ۹۲۰ در ۱۰۸۰ پیکسل و تصاویر مادون قرمز ۵۱۲ در ۴۲۴ پیکسل می‌باشد و اندازه تصاویر هم اندازه شده در این مرحله ۳۷۰ در ۴۶۰ پیکسل است. پس از منطبق کردن تصاویر رنگی و مادون قرمز با توجه به این که تصاویر و داده‌های عمق نیز با دوربین مادون قرمز گرفته شده‌اند، تصاویر عمق نیز به صورت خودکار بر این تصاویر منطبق شد و مقادیر تصاویر رنگی و عمق برای هر پیکسل به صورت متناظر محاسبه شد. در اینجا منظور از کالیبراسیون یافتن ماتریس انتقال برای انطباق تصاویر رنگی و عمق دوربین کینکت نوع دوم می‌باشد.

مرحله بعد پس از کالیبراسیون تصاویر رنگی و عمق، دوختن تصاویر به هم و تشکیل ساختار سه‌بعدی سطح روسازی بود. برای دوختن تصاویر

## 1 Radial distortions

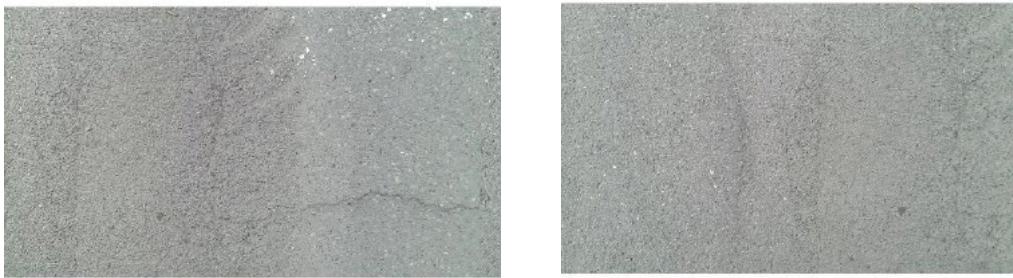




الف) سطح روسازی دارای خرابی چاله



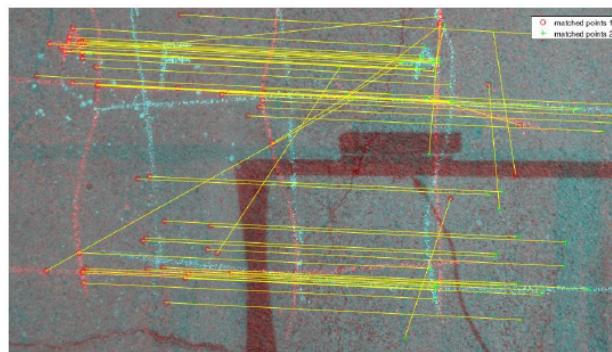
ب) سطح روسازی شیارشده با خط‌کشی



ج) سطح روسازی شیارشده بدون علامت

شکل ۱۲. تصاویر اولیه گرفته شده با حسگر کینکت

Fig. 12. RGB images. (a) pavement surface with a pothole, (b) marked surface, (c) pavement surface without marks



شکل ۱۳. یافتن نقاط مشترک بین دو تصویر با استفاده از الگوریتم SURF

Fig. 13. Find corresponding features using SURF algorithm

الگوریتم فرض می‌کند که حداقل ۵۰ درصد از نقاط متناظر بتوانند توسط ماتریس انتقال روی یکدیگر نگاشت پیدا کنند. این الگوریتم نیازی به تعیین مشخص بازه طولی ندارد اما از فاصله میانه بین همه نقاط تصویر اول استفاده می‌کند. فاصله معیار در الگوریتم به صورت زیر است:

$$d = \text{median}(D(p_1^b, \psi(p_1^a : H)), D(p_2^b, \psi(p_2^a : H)), \dots, D(p_{\text{Num}}^b, \psi(p_n^a : H))) \quad (5)$$

در هر دو معادله:

$p_1^a$ : نقطه در تصویر اول

$p_1^b$ : نقطه در تصویر دوم

$\psi(p_1^a : H)$ : تصویر یک نقطه در تصویر اول براساس ماتریس انتقال H

$D(p_1^b, p_j^b)$ : فاصله بین دو جفت از نقاط در تصویر دوم

t: حد آستانه

Num: تعداد نقاط

هرچه فاصله معیار کوچکتر باشد، ماتریس انتقال بهتری تولید شده و در نتیجه تصویر بهتری حاصل می‌شود. الگوریتم‌ها عمل مقایسه را انجام داده و آن را برای K بار بین ماتریس‌های انتقال متوالی اعمال می‌کند. این الگوریتم‌ها فاصله معیار را محاسبه و مقایسه می‌کنند و ماتریس انتقالی را که فاصله کوچکتری را تولید کند به عنوان ماتریس انتقال جدید معرفی می‌کنند و برای مقایسه بعدی مورد استفاده قرار می‌دهند.

روند تخمین ماتریس انتقال به ترتیب زیر است:

ماتریس انتقال برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به این که k، تعداد کل نمونه‌گیری‌های اعمال شده است تا زمانی که به این تعداد دست نیافته شد، به صورت تصادفی جفت نقاطی از عکس اول و دوم انتخاب شده، و ماتریس انتقال H محاسبه می‌شود و اگر ماتریس جدید دارای فاصله معیار کمتری از H قبل باشد، با آن جایگزین می‌شود و این روند تا پایان K مرتبه تکرار خواهد شد.

بهبود و تصحیح ماتریس انتقال H، با استفاده از همه جفت نقاط موجود در تصاویر اول و دوم که می‌توانند توسط ماتریس H نگاشت پیدا کنند، صورت می‌گیرد.

تعداد نمونه‌گیری‌های تصادفی که توسط الگوریتم‌های رنسک و MSAC مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

$$K = (\log(1-p)) / (\log(1-q^k)) \quad (6)$$

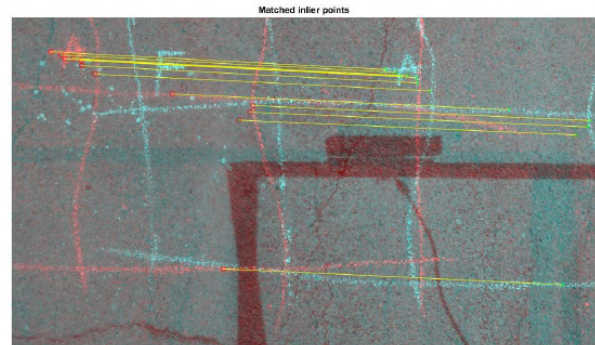
p: احتمال این که جفت نقاط مستقل، متعلق به یک گروه بزرگتری که می‌توانند با انتقال مشابه نگاشت شوند، باشند. احتمال با توجه به تعداد اینلایر های پیدا شده در برابر تعداد کل نقاط، به صورت خودکار توسط الگوریتم محاسبه می‌شود. با افزایش احتمال، تعداد نمونه‌گیری k کاهش می‌یابد.

q: احتمال یافتن بزرگترین گروه که می‌تواند توسط ماتریس انتقال مشابه نگاشت شوند.

s: با توجه به نوع انتقال برابر با ۲ یا ۳ و یا ۴ می‌باشد.

همان طور که در شکل ۱۳ مشخص است انتخاب نقاط مشترک بین دو تصویر با مقداری خطا همراه است. خطوط سفید مربوط به عکس اول و خطوط قرمز مربوط به عکس دوم می‌باشد که در بعضی نواحی این دو عکس دارای هم‌پوشانی می‌باشند و نقاط قرمز نقاط مربوط به مشخصه‌های انتخابی بین تصاویر است که با خطوط زرد رنگ به نقاط متناظر متصل شده‌اند.

