

ارزیابی روش‌های مدل‌سازی و ساده‌سازی سطح به منظور تولید مدل سه‌بعدی ساختمان با استفاده از ابر نقاط متراکم

محمد رحیم محمدزاده^۱، حسین عارفی^{۲*}، فاطمه علی دوست^۳

^۱ کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

rmohammadzadeh35@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

hossein.arefi@ut.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

falidoost@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۶، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۶)

چکیده

با توجه به توسعه الگوریتم‌ها و پیشرفت تکنولوژی در اخذ اطلاعات مکانی دقیق و سه بعدی، تولید مدل‌های سه بعدی ساختمان‌ها به منظور ایجاد مدل‌های مجازی شهری، به روزرسانی سیستم‌های اطلاعات مکانی، و طراحی و مدیریت شهری، به یکی از مسائل مهم در زمینه فتوگرامتری و بینایی کامپیوتر تبدیل گشته است. بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها، ایجاد یک مدل و نمایش ریاضی از سطوح سه بعدی اجزای ساختمان‌ها است که با بهره‌گیری از روش‌های مختلف از قبیل روش‌های تفسیر تصویرمبنا، مدل‌سازی تصویرمبنا و مدل‌سازی فاصله مبنا و با استفاده از منابع داده‌ای متفاوت از جمله ابر نقاط سه بعدی حاصل از تصاویر چندمنظره فتوگرامتری و یا سیستم‌های لیزر اسکن هوایی (لایدار) امکان پذیر است. در این مقاله، روش‌های تولید مدل سه بعدی مبتنی بر تکنیک مثلث‌بندی سطوح از جمله روش پواسن، روش چرخش توپ و روش مثلث‌بندی حجمی با الگوریتم مکعب‌های مارش و همچنین روش‌های ساده‌سازی این مدل‌ها از قبیل روش خوشه بندی رئوس و روش کاهش رئوس با استفاده از خطای کوادراتیک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی مدل سه بعدی تولید شده توسط هر روش، از یک متریک ریاضی به نام فاصله هازدورف استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این ارزیابی، روش مثلث‌بندی حجمی با الگوریتم مکعب‌های مارش دارای دقت بالاتری در مدل‌سازی نسبت به سایر روش‌ها است، علاوه بر این روش ساده‌سازی فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادراتیک نسبت به سایر روش‌های ساده‌سازی دارای عملکرد بهتری است.

واژگان کلیدی: مثلث‌بندی سطح، ساده‌سازی مش، مدل سه‌بعدی، ابر نقاط لایدار، فاصله هازدورف

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

مدل‌سازی سه بعدی شهری، بازسازی هندسی و نمایش گرافیکی اشیای موجود در مناطق شهری مانند زمین، ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پوشش گیاهی و محیط زیست، شبکه‌ها و سیستم‌های حمل و نقل است. در مدل‌سازی سه بعدی مناطق شهری باید مدل‌های هندسی عوارض ارتفاعی موجود شامل تغییرات ارتفاعی سطح زمین، ساختمان‌ها، درختان، جاده‌ها و سایر عوارض به خوبی بازسازی شود. ساختمان‌ها به عنوان اجزای اصلی مدل‌های سه بعدی شهری، به صورت خودکار با استفاده از روش‌های گوناگون از نظر جمع‌آوری داده‌ها، نوع طبقه بندی و آنالیز انواع داده‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. با توجه به اهمیت ساختمان‌ها در مناطق شهری می‌توان گفت بازسازی آنها به صورت بهینه و با کیفیت و دقت مطلوب از درجه بالایی اهمیت در تهیه مدل سه بعدی شهر برخوردار است. تنوع ساختمان‌ها از نظر شکل، جزئیات و ابعاد، پیچیدگی بازسازی آنها را دو چندان می‌کند. علاوه بر این، براساس نوع و کیفیت داده موجود، جزئیات مختلفی از ساختمان قابل بازسازی است، با این حال بازسازی با همه جزئیات ممکن در همه کاربردها به صرفه نیست.

در سال ۲۰۰۴، سانگ و شان، روشی به منظور اختصاص بافت^۱ و محتوای رنگی به مدل سه بعدی ساختمان‌ها ارائه دادند [۱]. بدین منظور، ابتدا مدل‌های سه بعدی از سقف و دیوار ساختمان‌ها، از تصاویر هوایی استریو استخراج شدند. سپس تصاویر اورتوی حقیقی بر اساس این مدل‌ها تولید و از آنها برای ایجاد بافت استفاده شده است. در این روش، ارتباط اتوماتیک بین مدل هندسی ساختمان‌ها و تصاویر اورتو برای ایجاد بافت استفاده شده است که عملیات تخصیص بافت را ساده‌تر از روش‌های دستی می‌نماید. با این حال همچنان عدم سازگاری بین بافت دیوارها و سقف‌ها از لحاظ کنتراست، رنگ و قدرت تفکیک مکانی وجود دارد. در سال ۲۰۱۱، ژین و همکاران، روشی به منظور ساده‌سازی و بهبود مثلث‌بندی و بازسازی سطح با استفاده از روش مثلث‌بندی ژئودزیک دلونی ارائه دادند [۲]. در این روش ابتدا مثلث-بندی ژئودزیک دلونی برای یک مجموعه‌ی نمونه محاسبه

و سپس مثلث‌بندی تکمیل می‌شود. این کار تا جایی که کلیه اضلاع مدل مش^۲ دارای طول برابر شوند، تکرار می‌شود. بهترین خصوصیت این روش غیر حساس بودن مدل نهایی به مثلث‌بندی اولیه می‌باشد، اما چون روش ارائه شده، یک روش تکراری است در نتیجه زمان بر می‌باشد. در سال ۲۰۱۳، کوشک، یک ساختار ساده به منظور تولید مدل سه بعدی دقیق و دارای بافت را با استفاده از تصاویر هوایی با پوشش بالا ارائه داد [۳]. در این روش، موقعیت مرکز تصویربرداری و زوایای دورانی تصویر که با استفاده از سنجنده‌های ناوبری اندازه‌گیری شده‌اند، مجدداً محاسبه شده تا خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از سرشکنی خطا به روش دسته اشعه^۳ کاهش یابد. در مرحله بعد، به ازای هر جفت تصویر استریو، یک مدل ارتفاعی متراکم تولید و مدل‌ها با یکدیگر تلفیق می‌شوند. سپس ابر نقطه یکپارچه، مثلث‌بندی شده و مدل مش تولید می‌شود. در نهایت، با نگاشت تصاویر ورودی بر روی مش تولید شده، مدل بافت‌دار تولید می‌شود. دقت این روش با مقایسه با داده‌های مرجع حاصل از لیزر اسکنر هوایی بررسی شده و نتایج نشان می‌دهد، روش ارائه شده دارای خطای میانگین حدود یک متر و مجذور مربعات خطا حدود دو متر است. مک کلون و همکاران، در سال ۲۰۱۴، روشی به منظور بازسازی سقف ساختمان‌ها به کمک عوارض لبه‌ی استخراج شده از تصاویر چند منظره^۴ و با استفاده از روش‌های فتوگرامتری هوایی پیشنهاد دادند. در این روش، رئوس سقف ساختمان‌ها با استفاده از الگوریتم لبه‌گنی از تصاویر اورتو استخراج شده است. سپس با استفاده از مدل رقومی سطح و پروفیل دو بعدی حاصل از ابر نقاط و اندازه‌گیری اختلاف ارتفاعات، صفحات سقف بازسازی می‌شوند. نتایج آنالیزهای آماری نشان می‌دهد که حدود ۷۷ درصد از لبه‌ها با استفاده از اپراتور گنی به صورت موفقیت آمیزی استخراج شده‌اند. علاوه بر این، با استفاده از پروفیل‌های دو بعدی امکان بازسازی اجزای کوچک ساختمان‌ها نیز وجود دارد، با این حال، در این روش، نویز بالایی در لبه‌های سقف مشاهده شده است [۴]. الگوریتم‌های مدل‌سازی استریوی چند منظره و ساده‌سازی با بکارگیری تصاویر مایل توسط لیو و گیو در

