



پرینت سه‌بعدی ساختارهای مبتنی بر وکسل با ایجاد فایل اس‌تی‌ال به صورت مستقیم

علی احسانی‌نژاد^۱، علی حسن‌آبادی^{۲*}، مجتبی شیخی ازقندی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hasanabadi@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۹ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

پرینت سه‌بعدی

ساختار پایه وکسل

ایجاد فایل اس‌تی‌ال

به‌هم‌پیوستگی ساختار

ساختارهای مبتنی بر وکسل از روی هم قرار گرفتن بلوک‌های مکعبی کوچک به نام وکسل ایجاد می‌شوند. کاربردهای رایج این نوع ساختارها در نمایش حجمی تصاویر پزشکی و گرافیک رایانه‌ای است. در ساختارهای مبتنی بر وکسل، به‌هم‌پیوستگی ساختار مهم است و تقریباً تمام خواص ساختار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین اتصال، موضوع مهمی برای قابلیت ساخت ساختار مبتنی بر وکسل به روش چاپ سه‌بعدی است. این نوع ساختارها غالباً به علت پیچیدگی، قابلیت ساخت به روش‌های سنتی را ندارند. در این مقاله از تصاویر دوبعدی برای ایجاد یک ساختار سه‌بعدی مبتنی بر وکسل استفاده شده است و با توجه به این که یک جسم فیزیکی واقعی باید یک ناحیه به‌هم‌پیوسته باشد یک الگوریتم کارآمد برای شناسایی نواحی به‌هم‌پیوسته که خوشه نامیده می‌شوند، ارائه می‌شود. برای چاپ سه‌بعدی جسم که در واقع بزرگ‌ترین خوشه خواهد بود، به فایلی نیاز است که توسط نرم‌افزارهای اسلایسر دستگاه چاپ سه‌بعدی قابل خواندن باشد. فرمت فایل اس‌تی‌ال رایج‌ترین فرمت در این زمینه است. بنابراین الگوریتمی برای ایجاد فایل اس‌تی‌ال ساختار به صورت مستقیم ارائه شده و فایل اس‌تی‌ال ساختار با استفاده از کدگذاری ASCII ایجاد می‌شود. نهایتاً به منظور صحت‌گذاری و ارزیابی الگوریتم ارائه‌شده، فایل اس‌تی‌ال خروجی الگوریتم پیشنهادی به روش رسوب ذوب فیلامنت پرینت گرفته شد.

3D printing of voxel-based structures by direct creation of STL file format

Ali Ehsani Nezhad¹, Ali Hasanabadi^{2*}, Mojtaba Sheikhi Azqandi³

1- MSc Student, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

2-Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

3-Associate Professor, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

* Corresponding Author's Email: hasanabadi@birjand.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 May 2024

Accepted: 30 August 2024

Keywords:

3D Printing

Voxel-Based Structures

STL File Format Creation

Structure Continuity

Abstract

Voxel-based structures are composed of tiny cubic building blocks called voxels. These structures have found widespread applications in volumetric visualization of medical images and computer graphics. In voxel-based structures, connectivity plays a crucial role, influencing almost all properties of the structure. Moreover, connectivity is essential for the manufacturability of voxel-based structures using 3D printing techniques. Due to their inherent complexity, traditional fabrication methods are not suitable for constructing these structures. In this research, two-dimensional images are used to create a voxel-based three-dimensional structure, and considering that a real physical object must be a connected region, an efficient algorithm for identifying connected regions called clusters is presented. For the 3D printing of the object, which will actually be the largest cluster, a file that can be read by the slicer software of the 3D printing machine is needed. The STL file format is the most common format in this domain. Therefore, an algorithm was proposed to directly generate the STL file of the structure, and the STL file was produced. ASCII encoding was employed for file generation. The STL file generated by the algorithm was printed using the fused deposition modeling method.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ehsani Nezhad A, Hasanabadi A, Sheikhi Azqandi M. 3D printing of voxel-based structures by direct creation of STL file format. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Aug 22;11(6):29-41. doi: 10.22034/IJME.2024.457932.1960 [In Persian]

۱- مقدمه

پرینت سه بعدی که به عنوان ساخت افزودنی نیز شناخته می شود، فرایند ایجاد اشیای سه بعدی با افزودن مواد به صورت لایه به لایه براساس مدل دیجیتال است [۱]. این فناوری امکان تولید اشکال و ساختارهای پیچیده‌ای را فراهم می کند که دستیابی به آن‌ها با استفاده از روش‌های تولید سنتی ممکن است دشوار یا غیرممکن باشد [۲]. چاپ سه بعدی به دلیل تطبیق پذیری و توانایی آن در تولید طرح‌های سفارشی و پیچیده به طور کارآمد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پزشکی، خودرو و کالاهای مصرفی کاربرد دارد [۳]. برخلاف روش‌های تولید سنتی که شامل کم کردن مواد از یک بلوک جامد یا قالب‌گیری مواد به شکلی خاص است، چاپ سه بعدی با افزودن لایه به لایه مواد تا زمانی که محصول نهایی تشکیل شود، اشیای را می‌سازد [۴، ۵]. ساختارهای مبتنی بر وکسل^۱ جزء ساختارهایی هستند که به علت پیچیدگی امکان ساخت به روش‌های سنتی را ندارند. ساختارهای مبتنی بر وکسل که به عنوان ساختارهای حجمی نیز شناخته می‌شوند، از روی هم قرارگرفتن بلوک‌های مکعبی به نام وکسل به وجود می‌آیند. وکسل را می‌توان پیکسل حجم داده شده نامید [۶]. در حالی که پیکسل‌ها برای نمایش تصاویر دوبعدی استفاده می‌شوند، وکسل‌ها برای نمایش اشیای سه بعدی در گرافیک کامپیوتری، تصویربرداری پزشکی و حوزه‌های دیگر کاربرد دارند [۷]. وکسل‌ها در تصویربرداری پزشکی به خصوص در تکنیک‌هایی مانند تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (ام‌آر‌آی) و توموگرافی کامپیوتری (سی‌تی) نقشی اساسی ایفا می‌کنند. وکسل‌ها برای ایجاد مدل‌های سه بعدی از ساختارهای آناتومیک استفاده می‌شوند و امکان مشاهده و تحلیل دقیق را فراهم می‌کنند. برای مثال، تکنیک‌های رندر حجم سه بعدی در سی تی و ام‌آر‌آی از وکسل‌های ایزوتروپیک برای ایجاد تصاویر سه بعدی دقیق استفاده می‌کنند و توانایی تشخیص را افزایش می‌دهند [۸]. در بحث بصری‌سازی داده‌ها، چاپ سه بعدی ساختارهای مبتنی بر وکسل می‌تواند مجموعه داده‌های دیجیتال را به اشیای فیزیکی تبدیل کند و امکان نمایش ملموس داده‌های علمی را فراهم آورد. این روش برای تجسم انواع داده‌های پیچیده مانند ابر نقاط، نمودارها و داده‌های حجمی مفید است [۹].