برای رفع نویز و خطای موجود در تشخیص نقاط متناظر از الگوریتم MSAC که نوعی از الگوریتم رنسک می‌باشد استفاده شد [۳۰]. الگوریتم MSAC یک روش برآورد قوی برای یافتن ماتریس انتقال بین مجموعه نقاط در تصاویر است که با ماهیت تصادفی که دارد بهترین پارامترهای انتقال را بین نقاط متناظر در تصاویر با حداقل کردن مقدار خطا پیدا میکند. این الگوریتم زمانی که ماتریس انتقال بین تصاویر را محاسبه می‌کند، خطاها را حذف می‌کند [۳۱]. ماتریس انتقال، ماتریسی است که بیشترین تعداد جفت نقاط را بین دو تصویر بر روی یکدیگر نگاشت می‌کند. جفت نقاط در واقع نقاط موجود در تصویر اول و نقاط متناظر با این نقاط در تصویر دوم می‌باشند.

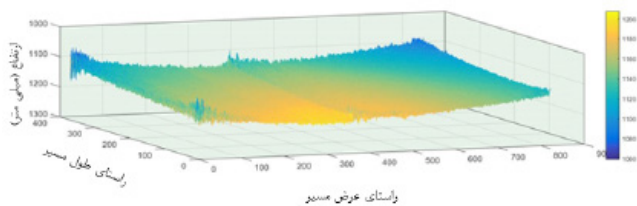


شکل ۱۴. حذف داده‌های پرت با استفاده از الگوریتم MSAC

Fig. 14. Remove outliers using MSAC algorithm

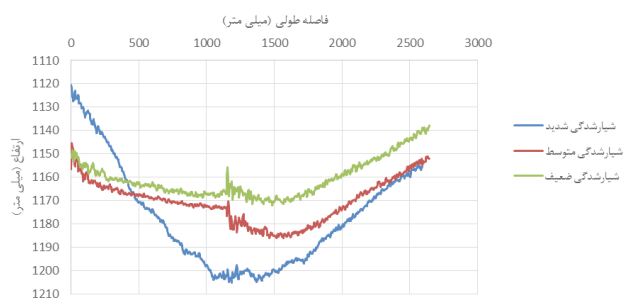
برای حذف داده‌های پرت همانند آنچه در شکل ۱۴ مشاهده شده است، و محاسبه دقیق ماتریس انتقال، می‌توان از الگوریتم‌های رنسک و یا Least Median Squares استفاده کرد به نحوی که می‌توان حتی از کلیه نقاط برای محاسبه ماتریس انتقال استفاده نمود. الگوریتم رنسک بر مبنای تعیین آستانه و بازه طولی عمل می‌کند به این ترتیب که مجموعه‌ای از نقاط  $p_1^a$  (نقاط تصویر اول) و  $p_1^b$  (نقاط تصویر دوم) نقاط متناظر صحیح می‌باشند تنها اگر فاصله بین  $p_1^b$  و  $p_1^a$  بر طبق ماتریس انتقال در یک بازه مشخص قرار بگیرند. فاصله معیاری که در الگوریتم رنسک مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

$$d = \sum_{i=1}^{\text{Num}} \min(D(p_i^b, \psi(p_i^a : H)), t) \quad (4)$$



شکل ۱۶. تصویر سه بعدی داده های عمق دوخته شده در یک مقطع عرضی

Fig. 16. Stitched depth data of the transverse profile



شکل ۱۷. نمونه ای از نیمرخ عرضی روسازی در ناحیه دارای خرابی شیارشده گی

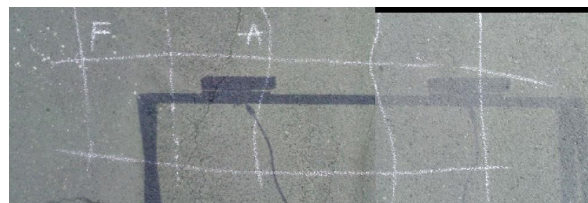
Fig. 17. Transverse profiles of pavement surface with rutting