^۲ Mesh Model
^۳ Bundle Adjustment
^۴ Multiview images

^۱ Texture

مدل‌های سه بعدی با سطح جزئیات بالا هستند. با این حال، اگر چه افزایش جزئیات، باعث افزایش کیفیت مدل سه بعدی می‌شود، ولی افزایش کیفیت بصری، باعث کاهش عملکرد پردازش‌ها به دلیل افزایش حجم محاسبات می‌شود. پارامترهای مختلفی از جمله نوع کاربرد، دقت موردنظر، سرعت و حجم محاسبات در انتخاب الگوریتم مناسب در تولید مدل‌های سه بعدی بهینه تاثیرگذار هستند چرا که تعدادی از این الگوریتم‌ها سبب تغییر شکل زیادی در مدل سه بعدی می‌شوند [۲۲]. بنابراین، نیاز است تعادلی بین کیفیت بصری و زمان پردازش مدل مورد نظر وجود داشته باشد که نتیجه‌ی آن، انتخاب یک مدل بهینه برای مدل سه بعدی و سپس ساده‌سازی آن برای رسیدن به این تعادل است. با توجه به اینکه تاکنون روش‌های مثلث‌بندی و تولید مش و همچنین روش‌های ساده‌سازی سطوح تولید شده، در حوزه فتوگرامتری و بر روی عوارضی مانند ساختمان‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است، در این تحقیق، روش‌های تولید مدل‌های سه بعدی بر اساس الگوریتم‌های مثلث‌بندی و روش‌های ساده‌سازی آنها و همچنین تاثیر الگوریتم‌های ساده‌سازی بر روی مثلث‌های تولید شده، برای یک عارضه ساختمانی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است تا الگوریتم بهینه برای مثلث‌بندی و ساده‌سازی تعیین شود. در بخش دوم و سوم، انواع روش‌های مثلث‌بندی سطوح و تولید مدل مش و همچنین روش‌های ساده‌سازی مدل سه بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش چهارم، نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌ها بر روی ابر نقطه متراکم تحلیل می‌شود و در نهایت، نتایج کلی از ارزیابی‌ها در بخش آخر ارائه می‌گردد.

۲- مدل سازی سه بعدی سطح

مدل‌سازی سه بعدی شامل دو مرحله پردازش سطح به ابر نقاط متراکم و تولید مدل پیوسته از جسم و سپس ساده‌سازی آن برای رسیدن به یک مدل بهینه است. برای نمایش سطح سه بعدی و توصیف نمایش بهینه سطح و برای کاربرد مدل‌سازی مانند بازسازی ساختمان از ابرنقطه حاصل شده از تصاویر چندمنظره فتوگرامتری و یا ابر نقطه لایدار استفاده می‌شود. در حالیکه برای کاربردهای دیگر از قبیل تولید مجسمه از اعضای بدن انسان یا عوارض پیچیده‌تر نیاز به یک ابرنقطه متراکم‌تر می‌باشد. یکی از

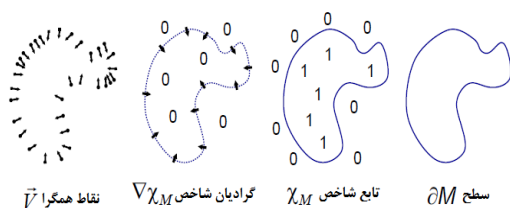
سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [۵]. در این روش، بازسازی ساختمان‌ها بر اساس تناظریابی چند منظره و استفاده از الگوریتم قطعات خود سازگار و ساده‌سازی بر اساس خوشه‌بندی و فروپاشی لبه انجام شده است. در سال ۲۰۱۵، گوها، یک الگوریتم پلیگونی برای ساده‌سازی مش بر اساس خصوصیات هندسی مش ارائه داد. در این الگوریتم، رئوس به دو دسته‌ی هذلولی و غیر هذلولی بر اساس هندسه محلی آنها طبقه‌بندی می‌شوند. سپس هزینه حجمی برای رئوس غیر هذلولی محاسبه می‌شود و در نهایت رئوس با کمترین هزینه حذف می‌شود. این الگوریتم، یک الگوریتم ساده و جدید است، اما روند تکراری آن باعث زمان بر بودن اجرای آن می‌شود. همچنین عملکرد این روش، برای حجم بالای داده‌ها نیاز به بهبود دارد [۶]. در سال ۲۰۱۵، پاگس و همکاران، روشی به منظور تولید مدل سه بعدی و رنگی با استفاده از تصاویر چند منظره ارائه دادند. بدین منظور، پارامترهای کالیبراسیون دوربین به صورت اتوماتیک استخراج شدند. در این روش مرزهای رنگی که معمولاً به دلیل عدم انطباق کامل تصاویر بر روی یکدیگر و شرایط نوری متفاوت در تصاویر ایجاد می‌شوند، بهبود و یا حذف شدند. همچنین اثر مات شدگی ناشی از تکنیک‌های ترکیب رنگی، به حداقل مقدار خود رسانده شده است. با این حال، الگوریتم‌های مورد استفاده برای نمایش بصری نمی‌توانند به خوبی حالت فرورفتگی و یا اعوجاجات موجود در بافت را بازسازی کنند، برای حل این مشکل، باید وضوح چندضلعی‌های مربوط به مش را بالاتر برد که این کار، همراه با زمانبر بودن مرحله تولید بافت است [۷]. در سال ۲۰۱۶، بودیس‌سومورو و همکاران روشی را به منظور ساده‌سازی مش برای مدل‌سازی ساختمان‌ها در مناطق شهری ارائه دادند که در آن، یک مدل مش دو بعدی با استفاده از بهینه‌سازی تابع انرژی به فضای سه بعدی انتقال می‌یابد به نحوی که رئوس و اضلاع مثلث‌های مش به طور بهینه مدل‌سازی شوند [۸]. اغلب مطالعات انجام یافته در خصوص مقایسه‌ی تکنیک‌های مثلث‌بندی به منظور تولید مش [۹]، [۱۰]- [۱۴] و همچنین مقایسه عملکرد روش‌های ساده‌سازی مش [۱۵ و ۱۶]، [۱۷-۱۹]، [۲۰ و ۲۱] در حوزه بینایی کامپیوتر و بر روی عوارضی مانند مجسمه و قطعات صنعتی می‌باشد. عمده این تحقیقات، در جهت تولید

بر روی و یا در نزدیکی سطح ∂M از مدل نامعلوم M قرار دارند. سپس یک تابع شاخص که معرف مدل M است، به نحوی تخمین زده می‌شود که یک سطح ایزوی^۱ مناسب استخراج شود که همان سطح مثلث‌بندی شده‌ی مورد نظر خواهد بود (شکل (۱)).



شکل ۱- تصویر چپ: ابر نقاط، تصویر وسط: نمایشی از تابع شاخص منطبق بر یک صفحه در فضای سه‌بعدی، تصویر چپ: سطح بازسازی شده به روش پواسن [۲۲]

در این روش، یک تابع به نام تابع شاخص سه بعدی، χ محاسبه می‌شود به طوری که مقدار این تابع برای نقاط داخل مدل، یک و برای نقاط خارج از مدل، صفر است؛ و سپس سطح بازسازی شده با استخراج یک سطح ایزوی مناسب تولید می‌شود. این روش بر این است که یک ارتباط انتگرالی بین نقاط همگرا که به عنوان نقاط نمونه از سطح یک مدل در نظر گرفته شده‌اند و تابع شاخص آن مدل وجود دارد. از طرفی، گرادیان تابع شاخص، یک میدان برداری است که تقریباً در همه جا صفر است به جز در نقاطی که نزدیک به سطح هستند و در این نقاط، مقدار گرادیان برابر با نرمال بر سطح است (شکل (۲)).



شکل ۲- نمایش بازسازی به روش پواسن در دو بعد [۳]

بنابراین مساله بازسازی سطح تبدیل به مساله پواسن بر مبنای گرادیان تابع شاخص می‌شود به عبارتی، طبق رابطه (۱) به دنبال یک تابع x هستیم که لاپلاسیان (مشتق گرادیان) آن برابر با مشتق میدان برداری V شود.