غذایی و همکاران [۱۰] به بررسی چاپ سه بعدی مدل‌های وکسل چندسطحی پرداختند. آن‌ها از یک الگوریتم به نام میدان‌های در حال حرکت برای شناسایی مرز وکسل‌ها و ایجاد کانتورهای محیطی به منظور ایجاد جی‌کد^۲ استفاده کردند. آن‌ها همچنین چالش‌های مرتبط با چاپ مدل‌های وکسل چندسطحی را مورد بحث قرار دادند و راه‌حلی را ارائه دادند که شامل استفاده از یک چاپگر سه بعدی جوهرافشان است. بادر و همکاران [۹] به بررسی استفاده از چاپ وکسل چندماده‌ای برای ایجاد مدل‌های فیزیکی از داده‌های تصویربرداری شده پرداختند. روش آن‌ها اجازه می‌دهد تا مجموعه داده‌های ابر نقاط، بدون نیاز به پس‌پردازش یا تبدیل به مدل‌های سطحی، مستقیماً به اشیای فیزیکی با مواد مختلف تبدیل شوند. یوشنگ‌سو و همکاران [۱۱] به بررسی روش‌ها و کاربردهای نمایش سه بعدی ابر نقاط مبتنی بر وکسل در صنعت ساختمان‌سازی پرداختند. آن‌ها دریافتند که نمایش ابر نقاط مبتنی بر وکسل، پتانسیل بالایی در کارهایی مانند بازسازی قسمت‌های تخریب‌شده‌ی آثار باستانی و نقشه‌برداری شهری دارد. چینیان و شیکای [۱۲] به بحث در مورد پیشرفت‌های فناوری وکسل‌سازی در حوزه ساخت افزودنی و همچنین انتقال از فرمت‌های سنتی مانند اس تی ال^۳ و 3DS به فرمت جدیدتر AMF پرداختند. آن‌ها روش وکسل‌سازی مبتنی بر فرمت داده AMF را پیشنهاد دادند تا امکان خلق مدل‌های مبتنی بر وکسل با چند ویژگی مانند رنگ، ماده و چگالی فراهم شود. وانگ و همکاران [۱۳] روشی را برای ساخت مدل‌های فیزیکی نمونه‌سازی سریع سه بعدی برای تصاویر پزشکی توموگرافی کامپیوتری ارائه دادند. روش پیشنهادی از فایل اس تی ال برای ساخت نمونه‌ها استفاده می‌کند و فرایند تبدیل تصاویر سی تی اسکن به یک مدل نمونه‌سازی سریع را ساده می‌کند. بین [۱۴] فرمت توسعه‌یافته‌ای برای فایل اس تی ال معرفی کرد که با پیشنهاد فرمتی جدید برای تولید و ذخیره مثلث‌ها، از راه‌حل‌های موجود متمایز می‌شود. فرمت جدید از چندین مثلث استفاده می‌کند و حاوی اطلاعات هندسی و توپولوژیکی است و قابلیت ذخیره‌سازی بهبودیافته دارد. هیلر و لپسون [۱۵] به طراحی و تحلیل مواد دیجیتال برای چاپ سه بعدی وکسل‌های فیزیکی پرداختند. آن‌ها اشکال مختلف وکسل مانند کره، مربع و لوزی را بررسی کردند. پژوهش آن‌ها شامل شبیه‌سازی‌هایی در مورد دقت و عملکرد مواد دیجیتال و همچنین کاربردهای بالقوه این مواد است. آرمو و همکاران [۱۶] روشی مبتنی بر وکسل برای تولید ساختارهای شبکه‌ای سازگار با ساخت افزایشی ارائه دادند. روش آن‌ها به قطعات با هندسه‌های پیچیده قابلیت امکان ساخت می‌بخشد. چنلی و همکاران [۱۷] یک چارچوب بازسازی مش مبتنی بر

¹ Voxel

² G-code

³ STL

ساختار وکسل را ارائه کردند که با هدف برآورده کردن نیازهای کلیدی، حفظ ویژگی‌های هندسی و بازسازی مش از ابرنقاط سه بعدی طراحی شده است. کافمن و همکاران [۱۸] به بررسی استفاده از گرافیک حجمی، به ویژه رندرینگ مبتنی بر وکسل، به عنوان جایگزینی برای گرافیک سنتی مبتنی بر سطح برای مدیریت مجموعه داده‌های پیچیده سه بعدی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که گرافیک حجمی، به عنوان زیرمجموعه‌ای از گرافیک رایانه‌ای، پتانسیل جایگزین کردن گرافیک سطحی برای نمایش، دستکاری و رندر صحنه‌های هندسی سه بعدی را دارد و جایگزین جامع و کاملی را برای گرافیک سنتی مبتنی بر سطح ارائه می‌دهد. لری و همکاران [۱۹] به بررسی مطالعات و پژوهش‌های مختلف مرتبط با ساخت افزایشی پرداختند که بر بهینه‌سازی توپولوژی، ساختارهای تکیه‌گاهی و ساختارهای لانه‌زنبوری تمرکز دارد. آن‌ها استفاده از سلول‌های مبتنی بر وکسل را به عنوان روشی نوین برای تولید ساختارهای تکیه‌گاهی در ساخت افزایشی پیشنهاد کردند که هدف آن امکان تولید مستقیم ساختارهای با توپولوژی بهینه است. الکساندرو و همکاران [۲۰] به بررسی الگوریتم‌های وکسلی کردن برای نمایش اشیای سه بعدی با استفاده از وکسل‌ها پرداختند. آن‌ها ویژگی‌هایی مانند اتصال، جداسازی و پوشش را در کنار الگوریتم‌های مختلف وکسلی کردن برای اشکال هندسی اولیه، مورد بحث قرار دادند. پاتیل و راوی [۲۱] به بررسی تکنیک‌های مدل‌سازی سالیید مبتنی بر وکسل برای تحلیل ضخامت با استفاده از روش‌های مختلفی مانند نمایش مقطع عرضی، حذف لایه‌ای تدریجی و پرتونگاری پرداختند. الگوریتم‌های آن‌ها روی اشیای پیچیده آزمایش شدند و از نظر مصرف حافظه و زمان محاسبه، نتایج رضایت‌بخشی را به دست آوردند. شیاجون وو و همکاران [۲۲] به بررسی استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر وکسل برای نمایش ساختارهای داخلی و ویژگی‌های اشیای سه بعدی پرداختند که امکان نمایش آن‌ها با مدل‌های سطحی سنتی وجود ندارد.