شکل ۱۶، یک تصویر عمق دوخته شده از مقطع عرضی یک روسازی شیارشده را نشان می دهد و در شکل ۱۷ نیمرخ های عرضی استخراج شده از این تصویر که دارای سطح شدت مختلف می باشند نشان داده شده است. در ادامه به منظور بررسی و صحت سنجی دقت و صحت داده های حسگر کینکت، تصویر برداری از سطوح روسازی آسفالتی در ارتفاعات مختلف انجام گرفت. شکل ۱۸ نمودار مقایسه انحراف معیار داده های حسگر کینکت در برداشت از سطح روسازی آسفالتی می باشد. همانطور که در این نمودار مشخص است، پس از برازش خطی این نتیجه به دست آمد که در حسگر کینکت نوع دوم، میزان انحراف معیار داده ها با افزایش ارتفاع دوربین از سطح زمین ثابت بوده است. همچنین میزان انحراف معیار داده ها نیز کمتر از یک میلی متر است که نشان از دقت بالای این دوربین دارد. شکل ۱۹ که مقایسه داده های حسگر کینکت و داده های اندازه گیری شده واقعی با متر لیزری است، نشان می دهد که نقاط به خط  $y=x$  بسیار نزدیک است و این موضوع نشان دهنده مشابهت بالای مقادیر در دو برداشت (با استفاده از حسگر کینکت و متر لیزری) در سطوح ارتفاعی مختلف می باشد.

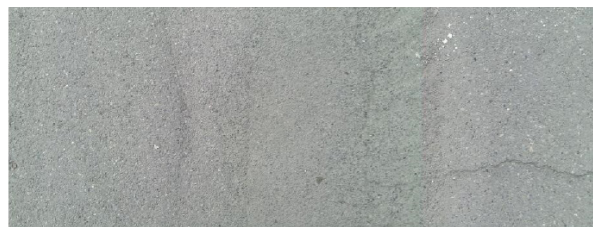
پس از آن، ماتریس انتقال تصاویر محاسبه شد و با اعمال آن بر روی تصویر دوم تصاویر مورد نظر به یکدیگر دوخته شد. شکل ۱۵ تصاویر دوخته شده مجموعه تصاویر شکل ۱۲ را نشان می دهد. یک نمونه ماتریس انتقال محاسبه شده به شکل زیر می باشد:



الف) سطح روسازی دارای خرابی چاله



ب) سطح روسازی شیارشده با خط کشی



ج) سطح روسازی شیارشده بدون علامت

شکل ۱۵. مجموعه نمونه تصاویر دوخته شده متناظر با شکل ۱۰

Fig. 15. Sample of stitched RGB images corresponding to Fig. 10

a) pavement surface with a pothole, (b) marked surface, (c) pavement surface without marks

ه) گام پنجم: ساختن موزاییک تصاویر عمق و تشکیل تصویر سه بعدی از روسازی

پس از انجام کالیبراسیون تصاویر رنگی و مادون قرمز و دوختن تصاویر رنگی به یکدیگر و یافتن ماتریس انتقال، با توجه به یکسان بودن تعداد پیکسل و شرایط تصاویر عمق با مادون قرمز و در اختیار داشتن ماتریس نگاشت تصاویر مادون قرمز و رنگی، که با کالیبراسیون به دست آمده است، می توان تصویر سه بعدی از سطح روسازی تهیه کرد.

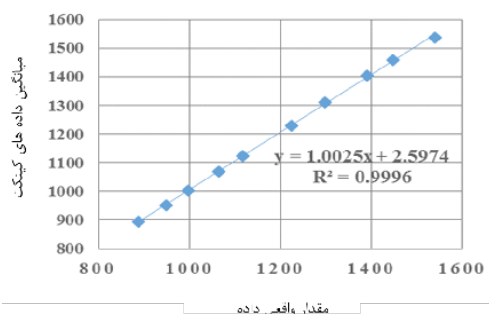
علاوه بر این، به منظور بررسی دقت حسگر کینکت در اندازه گیری ابعاد یک عارضه نظیر چاله بر روی سطح آسفالتی، لازم است تا ابعاد یک جسم دارای طول و عرض و ارتفاع نیز برداشت و تحلیل شود. به همین منظور با قراردادن اجسام مکعب مستطیل شکل بر روی سطح آسفالتی (۲۰ شیء مختلف)، ابعاد آنها با استفاده از حسگر کینکت تشخیص داده شد (الگوریتم مورد استفاده خارج از بحث این مقاله است و نتایج محاسبات برای همه اشیاء مورد بررسی در مطالعه دیگری آورده شده است). همچنین، ابعاد خود شی با کولیس اندازه گیری شد. جدول زیر نشان دهنده چند نمونه از اشیاء و ابعاد آنها است. همانطور که در جدول مشخص است، دقت محاسبه ابعاد با دوربین کینکت خطای کمتر از ۵٪ در اندازه گیری عرض و ارتفاع اجسام و همچنین خطای کمتر از ۱۰٪ در اندازه گیری طول اجسام دارد.