روش‌های تولید مدل پیوسته از ابر نقطه متراکم، ایجاد شبکه‌ای منسجم و ساختارمند از ساده‌ترین اشکال هندسی یعنی مثلث است. تولید شبکه مثلثی مش یا تین (TIN^۱) تقریباً در هسته کلیه سیستم‌های بازسازی سطوح قرار دارد. در واقع، مفهومی که یک مجموعه از نقاط را به یک مدل چند ضلعی سازگار تبدیل می‌کند، به صورت مثلث تعریف می‌شود [۲۳]. تبدیل ابرنقطه سه‌بعدی به سطح پلیگونی شامل چهار مرحله پیش پردازش، تعیین توپولوژی از سطح عارضه، تولید سطح پلیگونی و پس پردازش می‌باشد [۳]. به منظور تولید مدل مش، ابتدا تقسیم بندی بر روی داده‌های ورودی به ساده‌ترین عناصر آن (معمولاً به صورت مثلث یا چهارضلعی و در دو بعد و یا در سه بعد) برای تولید رئوس، لبه‌ها و سطوح انجام می‌شود. در هر مثلث‌بندی، به منظور یافتن مثلث بهینه، از اندازه‌گیری قیودی مانند زاویه، طول لبه، ارتفاع و یا مساحتی از المان‌ها استفاده می‌شود. رئوس مثلث‌ها می‌توانند به طور دقیق نقاط ورودی باشند یا ممکن است شامل نقاط اضافی باشد که در این صورت به آن نقاط نقاط استینر^۲ گفته می‌شود که برای ایجاد یک شبکه بهینه‌تر به کار می‌روند [۹]. مثلث‌بندی طبق هندسه داده ورودی به طور کلی به صورت دو بعدی، دو و نیم بعدی و یا سه بعدی انجام می‌شود. عمده‌ترین روش‌های سه بعدی در مثلث‌بندی و تولید مدل مش عبارتند از:

- روش مثلث‌بندی پواسن^۳
- روش مثلث‌بندی چرخش توپ^۴
- روش مثلث‌بندی حجمی^۵ به همراه مکعب‌های مارش‌کننده (MC^۶)

۱-۲- روش مثلث‌بندی پواسن

روش مثلث‌بندی پواسن بر اساس معادله پواسن تعریف می‌شود و به منظور بازسازی سطح با استفاده از نقاط همگرا^۷ به کار می‌رود. در این روش، داده ورودی، یک ابر نقطه S است که شامل مجموعه‌ای از نقاط نمونه $s \in S$ و یک بردار نرمال است و فرض می‌شود این نقاط نمونه

^۱ Triangulated Irregular Network

^۲ Steiner

^۳ Poisson

^۴ Ball-pivoting

^۵ Volumetric mesh

^۶ Marching Cubes

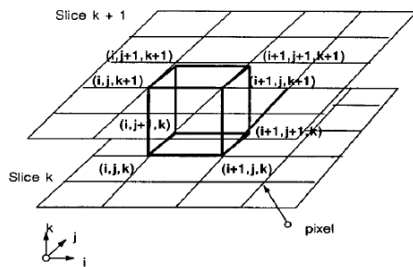
^۷ Oriented points

^۸ Isosurface

نقاط نمونه با توپ تماس نخواهند داشت و سطح ایجاد نمی‌شود. روش چرخش توپ یک روش نسبتاً ساده و بر مبنای مفاهیم آلفاشیپ‌ها^۲ [۲۶] است و کلیه مزایای روش آلفاشیپ را دارا می‌باشد، علاوه بر این در برابر نویز موجود در داده‌های سه بعدی کاملاً پایدار است [۲۵].

۲-۳- روش مثلث‌بندی حجمی و MC

الگوریتم MC از روشی موسوم به روش "تقسیم و تسخیر"^۳ برای بازسازی یک سطح استفاده می‌کند. برای این منظور، طبق شکل (۴) مکعب‌های منطقی در بین دو سطح مجاور به صورتی تعریف می‌شوند که هر مکعب دارای هشت پیکسل (چهار پیکسل در هر یک از سطوح) باشند.



شکل ۴- مکعب مارش کننده [۲۷]

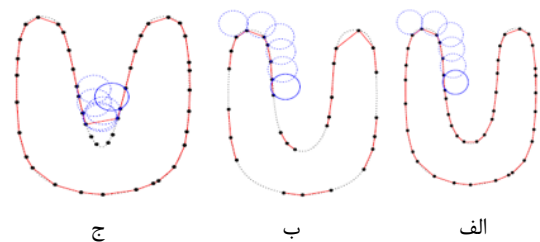
در این روش، الگوریتم MC، نحوه تقاطع سطح با یک مکعب را محاسبه می‌کند و سپس الگوریتم به سمت مکعب بعدی حرکت می‌کند (و یا به اصطلاح مارش می‌کند). به منظور محاسبه نحوه تقاطع یک سطح در داخل یک مکعب، در صورتی که مقدار داده در یک راس مکعب، با مقدار سطح برخورد کننده به آن برابر و یا بزرگتر باشد، به آن راس، امتیاز یک و در غیر این صورت، امتیاز صفر تعلق می‌گیرد. رئوسی که دارای امتیاز یک هستند در داخل و یا بر روی سطح مورد نظر، و رئوسی که دارای امتیاز صفر هستند، در خارج سطح مورد نظر قرار دارند. در نتیجه، سطح با اضلاع مکعب‌هایی تقاطع دارد که یک راس آن مکعب خارج از سطح (دارای امتیاز صفر) و سایر رئوس در داخل سطح (دارای امتیاز یک) باشند. با این فرض، توپولوژی سطح نسبت به مکعب تعیین و محل تقاطعات محاسبه می‌شود. از آنجایی که هشت راس به ازای هر مکعب و دو حالت داخل و خارج دارد، بنابراین به ۲۵۶ حالت می‌توان مثلث‌بندی سطح را انجام داد که با

$$\Delta x = \nabla \cdot \nabla x = \nabla \cdot \vec{V} \quad (1)$$

الگوریتم پواسن، تمام نقاط را یکباره در نظر می‌گیرد، بدون اینکه به تقسیم‌بندی و یا ترتیب مکانی آنها اهمیت دهد در نتیجه در برابر نویز پایدار است. بر خلاف توابع پایه شعاعی (RBF)^۱، توابع پواسن، توابعی هستند که به صورت محلی و سلسله مراتبی اعمال می‌شوند و مساله را تبدیل به یک مساله خطی می‌کنند. در این روش زمان و حجم محاسبات، متناسب با ابعاد داده ورودی است [۲۴].

۲-۲- روش مثلث‌بندی چرخش توپ

این روش بر این اساس است که سه نقطه، یک مثلث را تشکیل می‌دهند، در صورتی که یک توپ با شعاع مشخص (اندازه شعاع توسط کاربر تعیین می‌شود) تنها این سه نقطه را در برگیرد و شامل نقطه چهارمی نباشد. در این روش، برای شروع، نیاز به یک مثلث اولیه است. توپ روی یک لبه مثلث و در حالیکه شامل دو راس متصل به این لبه است، شروع به چرخیدن می‌کند تا نقطه دیگری را در برگیرد که نقطه سوم برای تشکیل مثلث است، در نتیجه یک مثلث ایجاد می‌شود. این روند تا در برگرفتن کلیه نقاط، ادامه می‌یابد. در شکل (۳) روند الگوریتم چرخش توپ در دو بعد نمایش داده شده است.



شکل ۳- الف: الگوریتم چرخش توپ در دو بعد، ب: ایجاد نواحی خالی وقتی تراکم نقاط کم است، ج: عدم بازسازی هنگامی که انحنا سطح از انحنا دایره بیشتر باشد [۲۵]

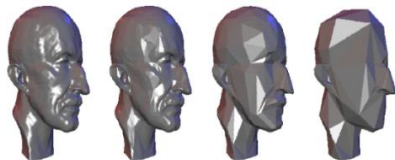
طبق شکل (۳)، تصویر الف، یک دایره با شعاع ρ روی نقاط نمونه شروع به گردش می‌کند و با لبه‌ی آنها در تماس است. هنگامی که تراکم نقاط کم باشد، بعضی از لبه‌ها ساخته نمی‌شود و در نتیجه در سطح بازسازی شده، نواحی خالی ایجاد می‌شود. از طرفی، هنگامی که انحنا قسمتی از سطح مورد نظر بزرگتر از $1/\rho$ باشد، تعدادی از

^۲ Alpha-shapes

^۳ Divide-and-conquer

^۱ Radial Basis Function

دلیل انجام می‌شود که عبارتند از: حذف هندسه اضافی، کاهش ابعاد مدل و بهبود سرعت اجرای مدل‌سازی [۱۶]. در شکل (۶)، ارتباط بین میزان ساده‌سازی مدل با حفظ کیفیت بصری آن نشان داده شده است.