به علت اهمیتی که ساختارهای مبتنی بر وکسل در زمینه‌هایی مثل پزشکی و علم مواد دارند، ایجاد روشی مستقیم برای شناسایی نواحی به هم پیوسته و چاپ سه بعدی این نوع ساختارها مفید است. در این مقاله، از تصاویر دوبعدی برای ایجاد یک ساختار مبتنی بر وکسل استفاده می‌شود. به عنوان نمونه این تصاویر می‌توانند خروجی تصویربرداری پزشکی بوده یا با استفاده از توابع آماری ریاضی نظیر توابع همبستگی دوقطه‌ای^۱ [۲۳، ۲۴] یا توابع خوشه‌ای [۲۵] ایجاد شوند. غالباً در کنار بخش اصلی به هم پیوسته ساختار، ممکن است بخش‌هایی به هم پیوسته اما جدا از بخش اصلی وجود داشته باشد. با توجه به این که برای چاپ سه بعدی لازم است که ساختار به هم پیوسته و یک تکه باشد، لازم است بخش‌های جدا از ساختار اصلی در ابتدا شناسایی شده و حذف شوند. در این مقاله، ابتدا روشی برای شناسایی نواحی به هم پیوسته ساختار متخلخل سه بعدی که خوشه^۲ نامیده می‌شوند، ارائه شده و سپس بزرگ‌ترین خوشه، شناسایی و استخراج می‌شود. سپس الگوریتمی جدید برای ایجاد فایل اس تی ال به صورت مستقیم ارائه می‌گردد. الگوریتم شناسایی و جداسازی کلاستر اصلی ساختار و همچنین الگوریتم ایجاد فایل اس تی ال در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۲۲b پیاده‌سازی و اجرا می‌شود. با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، ارزیابی ساختار و همچنین ایجاد فایل اس تی ال آن بدون استفاده از نرم‌افزار جانبی دیگر امکان پذیر می‌شود؛ چرا که با ایجاد رابط گرافیکی در نرم‌افزار متلب و قرارگیری هر دو الگوریتم در آن، امکان تبدیل مستقیم تصاویر دوبعدی ساختارهای مبتنی بر وکسل به فایل اس تی ال قابل چاپ، برای هر کاربر بدون نیاز به داشتن دانش برنامه‌نویسی فراهم می‌گردد.

۲- روش انجام پژوهش

پیکسل کوچک‌ترین جزء یک تصویر دیجیتال است. هر تصویر دیجیتال از مجموعه‌ای از پیکسل‌ها تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها یک رنگ و شدت خاص را نمایان می‌کند. معمولاً تصاویر سطوح خاکستری^۳ از هشت بیت حافظه برای ذخیره مقادیر پیکسل از صفر تا ۲۵۵ استفاده می‌کنند [۲۶]. شکل ۱ یک تصویر سطوح خاکستری را به همراه مقادیر هر پیکسل نشان می‌دهد. پیکسل سیاه مقدار صفر را به خود اختصاص می‌دهد و هرچه پیکسل روشن‌تر شود، مقدار آن افزایش می‌یابد؛ به طوری که پیکسل سفید مقدار آن ۲۵۵ می‌شود.

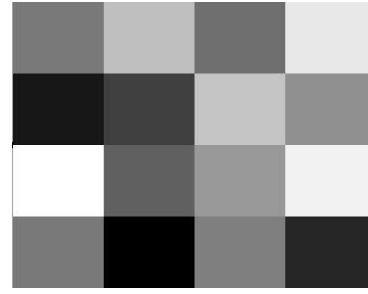
¹ Two-Point Correlation Functions

² Cluster

³ Grayscale Images

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 127 | 191 | 111 | 232 |
| 23 | 64 | 197 | 144 |
| 255 | 96 | 153 | 242 |
| 121 | 0 | 127 | 38 |

(ب)



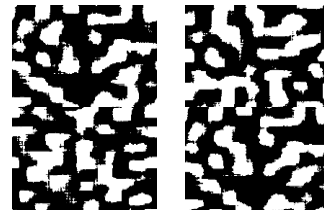
(الف)

شکل ۱ الف) پیکسل های تشکیل دهنده ی یک تصویر ب) مقادیر هر پیکسل

تصاویر مورد استفاده در این مقاله به عنوان ورودی، از نوع سطوح خاکستری اما با دو بخش کاملاً متمایز سیاه و سفید هستند. ابعاد هر تصویر ۲۰۱ در ۲۰۱ پیکسل و فرمت آن‌ها از نوع TIFF است. شکل ۲-الف نمونه‌هایی از این تصاویر را نشان می‌دهد. هر تصویر بیانگر یک برش عرضی در راستای محور Z از ساختار و فاصله هر تصویر تا تصویر بالایی به اندازه یک پیکسل است [۲۷]. قابل ذکر است که این تصاویر مربوط به یک جسم سه بعدی واقعی هستند که می‌تواند خروجی یک الگوریتم شبیه‌سازی [۲۷] یا مستخرج از تصویربرداری پزشکی یا موارد مشابه باشد. مطابق با شکل ۲-ب این تصاویر بایستی بر روی یکدیگر قرار گیرند تا یک ساختار مبتنی بر وکسل را تشکیل دهند.