پس از محاسبه ابعاد جسم خارجی قرارگرفته در سطح روسازی، برداشت‌هایی از پنج ناحیه روسازی که دارای خرابی شیارشدگی با سطوح شدت مختلف بود صورت گرفت (۶۰ نیمرخ با سطوح شدت مختلف) و پس از اعمال الگوریتم‌ها و رویکرد معرفی شده در این مقاله و دوختن تصاویر عمق و ساختن ساختار سه بعدی سطح روسازی، برش عرضی بر روی تصاویر عمق اعمال شد و نیمرخ عرضی مسیر استخراج شد. جدول ۲ به صورت نمونه نتایج محاسبات عمق شیارشدگی را با استفاده از خروجی‌های حسگر کینکت و محاسبات دستی عمق شیارشدگی با استفاده از استاندارد ASTM و الگوریتم شمشه که شیوه استاندارد در محاسبه دستی عمق شیارشدگی می‌باشد را نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۱۸. مقایسه انحراف معیار داده های دوربین در ارتفاعهای مختلف

Fig. 18. Comparison of Kinect data at different height levels



شکل ۱۹. اختلاف بین مقادیر واقعی و میانگین داده های کینکت

Fig. 19. Estimated distance values versus the ground truth

جدول ۱. ابعاد اندازه‌گیری شده از شیء با دوربین

Table 1. The estimated dimension of objects

ابعاد واقعی جسم به میلی‌متر			ابعاد اندازه‌گیری شده با کینکت به میلی‌متر			درصد خطای نسبی اندازه‌گیری		
ارتفاع	عرض	طول	ارتفاع	عرض	طول	ارتفاع	عرض	طول
۴۶	۱۶۸	۳۱	۴۴	۱۷۰	۳۲	۴/۳۵	۱/۱۹	۳/۲۳
۵۰	۱۰۰	۷۱	۵۲	۹۵	۷۸	۴/۰۰	۵/۰۰	۹/۸۶
۲۷	۱۴۱	۳۵	۲۸	۱۴۲	۳۸	۳/۴۵	۰/۷۱	۸/۵۷

## جدول ۲. عمق شیارشدگی محاسبه شده با استفاده از حسگر کینکت و مقدار واقعی

Table 2. Rut depth measurement results for 5 sample profiles

شماره نیمرخ	شماره برداشت (محاسبه عمق شیارشدگی)			قدر مطلق خطا (میلی متر)
	۱ (میلی متر)	۲ (میلی متر)	میانگین (میلی متر)	
۱	۱۲/۷	۱۴/۰	۱۳/۴	۱/۴
۲	۱۳	۱۴/۴	۱۳/۷	۱/۷
۳	۱۵/۴۷	۱۵/۸۶	۱۵/۶۷	۰/۶۷
۴	۱۷/۵۷	۱۷/۸۵	۱۷/۷۱	۰/۷۱
۵	۵۸/۵۱	۵۴/۳۷	۵۶/۴۴	۰/۴۴
میانگین	-	-	-	۰/۹۸

- طراحی و ساخت یک وسیله برداشت داده متناسب با ویژگی‌های سیستم انتخابی.

- دوختن تصاویر عمق و رنگی دریافتی از حسگر کینکت و تشکیل یک تصویر سه بعدی از سطح روسازی.

## ۷- پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

با توجه به نتایج حاصل شده در این مقاله و دقت خوب حسگر کینکت در سه بعدی سازی ساختار روسازی پیشنهادهای زیر برای توسعه استفاده از این فناوری در حوزه روسازی ارائه می‌شود:

- استفاده از تعداد حسگرهای بیشتر برای پوشش سطح بزرگتری از روسازی.