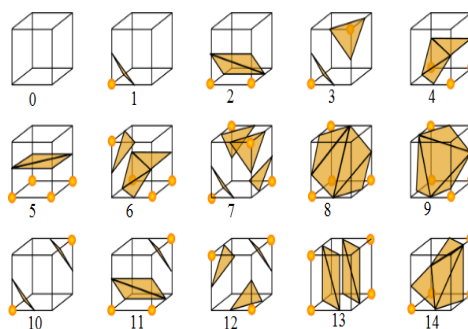
شکل ۶- روند ساده‌سازی مش در سطوح مختلفی از جزئیات [۲۸]

روش‌های ساده‌سازی بر اساس معیارهای مختلفی از جمله نوع مکانیزم ساده‌سازی، پیچیدگی و توپولوژی سطح، میزان خطای سطح ساده شده، تکراری بودن الگوریتم و غیره می‌تواند به دو دسته کلی روش‌های محلی و سراسری تقسیم شود [۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۹، ۳۰]. در روش‌های محلی، مدل سه بعدی در تکرارهای متعدد به وسیله اپراتورهای محلی ساده می‌شود، در واقع، در این روش مدل سه بعدی به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌شود و روی هر قسمت ساده‌سازی انجام می‌شود. در روش‌های کلی، ورودی الگوریتم، یک مدل مش کامل و یکپارچه است. در واقع در این روش‌ها، ساده‌سازی به صورت یکجا روی مدل سه بعدی صورت می‌گیرد. در این تحقیق، دو روش محلی به نام خوشه‌بندی رئوس و فروپاشی لبه با استفاده از خطای کواراتیک به منظور ساده‌سازی مدل سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۱- ساده‌سازی به روش خوشه‌بندی رئوس

این روش براساس پارامتر "نزدیکی" و مجاورت هندسی رئوس در یک فضا است و طبق آن، رئوسی که براساس یک حدآستانه‌ی مشخصی به هم نزدیک هستند، به عنوان یک راس در نظر گرفته و رئوس اضافه حذف می‌شوند (شکل (۷)). نزدیکی رئوس به یکدیگر، در واقع بیان‌کننده‌ی نزدیکی دو مثلث به هم است. برای مثال، در صورتی که رئوس دو مثلث به هم خیلی نزدیک باشند، در واقع آن دو مثلث می‌توانند نماینده یک مثلث باشند. بر اساس تعریف پارامتر "نزدیکی" می‌توان ابعاد مختلفی برای خوشه‌ها در نظر گرفت که در واقع مشخص‌کننده‌ی میزان ساده‌سازی است. هر چه ابعاد خوشه‌ها کوچکتر باشد، ساده‌سازی بیشتری انجام می‌شود. مراحل این روش عبارتند از [۳۱]:

اعمال یک سری پیش‌فرض‌ها، این تعداد به ۱۴ حالت کاهش می‌یابد. در ساده‌ترین حالت که حالت شماره صفر است، در صورتی که مقدار کل رئوس از حدآستانه مورد نظر بیشتر باشند، هیچ مثلثی تشکیل نمی‌شود. در حالت شماره یک، در صورتی که سطح در بالا و پایین یک راس از هشت راس قرار گیرد، یک مثلث از طریق تقاطع سطح با سه ضلع مجاور آن راس تشکیل می‌شود و الی آخر. سپس به هر یک از ۱۴ حالت و وضعیت رئوس در هر حالت، طبق شکل (۵) یک شماره تعلق می‌گیرد. محل تقاطع سطح با اضلاع مکعب از طریق درونیابی محاسبه و سپس به ازای هر راس مثلث ایجاد شده، بردار نرمال محاسبه می‌شود. با اعمال مجموعه‌ای از قیود هندسی بر روی زاویه و ابعاد مثلث‌ها کیفیت آنها تضمین می‌شود. خروجی نهایی، رئوس مثلث‌ها و بردار نرمال آنها خواهد بود. از مزایای الگوریتم MC افزایش کیفیت توپولوژی سطح تولید شده و پایین بودن حجم محاسبات در مثلث‌بندی است [۲۷].

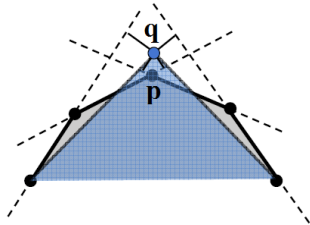


شکل ۵- مثلث‌بندی با الگوریتم MC [۲۷]

۳-۲ ساده‌سازی سطح

یکی از روش‌های تولید مدل سه بعدی بهینه، ساده‌سازی آنها بر اساس کاهش تعداد رئوس یا وجوه اضافی و غیر ضروری است. الگوریتم‌های ساده‌سازی سطح در بسیاری از کاربردها مانند بینایی کامپیوتر (داده‌های حجیم از سیستم اسکنر)، تجسم علمی (استخراج سطوح از داده حجمی)، سنجش از دور (استخراج داده‌های زمینی از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای)، طراحی هندسی و گرافیک کامپیوتری (نمایش مدل و سطوح مختلف از جزئیات) و تجزیه و تحلیل المان‌های محدود (تجزیه و تحلیل ساختار پل‌ها برای شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف هواپیما و برای شبیه‌سازی میدان‌های الکترومغناطیسی) کاربرد دارند [۱۵]. در تمامی این کاربردها، ساده‌سازی عمدتاً به سه

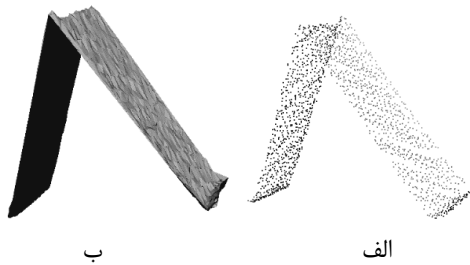
حداقل سازی مجموع فواصل راس مورد نظر تا کلیه وجوه مثلث های موجود در همسایگی آن به دست می آید. عملکرد این روش، بهتر از روش خوشه بندی رئوس است با این حال سرعت آن کمتر است. در این روش، توپولوژی حفظ می شود. همچنین برای ساده سازی، می توان وزن نیز در نظر گرفت [۳۲].



شکل ۸- خطای کوادریک

۴- پیاده سازی و ارزیابی روش ها

به منظور پیاده سازی و ارزیابی روش های مثلث بندی سطح و همچنین روش های ساده سازی آنها، از داده های ابر نقاط لایدار با تراکم ۶۵ نقطه در متر مربع که از ارتفاع پرواز ۳۰۰ متری از منطقه شهری در کشور بلژیک اخذ شده است، استفاده می شود. علاوه بر این، برای ارزیابی مدل های تولید شده، یک مدل سه بعدی مرجع با بکارگیری الگوریتم مثلث بندی دلونی از ابر نقاط اولیه و خام تولید شده است (شکل ۹).