(ب)



(الف)

شکل ۲ الف) نمونه‌هایی از تصاویر ساختار مورد بررسی ب) نحوه ی قرارگیری تصاویر

۲-۱- شناسایی خوشه فعال اصلی

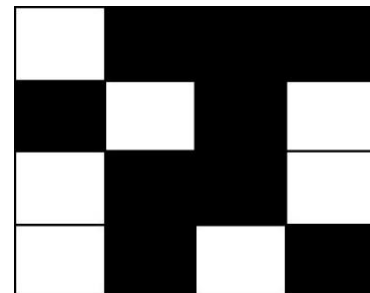
مطابق با شکل ۳-الف ریزساختار مورد بررسی دارای دو فاز سیاه و سفید است. بنابراین مطابق با شکل ۳-ب پیکسل‌های متعلق به فاز سیاه مقدار صفر و پیکسل‌های متعلق به فاز سفید مقدار ۲۵۵ را به خود می‌گیرند. اولین گام در طراحی مجازی ریزساختار، دیجیتالی کردن و گسسته‌سازی است. بنابراین تصاویر سطوح خاکستری باید به تصاویر باینری^۱ تبدیل شوند [۲۶]. مطابق با شکل ۳-ج در تصویر باینری مقادیر پیکسل‌های فاز سفید یک و فاز سیاه صفر خواهد بود.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |

(ج)

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 255 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 255 | 0 | 255 |
| 255 | 0 | 0 | 255 |
| 255 | 0 | 255 | 0 |

(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) پیکسل‌های تصاویر ب) مقادیر هر پیکسل ج) مقادیر هر پیکسل در حالت باینری

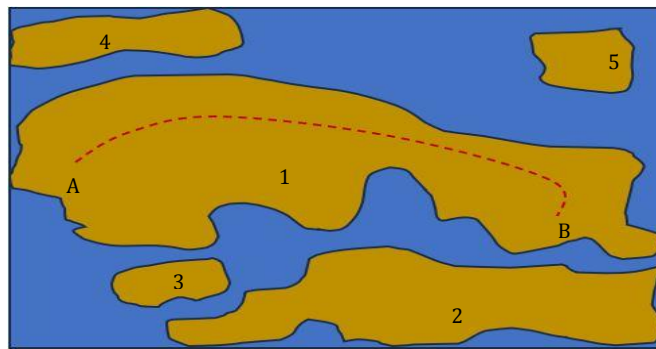
^۱ Binary

برای هر وکسل q و فاز p ، تابع مشخصه برای تعیین وضعیت هر وکسل به صورت معادله ۱ تعریف می شود:

$$m_q^p = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

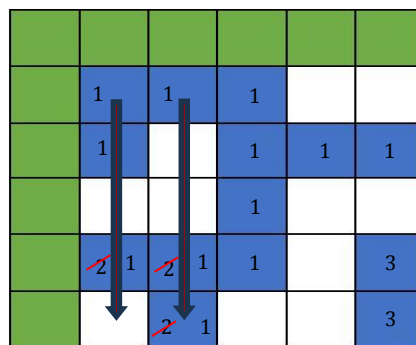
اگر وکسل q با فاز p اشغال شده باشد مقدار آن یک است؛ در غیر این صورت مقدار آن صفر می شود. این تابع ورودی الگوریتم است و فرض بر این است که این تابع در ابتدا برای همه وکسل ها شناخته شده است. علاوه بر این، فرض بر این است که هر وکسل تنها با یک فاز اشغال شده است. مطابق با معادله ۱، در ساختار مورد بررسی اگر فاز سفید رنگ مد نظر باشد نیاز به تغییر در مقدار پیکسل های تصاویر ورودی الگوریتم نمی باشد؛ ولی اگر فاز سیاه رنگ مد نظر باشد باید مقدار پیکسل های سفید، صفر و مقدار پیکسل های سیاه، یک در نظر گرفته شود.

خوشه به عنوان یک منطقه به هم پیوسته از یک فاز در نظر گرفته می شود، یعنی برای یک خوشه از یک فاز، برای هر دو نقطه دلخواه از آن خوشه، مسیری وجود دارد که آن دو نقطه را بدون عبور از فازهای دیگر به هم متصل می کند (نقاط A و B در شکل ۴ و مسیر قرمز رنگ خط چین). به عنوان مثال، ریزساختاری که در شکل ۴ نشان داده شده، دارای پنج خوشه برای فاز قهوه ای است. اگر یک خوشه یک طرف را به طرف دیگر متصل کند، مانند خوشه شماره ۱ در شکل ۴، به آن خوشه فعال می گویند که غالباً همان بزرگ ترین خوشه خواهد بود. شناسایی خوشه فعال و حذف خوشه های غیرفعال برای پرینت ساختار اهمیت پیدا می کند؛ چرا که یک جسم فیزیکی باید همه نقاط آن به هم پیوسته باشند. واضح است که خوشه فعال در مشخصات ساختار نقشی اساسی دارد، زیرا که مثلاً رسانایی الکتریکی و حرارتی یا عبور سیالات زمانی امکان پذیر خواهد بود که مسیر در کل ساختار وجود داشته باشد.



شکل ۴ مفهوم خوشه

در این مقاله ابتدا به منظور چاپ سه بعدی ساختار مورد بررسی باید خوشه های فعال اصلی آن مشخص و جداسازی شود؛ بنابراین باید هر خوشه برچسب گذاری شده و تعداد وکسل های آن مشخص گردد تا بزرگ ترین خوشه که همان خوشه فعال اصلی است شناسایی شود. الگوریتم مورد استفاده برای برچسب گذاری خوشه ها بر پایه تکنیک برچسب گذاری چندگانه خوشه ها^۱ [۲۸، ۲۹] می باشد. الگوریتم برچسب گذاری پیشنهادی برای سادگی، در ابتدا در دو بعد توصیف شده و سپس به سه بعد تعمیم داده می شود. نحوه عملکرد الگوریتم که به صورت شماتیک در شکل ۵ برای حالت دوبعدی نشان داده شده، به صورت زیر است:



شکل ۵ شماتیک الگوریتم برچسب گذاری خوشه ای

¹ Cluster Multiple Labeling Technique

ابتدا فرض می‌شود تابع ۱ برای همه پیکسل‌ها مشخص است. فازی که باید خوشه‌های آن تعیین شود به رنگ آبی و بقیه فازه‌ها سفید هستند.