- استفاده از این فناوری در داده برداری در حال حرکت با توجه به قابلیت حسگر کینکت در برداشت داده به صورت ۳۰ فریم بر ثانیه.

- نصب این فناوری بر روی وسیله نقلیه و مقایسه نتایج آن با خروجی‌های سیستم‌های خودکار برداشت داده مانند لیزرهای نقطه‌ای و یا لیزر اسکنرها.

## مراجع

- [1] F.M. Nejad, H. Zakeri, A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress, Expert Systems with Applications, 38(3) (2011) 2857-2872.
- [2] H. Gonzalez-Jorge, B. Riveiro, E. Vazquez-Fernandez, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, Metrological evaluation of microsoft kinect and asus xtion sensors, Measurement, 46(6) (2013) 1800-1806.

همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است این رویکرد در برداشت و محاسبه بعد عمق در خرابی‌های سطح روسازی دقت مناسبی دارد و می‌توان با استفاده از این رویکرد به برداشت سایر خرابی‌های شیارشدگی و ناهمواری‌های روسازی پرداخت.

## ۶- نتیجه‌گیری

برداشت داده از سطح روسازی رکن اصلی و مهم در سیستم مدیریت روسازی می‌باشد، چراکه نتایج حاصل از آن بر تصمیم‌گیری مدیران و مسئولان در انتخاب اولویت‌های مربوط به عملیات نگهداری و ترمیم روسازی و هزینه‌های به‌وجود آمده به دنبال آن تاثیرگذار است. بنابراین انتخاب یک سیستم مناسب، کارآمد، دقیق و مقرون به صرفه ضروری است. هدف این مقاله ارائه یک سیستم برداشت داده خرابی و ناهمواری در روسازی آسفالتی، به صورت دقیق و مقرون به صرفه با استفاده از حسگر کینکت نوع دوم به عنوان یک جایگزین برای سیستم‌های گران قیمت موجود بود. در این راستا ابتدا حسگر مناسب برای انجام آزمایش‌های تعیین شد و پس از آن به طراحی و ساخت یک دستگاه سازگار با ویژگی‌های حسگر انتخابی (حسگر کینکت)، پرداخته شد. پس از آن داده برداری‌هایی در آزمایشگاه و در محل در چندین مرحله صورت گرفت تا خطاهای ذاتی دوربین مشخص و کالیبراسیون دستگاه صورت گیرد. تصاویر عمق و رنگی دریافتی با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر به یکدیگر دوخته شد. و در نهایت یک ساختار سه بعدی از سطح روسازی به دست آمد و در نقاط مشخص مقاطعی برای تعیین خرابی سطح روسازی اعمال شد. از دست‌آوردهای این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعیین یک سیستم مناسب برای برداشت داده خرابی.