شکل ۹- الف: ابر نقطه اولیه، ب: مدل مرجع حاصل از مثلث بندی دلونی

به منظور ارزیابی کیفی و کمی روش های تولید سطح و ساده سازی، ابتدا پارامترهای بهینه مربوط به هر روش به صورت سعی و خطا تعیین می شوند. در جدول (۱) پارامترهای بهینه برای سه روش پواسن، چرخش توپ و الگوریتم مثلث بندی حجمی و MC و همچنین دو روش خوشه بندی رئوس و فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادراتیک ارائه شده است. سپس سه روش تولید مدل سه بعدی از ابر نقاط خام و دو روش ساده سازی بر روی مدل مرجع اعمال می شوند. علاوه بر این، الگوریتم های ساده سازی به منظور ساده سازی سطوح سه بعدی نیز

ا. محاسبه یک وزن برای هر راس بر اساس اهمیت بصری آن راس،

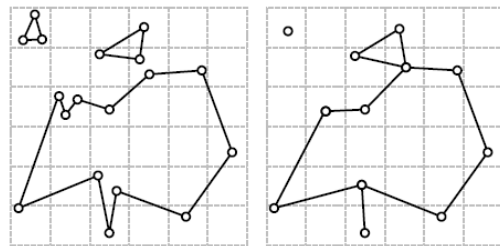
ب. مثلث بندی رئوس،

ت. خوشه بندی رئوس بر اساس معیار مجاورت هندسی،

ث. انتخاب یک راس در هر خوشه به عنوان نماینده آن خوشه و حذف سایر رئوس،

ج. بهبود مثلث بندی و حذف مثلث های تکراری،

ح. محاسبه مجدد نرمال بر سطح وجوه جدید.



شکل ۷- انتخاب نماینده برای هر خوشه و حذف سایر رئوس [۳۱]

این روش، یک روش سریع و در عین حال کم دقت است و به علت ذات الگوریتم های خوشه بندی، امکان ایجاد ناسازگاری های توپولوژیکی نیز وجود دارد [۳۲].

۳-۲- ساده سازی به روش فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادریک

این روش براساس حل مساله بهینه سازی و الگوریتم الحاق (GIA^۱) می باشد. در این روش، ابتدا تغییرات محلی مدل مش محاسبه و براساس این تغییرات، خطای نقاط محاسبه می شود و سپس نقاط با بالاترین خطا به سرعت و به صورت گروهی انتخاب و حذف می گردند [۱۵]. طبق شکل (۸)، خطای کوادریک، Qq ، فاصله هر راس p تا صفحه مثلث موجود در همسایگی این راس، q است که طبق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$p = (x, y, z, 1)^T, \quad q = (a, b, c, d)^T$$

$$dist(q, p)^2 = (q^T, p)^2 = p^T (qq^T) = p^T Qq p \quad (2)$$

$$Qq = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix}$$

در رابطه فوق، (x, y, z) مختصات نقطه p و a, b, c, d ضرایب معادله صفحه q هستند. مثلث بندی بهینه با

^۱ Greedy Insertion Algorithm

دچار اعوجاج می‌شود، با این حال مدل تولید شده در این روش، نرم‌تر از سایر مدل‌ها است. در روش چرخش توپ، ایجاد نواحی خالی توسط الگوریتم از کیفیت مدل تولید شده کاسته است. در روش مثلث‌بندی حجمی و MC، یک سطح یکپارچه و کامل تشکیل شده است با این حال میزان اعوجاجات محلی در این مدل، بیشتر از سایر مدل‌ها است. در روش پواسن پارامتر موثر، پارامتر عمق می‌باشد که به منظور افزایش کیفیت سطح، مقدار بهینه برای پارامتر عمق باید در بالاترین مقدار خود قرار داده شود. کیفیت نتایج در روش چرخش توپ بستگی به شعاع چرخش و شعاع خوشه‌بندی دارد هر چه این مقادیر کمتر باشد، کیفیت نتایج بهتر است.

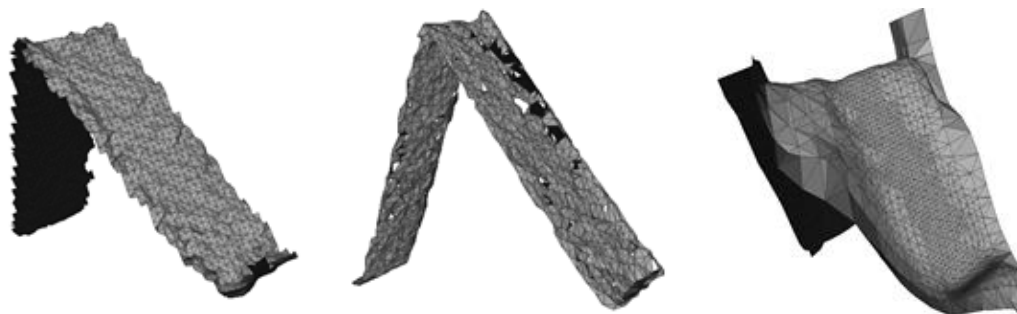
استفاده می‌شوند. در نهایت، کلیه مدل‌ها با یکدیگر و با مدل مرجع از نظر کیفی و کمی مقایسه می‌شوند.

۴-۱- ارزیابی کیفی

از جمله معیارهای کیفی برای تعیین کیفیت سطح مدل-سازی شده، می‌توان به پارامترهایی نظیر زبری و برجستگی سطح، اعوجاجات ساختاری و کامل بودن سطح اشاره نمود. در شکل (۱۰)، سه سطح مدل‌سازی شده توسط سه روش پواسن، چرخش توپ و الگوریتم مثلث‌بندی حجمی و MC ارائه شده است. در روش پواسن، به دلیل ایجاد نقاط اضافه در مرز جسم توسط الگوریتم، ساختار کلی جسم تغییر کرده و

جدول ۱- پارامترهای بهینه الگوریتم‌های مدل‌سازی و ساده‌سازی سطح

انواع روش‌ها	پارامتر موثر	توصیف پارامتر	مقدار بهینه پارامتر
پواسن	عمق	عمق درخت octree مورد استفاده در بازسازی که یک عدد صحیح است	۷
	جبران سطح	نسبت مساحت نواحی گپ به کل مساحت سطح است. این پارامتر، به منظور پر کردن نواحی گپ استفاده می‌شود.	۰/۱
	شعاع چرخش توپ	شعاع توپ و بر حسب متر	۰/۵
چرخش توپ	شعاع خوشه‌بندی	شعاع خوشه‌ها بر حسب متر که حاوی نقاط نمونه در هر تکرار الگوریتم است.	۱
	زاویه چرخش توپ	زاویه چرخش توپ و بر حسب درجه	۱۵۰
	ابعاد مکعب	ابعاد مکعب مارش کننده و بر حسب متر	۰/۰۸۶
مثلث‌بندی حجمی و مکعب‌های مارش	پارامتر لاپلاسن	درصد نرم شدگی سطح برای حذف نویز	۰/۱
	انبساط حجم مکعب	درصد بزرگ شدن حجم مکعب برای پر کردن نواحی گپ	۰/۱
روش‌های ساده‌سازی سطح	خوشه‌بندی رئوس	ابعاد خوشه‌ها و بر حسب متر	۰/۱۱
	فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادریک	میزان حذف نقاط در اثر ساده‌سازی و بر حسب درصد	۰/۰۱



شکل ۱۰- روش‌های مثلث‌بندی و تولید مش: الف: روش پواسن، ب: روش چرخش توپ، ج: روش مثلث‌بندی حجمی و MC

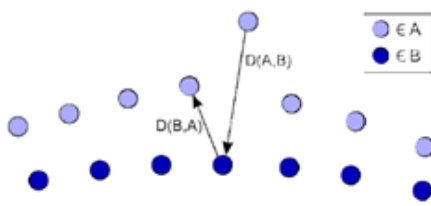
کمتر باشد، نتایج بهتری حاصل می‌شود. همچنین برای جلوگیری از نویز و نواحی خالی در روش مثلث‌بندی حجمی

در روش مثلث‌بندی حجمی و MC، کیفیت و دقت مثلث‌بندی به سائز مکعب بستگی دارد که هرچه این مقدار

$$D(A, B) = \max_{a \in A} (dist(a, B)) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، A و B ، دو مدل مش با اتصالات مشترک و a و b رئوس مشترک در دو مدل A و B ، و $||...||$ فاصله اقلیدسی بین دو نقطه است. فاصله $D(A, B)$ در رابطه (۴) یک فاصله نامتقارن است بنابراین فاصله دوطرفه هازدورف با گرفتن ماکزیمم از فواصل سطح A تا B یعنی $D(A, B)$ و فواصل سطح B تا A یعنی $D(B, A)$ طبق رابطه (۵) محاسبه می شود (شکل (۱۲)).