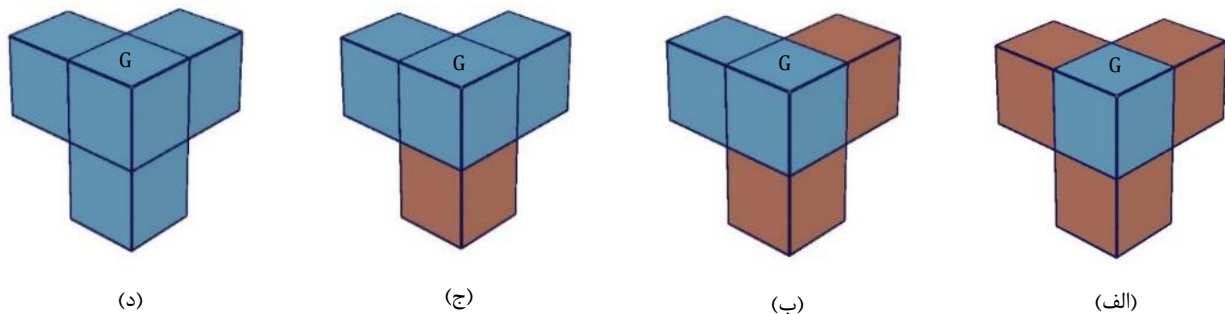
یک ردیف افقی و عمودی به سمت چپ و بالای ساختار دوبعدی اضافه و به این پیکسل‌ها فازی متفاوت با فازه‌های موجود اختصاص داده می‌شود که در شکل ۵ با رنگ سبز مشخص است.

پیکسل شروع بررسی، بالا و سمت چپ است و در راستای مشخص شده در شکل ۵ به صورت ستونی به سمت پایین ادامه پیدا می‌کند. پس از اتمام ستون اول، به ابتدای ستون دوم مراجعه شده و به همین صورت کل ساختار بررسی می‌شود. برای هر پیکسل مورد بررسی، فقط پیکسل‌های بالا و سمت چپ آن مورد بررسی قرار می‌گیرند که در این حالت سه وضعیت قابل تصور است:

- (۱) فاز پیکسل مورد بررسی با فاز هر دو پیکسل بالا و سمت چپ متفاوت است. در این حالت به پیکسل مورد بررسی یک شماره خوشه جدید اختصاص داده می‌شود (خوشه شماره ۳ در ستون آخر).
- (۲) فاز پیکسل مورد بررسی با فقط یکی از پیکسل‌های چپ و بالا یکسان است. در این حالت شماره خوشه پیکسل مورد بررسی با شماره خوشه پیکسل بالا یا چپی که با آن یکسان بود، برابر می‌شود (پیکسل دوم ستون اول که شماره خوشه یک می‌گیرد).
- (۳) فاز پیکسل مورد بررسی با فاز هر دو پیکسل بالا و چپ یکسان است. در این حالت به کلیه پیکسل‌های متصل به پیکسل مورد بررسی یکی از دو شماره خوشه بالا یا چپ اختصاص داده می‌شود و شماره خوشه دومی حذف می‌گردد (حذف خوشه شماره ۲ در ستون دوم).

این روش باید برای همه پیکسل‌ها انجام شود تا خوشه همه مشخص گردد. برای تعمیم به سه بعد کافی است به جای دو پیکسل بالا و چپ، سه وکسل را در جهت‌های مشخص شده در شکل ۶ بررسی نمود. نکته مهمی که باید مد نظر باشد این است که چه بسا خوشه‌هایی در دو بعد از هم جدا باشند ولی به هنگام سه بعدی شدن به هم متصل شده و به یک خوشه تبدیل شوند.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در هنگام شناسایی خوشه‌ها به صورت سه بعدی، برای هر وکسل خاص که با حرف G در شکل ۶ نشان داده شده است، چهار موقعیت متمایز برای سه وکسل اطراف وجود دارد. در شکل ۶-الف، هر سه وکسل فاز متفاوتی نسبت به فاز وکسل G دارند؛ بنابراین یک شماره خوشه جدید به وکسل G اختصاص داده می‌شود. در شکل ۶-ب تنها یک وکسل وجود دارد که فاز آن شبیه فاز وکسل G است. در این حالت، شماره خوشه وکسل G با شماره خوشه وکسل با فاز مشابه یکسان خواهد بود. در شکل ۶-ج و ۶-د، بیش از یک وکسل وجود دارد که فاز مشابه وکسل G دارند. در این وضعیت، کاهش مورد نیاز است، بنابراین شماره خوشه وکسل G و سایر خوشه‌های متصل به وکسل G که فاز مشابهی دارند، باید یکسان در نظر گرفته شود.

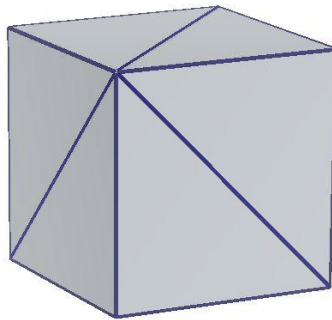


شکل ۶ همه‌ی موقعیت‌های ممکن برای وکسل‌های اطراف وکسل G

پس از برجسب گذاری وکسل‌ها و تعیین شماره خوشه آن‌ها، خوشه فعال و بزرگ‌تر شناسایی و جدا می‌شود که در مرحله‌ی بعد به عنوان ورودی برای الگوریتم ایجاد فایل اس تی ال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- الگوریتم ایجاد فایل اس تی ال