- [15] D. Joubert, A. Tyatyantsi, J. Mphahlehle, V. Manchidi, Pothole tagging system, (2011).
- [16] T. Kim, S.-K. Ryu, Review and analysis of pothole detection methods, *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 5(8) (2014) 603-608.
- [17] C. Koch, G.M. Jog, I. Brilakis, Automated pothole distress assessment using asphalt pavement video data, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(4) (2012) 370-378.
- [18] M.R. Jahanshahi, F. Jazizadeh, S.F. Masri, B. Becerik-Gerber, Unsupervised approach for autonomous pavement-defect detection and quantification using an inexpensive depth sensor, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(6) (2012) 743-754.
- [19] S. Xie, 3D pavement surface reconstruction and cracking recognition using Kinect-based solution, Albuquerque, NM: Univ. of New Mexico Albuquerque, (2015).
- [20] Y.L. Chen, M.R. Jahanshahi, P. Manjunatha, W. Gan, M. Abdelbarr, S.F. Masri, B. Becerik-Gerber, J.P. Caffrey, Inexpensive multimodal sensor fusion system for autonomous data acquisition of road surface conditions, *IEEE Sensors Journal*, 16(21) (2016) 7731-7743.
- [21] G.H. Golub, C. Reinsch, Singular value decomposition and least squares solutions, in: *Linear Algebra*, Springer, 1971, pp. 134-151.
- [22] K. Baker, Singular value decomposition tutorial, The Ohio State University, 24 (2005).
- [23] J.A. Suykens, SVD revisited: A new variational principle, compatible feature maps and nonlinear extensions, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 40(3) (2016) 600-609.
- [24] G.H. Golub, C.F. Van Loan, *Matrix computations*, JHU press, 2012.
- [25] G.W. Stewart, On the early history of the singular value decomposition, *SIAM review*, 35(4) (1993) 551-566.
- [26] C. Kim, S. Yun, S.-W. Jung, C.S. Won, Color and depth image correspondence for Kinect v2, in: *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*, Springer, 2015, pp. 111-116.
- [27] M.R. Jahanshahi, Vision-based studies for structural health monitoring and condition assessment, University of Southern California, 2011.
- [28] M. Brown, D.G. Lowe, Recognising Panoramas, in: *ICCV*, 2003, pp. 1218.
- [3] A. Corti, S. Giancola, G. Mainetti, R. Sala, A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera, *Robotics and Autonomous Systems*, 75 (2016) 584-594.
- [4] H. Gonzalez-Jorge, P. Rodríguez-Gonzálvez, J. Martínez-Sánchez, D. González-Aguilera, P. Arias, M. Gesto, L. Díaz-Vilariño, Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors, *Measurement*, 70 (2015) 21-26.
- [5] A.M. Pinto, P. Costa, A.P. Moreira, L.F. Rocha, G. Veiga, E. Moreira, Evaluation of depth sensors for robotic applications, in: *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, IEEE, 2015, pp. 139-143.
- [6] E. Lachat, H. Macher, M. Mittet, T. Landes, P. Grussenmeyer, First experiences with Kinect v2 sensor for close range 3D modelling, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5) (2015) 93.
- [7] T. Butkiewicz, Low-cost coastal mapping using Kinect v2 time-of-flight cameras, in: *2014 Oceans-St. John's*, IEEE, 2014, pp. 1-9.
- [8] K.H. McGhee, Automated pavement distress collection techniques, *Transportation Research Board*, 2004.
- [9] R.A. El-laithy, J. Huang, M. Yeh, Study on the use of Microsoft Kinect for robotics applications, in: *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, IEEE, 2012, pp. 1280-1288.
- [10] P. Fankhauser, M. Bloesch, D. Rodriguez, R. Kaestner, M. Hutter, R. Siegwart, Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling, in: *2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, IEEE, 2015, pp. 388-394.
- [11] S. Zennaro, Evaluation of Microsoft Kinect 360 and Microsoft Kinect One for robotics and computer vision applications, (2014).
- [12] A. Mahmoudzadeh, S.F. Yeganeh, A. Golroo, Kinect, a novel cutting edge tool in pavement data collection, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1) (2015) 425.
- [13] I. Moazzam, K. Kamal, S. Mathavan, S. Usman, M. Rahman, Metrology and visualization of potholes using the microsoft kinect sensor, in: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, IEEE, 2013, pp. 1284-1291.
- [14] K. Kamal, S. Mathavan, T. Zafar, I. Moazzam, A. Ali, S.U. Ahmad, M. Rahman, Performance assessment of Kinect as a sensor for pothole imaging and metrology, *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7) (2018) 565-576.

- [31] M. Brown, D.G. Lowe, Automatic panoramic image stitching using invariant features, *International journal of computer vision*, 74(1) (2007) 59-73.
- [32] A.E.E. M, Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge, in, *ASTM Standards*, ASTM International USA, 2005.
- [29] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. Van Gool, *Speeded-Up Robust Features (SURF) Comput. Vis. Image Underst*, in, New York, NY, USA: Elsevier Science Inc.,-3, 2008.
- [30] P.H. Torr, A. Zisserman, MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, *Computer vision and image understanding*, 78(1) (2000) 138-156.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Firoozi Yeganeh, A. R. Mahmoudzadeh, A. Golroo , M. R. Jahanshahi, Pavement Distress Data Collection and 3D Pavement Surface Reconstruction Using Kinect Sensor, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 29-44.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12977.5303