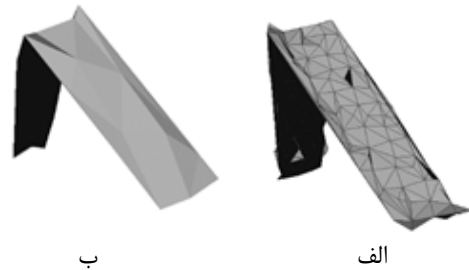
$$H(A, B) = \max(D(A, B), D(B, A)) \quad (۵)$$



شکل ۱۲- نامتقارن بودن فاصله هازدورف [۱]

در این مقاله، به جای اعمال اپراتور ماکزیمم گیری در رابطه (۵)، از میانگین و کمترین مربعات برای محاسبه ی فاصله هازدورف استفاده می شود و مقدار آن، به عنوان معیاری برای خطای مثلث بندی و یا ساده سازی برای ارزیابی کیفیت سطوح مدل سازی شده در مقایسه با مدل مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. طبق جدول (۱)، پارامتر موثر در الگوریتم پواسن، پارامتر عمق است. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود، با افزایش پارامتر عمق، خطای مدل سازی کاهش می یابد، با این حال تعداد المان های مثلثی سطح افزایش می یابد. از طرفی، با افزایش پارامتر عمق از ۷ الی ۱۰، تعداد المان های سطح افزایش یافته (شکل (۱۳)، الف) اما دقت مدل سازی تغییر چندانی نداشته است (شکل (۱۳)، ب)، لذا مقدار بهینه پارامتر عمق در الگوریتم پواسن عدد ۷ یا ۸ انتخاب می شود. شکل (۱۴)، الف، تاثیر پارامتر شعاع توپ را در روش چرخش توپ نشان می دهد. با افزایش شعاع توپ از ۰/۱ به ۰/۳ متر تعداد المان های سطح به شدت افزایش می یابد، سپس تا مقدار شعاع ۰/۳۹ متر، تعداد المان ها تقریباً ثابت خواهد بود و بعد از آن، با افزایش شعاع توپ، تعداد المان ها مجدداً کاهش می یابد چرا که با زیاد شدن بیش از حد شعاع توپ، در اثر چرخش توپ، تعداد زیادی از نقاط با توپ تماس نداشته و تعداد سطوح کاهش پیدا می کند

و MC، پارامترهای لاپلاسی و انبساط سطح در کمترین مقدار خود تنظیم می شوند. طبق شکل (۱۱)، روش ساده سازی با الگوریتم فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادریک، تعداد نقاط را به شدت کاهش می دهد و علاوه بر این، شکل کلی جسم را حفظ می کند در حالی که در روش خوشه بندی رئوس، میزان جزئیات بیشتری پس از ساده سازی باقی می ماند. در روش خوشه بندی رئوس، ابعاد خوشه ها یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار است که با تغییر آن، میزان ساده شدن مدل تغییر می کند. همچنین، در روش کاهش رئوس با استفاده از خطای کوادریک، هر چه پارامتر ساده سازی که بین صفر و یک است، به صفر نزدیکتر باشد، ساده سازی با شدت بیشتری انجام می شود.



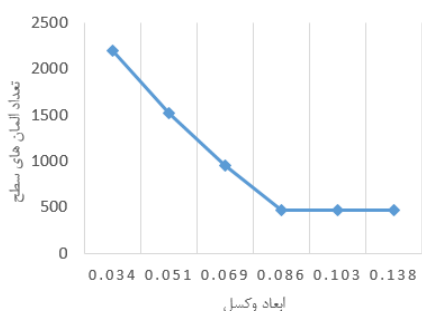
شکل ۱۱- روش های ساده سازی مش: الف: خوشه بندی رئوس، ب: فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادریک

۴-۲- ارزیابی کمی

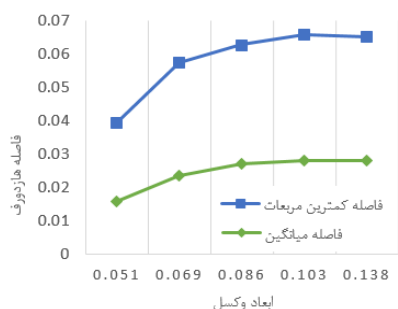
به منظور ارزیابی بین مدل های تولید شده و همچنین مدل های ساده شده در مقایسه با یک مدل مرجع، از متریک فاصله هازدورف (Hausdorff) استفاده می شود که میزان شباهت دو مدل مش به همدیگر را نشان می دهد [۳۳]. اساس فاصله هازدورف بر اساس فاصله هندسی است و به صورت مستقل از داده های اولیه، کیفیت مدل سه بعدی را ارزیابی می کند. در این روش به منظور محاسبه فاصله میانگین بین دو مدل مش، انتگرال سطحی تابع فاصله بین دو مدل مش بر مساحت یکی از سطوح تقسیم می شود. فاصله هازدورف، شباهت دو مجموعه نقطه را به هم از طریق محاسبه فواصل یک طرفه ارزیابی می کند. در روش یک طرفه، یکی از مجموعه نقاط مدل ثابت در نظر گرفته می شود و فاصله کلیه نقاط مجموعه دیگر از آن محاسبه می شود. فاصله یکطرفه $D(A, B)$ از سطح A تا سطح B با توجه به روابط (۳) و (۴) محاسبه می شود:

$$dist(a, B) = \min_{b \in B} (||a - b||) \quad (۳)$$

شکل (۱۵)، رابطه بین ابعاد و وکسل با تعداد المان‌های سطح و فاصله هازدورف را در روش مثلث‌بندی حجمی و MC نشان می‌دهد. با افزایش ابعاد سلول مکعبی، تعداد المان‌های سطح کاهش می‌یابد (شکل (۱۵۵)، الف) با این حال خطای مثلث‌بندی افزایش می‌یابد (شکل (۱۵)، ب). هنگامی که مقدار ابعاد سلول مکعبی برابر 0.086 است، تعداد المان‌های سطح 468 عدد و خطا 0.036 متر است و بعد از آن، با افزایش مقدار ابعاد سلول مکعبی، تعداد المان‌ها ثابت باقی می‌ماند این در حالی است که خطا همچنان افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار بهینه برای ابعاد سلول مکعبی، عدد 0.086 انتخاب می‌شود.



الف

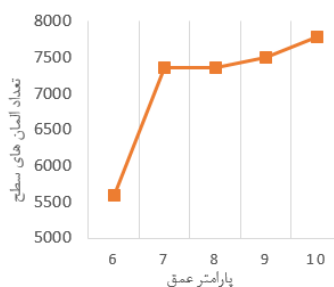


ب

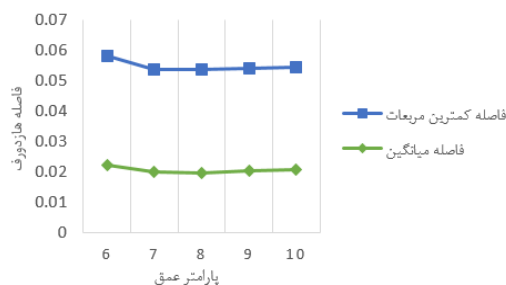
شکل ۱۵- روش مثلث‌بندی حجمی، الف: مقایسه ابعاد سلول مکعبی با تعداد المان‌های سطح، ب: مقایسه ابعاد وکسل با فاصله هازدورف

شکل (۱۶)، ارتباط تعداد المان‌های سطح و خطای ساده‌سازی را بر حسب ابعاد سلول در روش ساده‌سازی خوشه‌بندی رئوس نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش ابعاد سلول، تعداد المان‌های سطح کاهش (شکل (۱۶)، الف) و خطا افزایش می‌یابد (شکل (۱۶)، ب). شکل (۱۷)، ارتباط تعداد المان‌های سطح و خطای ساده‌سازی را بر حسب درصد ساده‌سازی در روش ساده‌سازی فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادریک نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش درصد ساده‌سازی، تعداد المان‌های سطح کاهش (شکل (۱۷)، الف) و خطا افزایش می‌یابد (شکل (۱۷)، ب).