اس تی ال به عنوان رایج ترین فرمت برای ذخیره سازی فایل های مدل سه بعدی برای پرینت، شناخته شده است [۳۰]. نرم افزارهای اسلایسر^۱ که برای آماده سازی مدل برای چاپ سه بعدی استفاده می شوند، به طور گسترده از فرمت اس تی ال پشتیبانی می کنند. نرم افزارهای اسلایسر با خواندن فایل اس تی ال، جی کد لازم برای چاپ مدل را تولید می کنند. جی کد زبان دستوری مخصوص چاپگرهای سه بعدی است [۳۱]. فرمت اس تی ال هندسه سطح مدل سه بعدی را به تعداد زیادی ساختارهای مثلثی که مش نامیده می شوند، تقسیم بندی می کنند که این مش ها در کنار یکدیگر هندسه نهایی را تشکیل می دهند. این فرمت فقط هندسه سطح یک جسم سه بعدی را نشان می دهد و هیچ اطلاعاتی در مورد رنگ، بافت یا ویژگی های دیگر مدل ارائه نمی دهد [۳۲]. به طور مثال، شکل ۷ یک مکعب ساده را نشان می دهد که در فرمت اس تی ال، هر وجه آن از دو مثلث تشکیل می شود و مجموعاً دارای ۱۲ مثلث است.



شکل ۷ مش بندی مثلثی یک مکعب ساده در فرمت اس تی ال

در فرمت اس تی ال از دو روش برای ذخیره اطلاعات هندسی مثلث های پوشاننده مدل سه بعدی استفاده می شود. این روش ها کدگذاری ASCII و باینری نامیده می شوند [۳۳]. کدگذاری ASCII به صورت متنی نوشته می شود و قابلیت خواندن متن آن توسط انسان به صورت مستقیم وجود دارد. در هر دو روش کدگذاری اطلاعات زیر برای هر مثلث ذخیره می شود:

(۱) مختصات رئوس مثلث

(۲) بردار نرمال مثلث

در روش کدگذاری ASCII فایل اس تی ال با خط زیر آغاز می گردد:

solid name

به جای name نام مدل سه بعدی قرار می گیرد. در ادامه اطلاعات مربوط به رئوس و بردار نرمال هر مثلث به صورت زیر ذخیره و

برای تمام مثلث ها به صورت یک حلقه تکرار می شود:

facet normal $n_x n_y n_z$

outer loop

vertex $v1_x v1_y v1_z$

vertex $v2_x v2_y v2_z$

vertex $v3_x v3_y v3_z$

endloop

endfacet

n بردار نرمال مثلث مربوطه است و $v1$ ، $v2$ و $v3$ مختصات رئوس مثلث هستند و به صورت یک عدد ممیز شناور نوشته می شود،

به عنوان مثال عدد $1.230000e+02$ نوشته می شود. بعد از این که اطلاعات همه مثلث ها ذخیره شدند، خط زیر به عنوان

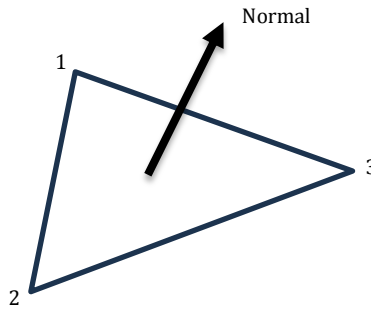
خط پایانی نوشته می شود:

endsolid name

باید دقت شود که مطابق با شکل ۸ ترتیب قرارگیری نقاط مثلث باید از قاعده دست راست پیروی کند، به صورتی که بردار نرمال

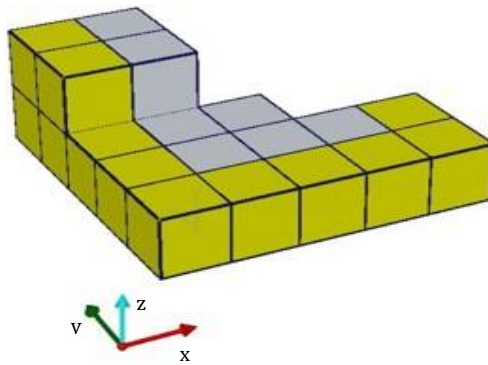
مثلث به سمت بیرون مدل سه بعدی باشد [۳۴].

¹ Slicer



شکل ۸ قاعده دست راست در ترتیب قرارگیری مختصات نقاط در الگوریتم

برای ایجاد فایل اس تی ال ساختار وکسلی مورد بررسی در این مقاله، از کدگذاری ASCII استفاده می شود. مطابق با شکل ۹ به ترتیب در جهت x ، جهت y و جهت z هر وکسل با وکسل بعدی در آن جهت مقایسه می شود و اگر فاز دو وکسل با یکدیگر متفاوت بود، سطح بین دو وکسل به عنوان بخشی از سطح ساختار سالیید تلقی گردیده و وجوه مثلثی آن سطح در الگوریتم فایل اس تی ال آورده می شود. برای راحتی کدنویسی و ایجاد حلقه های مورد نیاز، یک لایه وکسل با فاز متفاوت به تمام سطوح مرزی ساختار وکسلی اضافه می گردد.



شکل ۹ اضافه کردن وکسل های زرد رنگ برای شناسایی سطوح بسته مرزی

برای راحتی کار در تعیین مختصات نقاط، مطابق با شکل ۱۰، گوشه پایین و سمت چپ اولین وکسل لایه اول، به عنوان مبدأ مختصات مطلق تعیین می شود. گوشه پایین و سمت چپ هر جزء از سطح ساختار سالیید نیز به عنوان مبدأ مختصات نسبی آن سطح در نظر گرفته می شود و با توجه به این که موقعیت سه گوشه دیگر نسبت به مبدأ مختصات نسبی مشخص است، مختصات آن ها به راحتی به دست می آید. هر جزء سطح، دارای دو مثلث است. به عنوان مثال، شکل ۱۰ نحوه شناسایی سطح ساختار سالیید در راستای محور x را نشان می دهد. در شناسایی سطح ساختار سالیید در راستای محور x ، اگر سطح بین وکسل (i,j,k) و وکسل $(i+1,j,k)$ به عنوان سطح بسته شناسایی شود، مبدأ مختصات نسبی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{مبدأ مختصات نسبی: } (i, j-1, k-1)$$

در ردیف اول و لایه اول، سطح بین وکسل سوم و چهارم به عنوان سطح بسته شناسایی شده است؛ بنابراین مبدأ مختصات نسبی برای این سطح برابر است با $(3, 0, 0)$. یعنی نقطه ی شماره ۴. مختصات دیگر نقاط برابر می شود با:

$$P1 = P4 + (0, 1, 0), P2 = P4 + (0, 1, 1), P3 = P4 + (0, 0, 1)$$

به دلیل این که بردار نرمال هر سطح، موازی با راستای محور وکسل های مورد بررسی است، بردار نرمال آن برابر بردار یکه در همان جهت می شود.

برای جزء سطح مورد نظر در شکل ۱۰، مختصات نقاط برابر می شود با:

$$P1 = (3, 1, 0), P2 = (3, 1, 1), P3 = (3, 0, 1), P4 = (3, 0, 0)$$

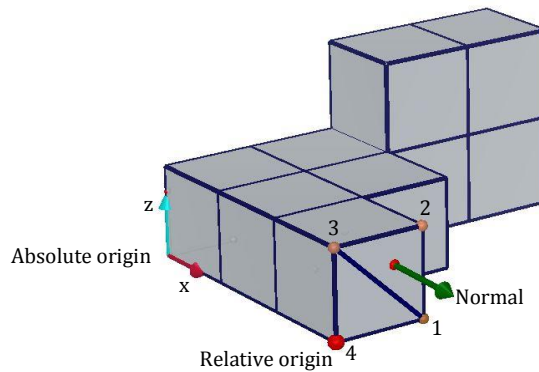
همچنین به دلیل این که راستای مورد بررسی محور x است، بردار نرمال برابر است با بردار یکه در راستای x . یعنی:

$$n = (1, 0, 0)$$

بنابراین اطلاعات مثلث مورد بررسی در شکل ۱۰ به صورت زیر در فایل اس تی ال ذخیره می گردد:

```
facet normal 1.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
outer loop
vertex 3.000000e+00 1.000000e+00 0.000000e+00
vertex 3.000000e+00 1.000000e+00 1.000000e+00
vertex 3.000000e+00 0.000000e+00 1.000000e+00
endloop
endfacet
```

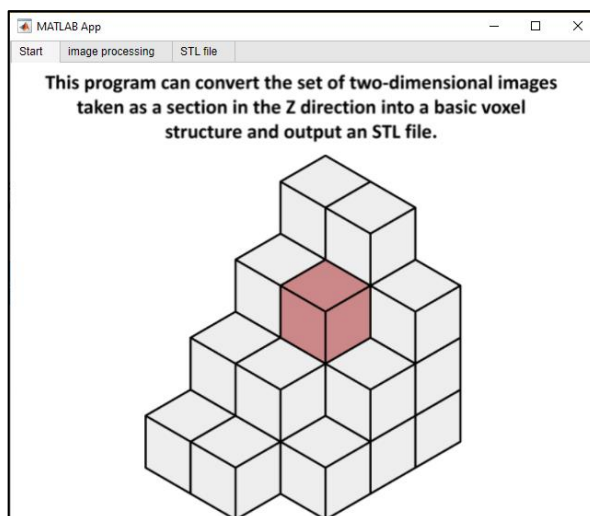
به همین ترتیب برای جهت های y و z سطوح بسته شناسایی و اطلاعات مثلث ها در فایل اس تی ال ذخیره می گردد.



شکل ۱۰ شماتیک الگوریتم ایجاد فایل اس تی ال برای سطوح بسته در راستای محور x

۳- نتایج و بحث

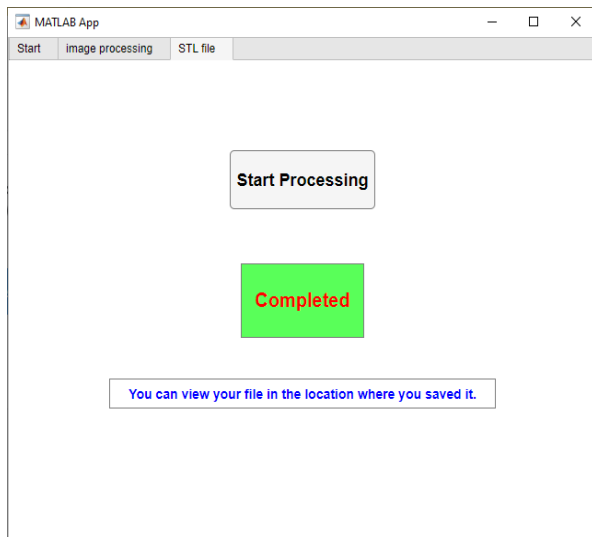
الگوریتم های معرفی شده در این مقاله، در نرم افزار متلب نسخه R2022b برنامه نویسی و اجرا می شود. به منظور استفاده راحت تر از برنامه، یک رابط کاربری گرافیکی در محیط اپ دیزاینر^۱ نرم افزار متلب طراحی می شود. به کمک این رابط کاربری گرافیکی، کاربر تنها با یک پنجره سر و کار خواهد داشت که همه چیز در آن به سهولت در دسترس بوده و به صورت گرافیکی دستورات اجرا می شود. شکل ۱۱ سربرگ اول رابط کاربری را نشان می دهد.