به طوری که ساختار کلی جسم سه بعدی کامل تخریب می‌شود. با توجه به شکل (۱۴)، مقدار شعاع 0.5 متر دارای کمترین خطا و کمترین تعداد المان‌های مثلثی (به ترتیب 0.02 متر و 23 عدد) است که به عنوان پارامتر بهینه برای روش چرخش توپ در نظر گرفته می‌شود.

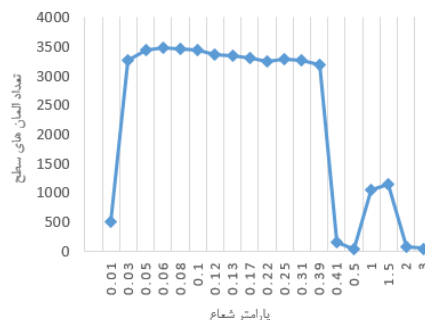


الف

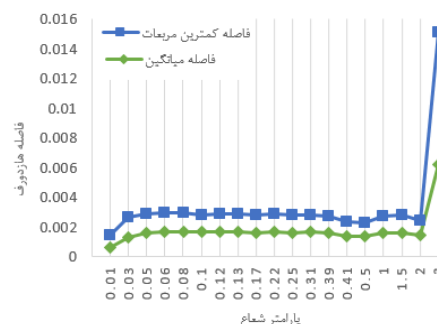


ب

شکل ۱۳- ارزیابی روش پواسن، الف: مقایسه پارامتر عمق با تعداد المان‌های سطح، ب: مقایسه پارامتر عمق با فاصله هازدورف

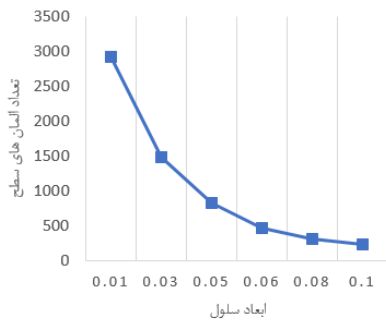


الف

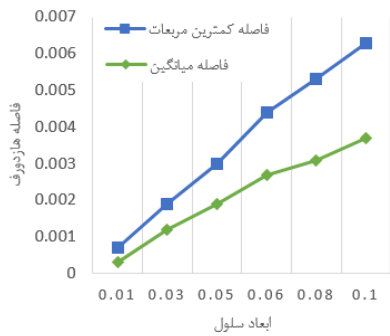


ب

شکل ۱۴- روش چرخش توپ، الف: مقایسه شعاع توپ با تعداد المان‌های سطح، ب: مقایسه شعاع توپ با فاصله هازدورف

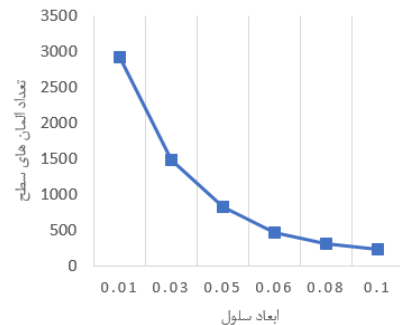


الف

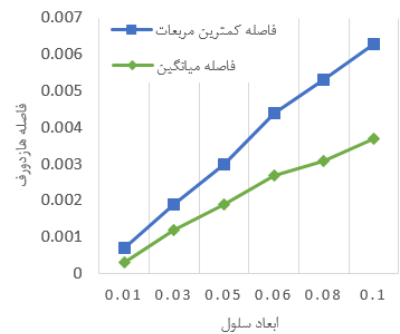


ب

شکل ۱۷- روش ساده‌سازی فروپاشی لبه با استفاده از خطای کوادراتیک، الف: مقایسه درصد ساده‌سازی با تعداد المان‌های سطح، ب: مقایسه درصد ساده‌سازی با فاصله هازدورف



الف



ب

شکل ۱۶- روش خوشه‌بندی رئوس، الف: مقایسه ابعاد سلول با تعداد المان‌های سطح، ب: مقایسه ابعاد سلول با فاصله هازدورف

جدول ۲- حداقل و حداکثر خطای مدل‌سازی (میانگین فاصله هازدورف) و تعداد المان‌های سطح معادل آنها در روش‌های مثلث‌بندی و ساده‌سازی

روش	حداکثر خطا (متر)	تعداد المان‌های سطح معادل حداکثر خطا	حداقل خطا (متر)	تعداد المان‌های سطح معادل حداقل خطا
پواسن	۰/۰۲۲	۵۵۸۸	۰/۰۲۰۶	۷۷۹۲
چرخش توپ	۰/۰۰۱۶	۳۴۷۲	۰/۰۰۱۴	۳۵
روش حجمی و MC	۰/۰۲۸۲	۴۶۸	۰/۰۰۴۱	۸۰۶۸
ساده‌سازی مدل مرجع با خوشه‌بندی رئوس	۰/۰۰۳۷	۲۳۰	۰/۰۰۰۳	۲۹۲۳
ساده‌سازی مدل مرجع با خطای کوادریک	۰/۰۰۱۶	۳۶۴	۰/۰۰۰۳	۳۲۷۵
ساده‌سازی مدل پواسن با خوشه‌بندی رئوس	۰/۰۰۲۶	۵۴۷	۰/۰۰۰۰۶	۴۶۱۱
ساده‌سازی مدل پواسن با خطای کوادریک	۰/۰۰۸۳	۷۴	۰/۰۰۰۰۱	۳۹۱۴
ساده‌سازی مدل چرخش توپ با خوشه‌بندی رئوس	۰/۰۰۲۱	۳۰۲۱	۰/۰	۲۵۴
ساده‌سازی مدل چرخش توپ با خطای کوادریک	۰/۰۰۳۲	۳۴۳۶	۰/۰۰۰۳	۳۴
ساده‌سازی مدل حجمی و MC با خوشه‌بندی رئوس	۰/۰۰۰۴	۱۷۸	۰/۰۰۰۱	۳۳۷۰
ساده‌سازی مدل حجمی و MC با خطای کوادریک	۰/۰۰۴۲	۳۹	۰/۰	۴۰۶۶

روش‌های مثلث‌بندی سطح و ساده‌سازی مثلث‌ها در این است که مدل تولید شده کمترین خطا را داشته باشد. به عبارت دیگر، در این روش‌ها، معمولاً تعداد مثلث‌ها (که همان المان‌های سطح مثلث‌بندی شده، هستند) در یک روند بهینه به نحوی افزایش می‌یابند که اختلاف بین مدل نهایی با مدل اصلی کمترین مقدار باشد. تنها استثنا در روش چرخش توپ است که با کاهش تعداد المان‌های

از آنجایی که پارامتر مشترک بین کلیه روش‌های فوق، ارتباط بین تعداد المان‌های سطح و خطای مدل‌سازی (میانگین فاصله هازدورف) است، لذا در جدول (۲)، حداقل و حداکثر خطا بر حسب متر و تعداد المان‌های سطح متناسب با این خطاها برای کلیه روش‌ها محاسبه و مقایسه شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۲)، می‌توان مشاهده نمود که اساس کلی در کلیه

تا حد قابل توجهی کاهش یابد. لذا در این تحقیق، سه روش پواسن، چرخش توپ و روش حجمی مبتنی بر مکعب‌های مارش به منظور تولید مدل سه بعدی از ابر نقاط متراکم پیاده‌سازی و ارزیابی شد. همچنین دو روش خوشه‌بندی رئوس و فروپاشی لبه براساس خطای کوادریک به منظور بهبود مدل‌های تولید شده مورد استفاده قرار گرفت. به منظور یافتن روش بهینه در تولید مدل سه بعدی و سپس ساده‌سازی آنها، ارزیابی کلیه این روش‌ها با توجه به پارامترهای بهینه آنها و فاصله بین مدل تولید شده با مدل مرجع و تعداد المان‌های مثلثی باقیمانده انجام شود. از بین روش‌های مثلث‌بندی سطح، مدل تولید شده توسط روش الگوریتم حجمی مبتنی بر مکعب‌های مارش نسبت به سایر روش‌ها، دارای خطای کم‌تر و تعداد المان‌های کم‌تر می‌باشد، از طرفی در روش چرخش توپ، هنگامی که تراکم نقاط کم باشد، نواحی خالی در مدل ایجاد می‌شود، که این مورد در روش‌های پواسن و الگوریتم حجمی مبتنی بر مکعب‌های مارش وجود ندارد. از بین روش‌های ساده‌سازی، به ازای تعداد المان‌های برابر، خطای ساده‌سازی در روش خوشه‌بندی حدوداً دو برابر روش فروپاشی لبه براساس خطای کوادریک است. در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود برای افزایش کیفیت مدل نهایی، از پارامترهای بیشتری به منظور مثلث‌بندی سطح و ساده‌سازی استفاده شود، همچنین ارزیابی بین کیفیت مش ساده شده و مرجع با کمیت‌های بیشتری انجام شود تا صحت و دقت مدل نهایی بیشتر شود.

سطح، خطا نیز کاهش یافته است، با این حال در این روش، میزان نواحی خالی در مدل ایجاد شده بیش از مدل‌های دیگر است. لذا از آنجایی که روش ایده‌آل در بهبود مدل سه بعدی، کاهش رئوس و سطوح به نحوی است که اختلاف مدل بهبود یافته با مدل اصلی کمترین مقدار را داشته باشد، و از لحاظ بصری نیز مدل دارای کیفیت مناسب باشد، لذا روش مثلث‌بندی حجمی و MC در بهبود مدل سه بعدی موفق‌تر از سایر روش‌ها بوده است، به طوری که در فرایند مدل‌سازی با استفاده از این روش، تنها حدود ۴۶۸ مثلث با خطای کلی حدود ۰/۰۳ متر حاصل می‌شود. از طرفی روش فروپاشی لبه براساس خطای کوادریک به ازای تعداد المان‌های بیشتر، دارای خطای کمتری از روش ساده‌سازی بر اساس خوشه‌بندی رئوس است. نتیجه ساده‌سازی بر اساس خطای کوادریک بر روی مدل ایجاد شده با استفاده از روش مثلث‌بندی حجمی و MC، حدود ۳۹ مثلث با خطای کلی حدود ۰/۰۴ متر خواهد بود که نسبت به سایر روش‌ها، نتیجه قابل قبولی است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مدل‌سازی سه بعدی و ایجاد سطوح پیوسته از داده‌های گسسته، ضروری است که روش بهینه در تولید یک مدل سه بعدی بهینه انتخاب شود تا علاوه بر حفظ کیفیت بصری سطح، حجم محاسبات و پردازش‌ها نیز

مراجع

- [1] Y. Song, and J. Shan, "Photorealistic Building Modeling and Visualization in 3-D Geospatial Information System", ISPRS, Istanbul, 2004.
- [2] S. Xin, S.M. Chen, Y. He, G. Wang, X. Gu, and H. Qin, "Isotropic Mesh Simplification by Evolving the Geodesic Delaunay Triangulation", IEEE, pp. 39-47, 2011.
- [3] R. Pagés, D. Berjón, and F. Morán, "Automatic System for Virtual Human Reconstruction with 3D Mesh Multi-Texturing and Facial Enhancement", ELSEVIER, Vol. 28, pp. 1089-1099, 2013.
- [4] A. P. McClune, P. E. Miller, J. P. Mills, D. Holland. "Automatic Urban 3D Building Reconstruction from Multi-Ray Photogrammetry", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Zurich, Switzerland, 2014.
- [5] J. Liu and B. Guo, "Reconstruction and Simplification of Urban Scene Models based on Oblique Images", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3, 2014, ISPRS Technical Commission III Symposium, 5 – 7 September 2014, Zurich, Switzerland
- [6] S. Guha, "Mesh Simplification Via A Volume Cost Measure, "Computer Graphics & Animation (IJCGA)", pp. 53-64, 2015.
- [7] R. Pages, D. Berjon, F. Moran, N. Garcia. "Seamless, Static Multi-Texturing of 3D Meshes", In Computer Graphics Forum, Vol. 34, pp. 228-238, 2015.

- [8] A. Bodis-Szomoru, H. Riemenschneider, L. Van Gool, "Efficient Edge-Aware Surface Mesh Reconstruction for Urban Scenes", Computer Vision and Image Understanding, 2016.
- [9] M. Bern and D. Eppstein, "Mesh generation and optimal triangulation", Computing in Euclidean geometry, vol. 1, pp. 23-90, 1992.
- [10] M. Spickova, "Comparison of Surface Reconstruction Methods for Mobile Robotics", Bachelor's thesis, Czech Technical University in Prague, 2013.
- [11] M. Varshosaz, H. Helali, D. Shojaee, "The Methods of Triangulation", Map Middle East'05: Proceedings of the 1st Annual Middle East Conference and Exhibition on Geospatial Information, Technology and Applications, 2005.
- [12] C. Felgueiras, M.F. Goodchild, "Two Papers on Triangulated Surface Modeling", Technical Report 95-2, 1995.
- [13] A. Khatamian, H. R. Arabnia, "Survey on 3D Surface Reconstruction", J Inf Process Syst, Vol. 12, No.3, pp. 338-357, 2016.
- [14] M. Berger, A. Tagliasacchi, L. M. Seversky, P. Alliez, G. Guennebaud, J. A. Levine, A. Sharf, C. T. Silva, "A Survey of Surface Reconstruction from Point Clouds", Computer Graphics, pp. 1-28, 2016.
- [15] P. S. Heckbert and M. Garland, "Survey of polygonal surface simplification algorithms", Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa School Of Computer Science, 1997.
- [16] D. P. Luebke, "A developer's survey of polygonal simplification algorithms", Computer Graphics and Applications, IEEE, vol. 21, pp. 24-35, 2001.
- [17] P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno, "A comparison of mesh simplification algorithms", Computers & Graphics, Vol. 22, pp. 37-54, 1998.
- [18] J. O. Talton, "A short survey of mesh simplification algorithms", University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [19] C. Erikson, "Polygonal simplification: An overview", University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, 1996.
- [20] B. Wunsche, "A Survey and Evaluation of Mesh Reduction Techniques", In: Proc. IVCNZ 1998, pp. 393-398, 1998.
- [21] A. Maglo, G. Lavoue, F. Dupont, C. Hudelot, "3D mesh compression: survey, comparisons and emerging trends", ACM, Vol. 47, Issue 3, 2015.
- [22] A. Bulbul, T. Capin, G. Lavoué, and M. Preda, "Assessing visual quality of 3-D polygonal models", Signal Processing Magazine, IEEE, Vol. 28, pp. 80-90, 2011.
- [23] H. Edelsbrunner, "Geometry and topology for mesh generation", Cambridge University Press, 2001, pp. 154-156.
- [24] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, "Poisson surface reconstruction", in Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing, Vol. 7, 2006.
- [25] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin, "The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction", Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, Vol. 5, pp. 349-359, 1999.
- [26] H. Edelsbrunner and E. P. Mücke, "Three-dimensional alpha shapes," ACM Trans. Graph., Vol. 13, No. 1, pp. 43-72, Jan. 1994.
- [27] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A high Resolution 3D surface Construction Algorithm", ACM siggraph computer graphics, Vol. 21, pp. 163-169, 1987.
- [28] S. Guha, "Mesh Simplification Via a Volume Cost Measure", International Journal of Computer Graphics & Animation, Vol. 5, p. 53, 2015.
- [29] M. Cubes, "A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm/William E", Lorensen, Harvey E. Cline-SIG '87, 1987.
- [30] M. Botsch, M. Pauly, L. Kobbelt, P. Alliez, B. Lévy, S. Bischoff, et al., "Geometric modeling based on polygonal meshes", 2007.
- [31] K.-L. Low and T.-S. Tan, "Model simplification using vertex-clustering", in Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics, pp. 75-ff, 1997.
- [32] K. Dumay. "MeshLab Documentation", Cyprus Institute, 2005.
- [33] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno, "Metro: Measuring error on simplified surfaces," Computer Graphics Forum, Vol. 17, pp. 167-174, 1998.