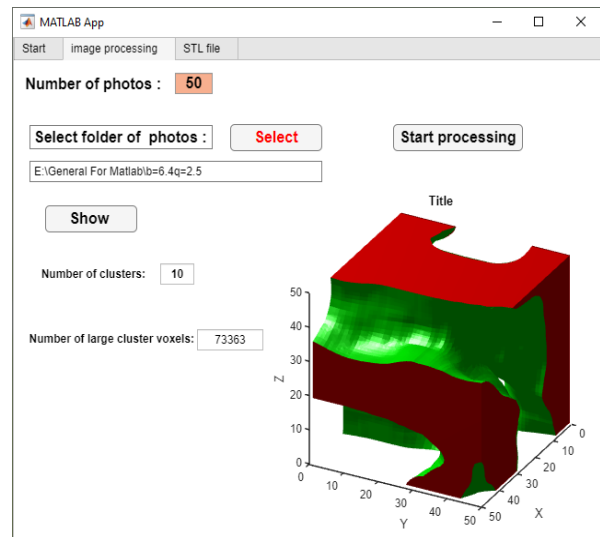
شکل ۱۱ نمای بخش اول رابط کاربری گرافیکی

^۱ App Designer

رابط کاربری سه بخش دارد که در بخش اول توضیحی در مورد برنامه ارائه شده است. در بخش دوم عملیات شناسایی و جداسازی خوشه فعال اصلی انجام می شود. در این بخش، تعداد تصاویر و همچنین پوشه حاوی تصاویر دوبعدی از کاربر دریافت و پس از فشردن دکمه استارت، فرایند آغاز می گردد. شکل ۱۲-الف نمایی از این بخش را نشان می دهد. پس از انجام عملیات، اطلاعاتی شامل تعداد خوشه ها، تعداد وکسل های خوشه فعال اصلی و همچنین یک نمای گرافیکی کلی از ساختار نمایش داده می شود. بخش سوم، مربوط به عملیات ایجاد فایل اس تی ال است. با فشردن دکمه استارت در این بخش، از کاربر خواسته می شود تا پوشه ای را برای ذخیره فایل انتخاب کند و سپس عملیات اجرا می شود. پس از اتمام عملیات، پیغامی مبنی بر موفقیت آمیز بودن عملیات نمایش داده و فایل اس تی ال در پوشه ای که کاربر انتخاب کرده است، ذخیره می گردد. این بخش در شکل ۱۲-ب نمایش داده شده است.



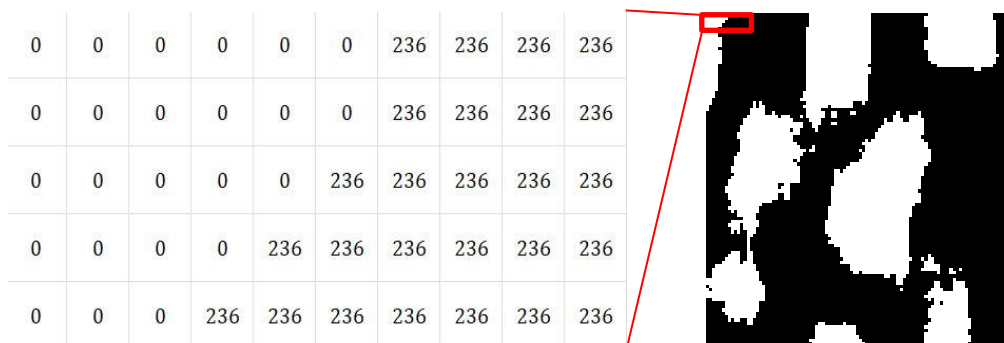
(ب)



(الف)

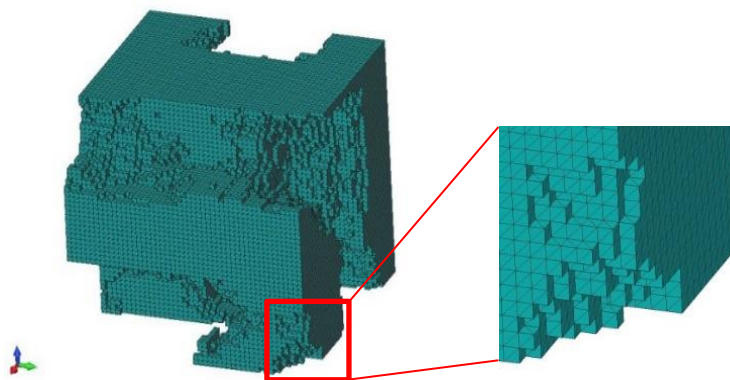
شکل ۱۲ الف) بخش دوم و ب) بخش سوم رابط کاربری گرافیکی

در این مقاله، برنامه برای یک ساختار با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ وکسل اجرا می شود. همان طور که در شکل ۱۲-الف مشخص است، پس از وارد کردن تصاویر به برنامه و اجرای آن، یک نمای گرافیکی از ساختار، تعداد خوشه ها و همچنین تعداد وکسل های خوشه فعال اصلی نمایش داده می شود. شکل ۱۳ برچسب گذاری خوشه ای مقطعی از ساختار را نشان می دهد. عدد ۲۳۶ به کل خوشه هایی اشاره می کند که در هنگام اجرای الگوریتم شناسایی می شوند؛ اما به دلیل کاهش خوشه ها برای موقعیت هایی مانند شکل ۶-ج و ۶-د در نهایت تنها ۱۰ خوشه باقی می ماند و همه ی خوشه های دیگر با این خوشه ها ادغام می شوند. بر اساس ابعاد ساختار مورد بررسی، در مجموع ۱۲۵۰۰۰ وکسل وجود دارد که بعد از اجرای برنامه مشخص می شود که خوشه ی فعال اصلی دارای ۷۳۳۶۳ وکسل متصل است که تقریباً تمام وکسل های فاز سیاه را تشکیل می دهند.



شکل ۱۳ برچسب گذاری خوشه ای برای مقطعی از ساختار

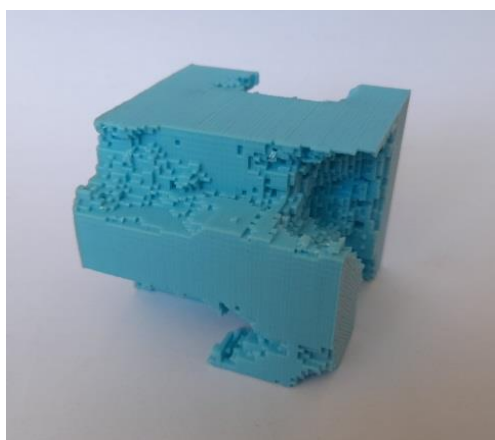
پس از یافتن و جداکردن خوشهٔ فعال اصلی، فرایند ساخت فایل استی‌ال آغاز می‌شود. این فرایند در بخش سوم رابط کاربری گرافیکی قابل دسترس است. در طول اجرای این فرایند، سطوح ساختار سالیید شناسایی شده و اطلاعات هندسی مربوط به شبکهٔ مثلث‌بندی در فایل استی‌ال ذخیره می‌گردد. برای تولید فایل استی‌ال از کدگذاری ASCII استفاده می‌شود. شکل ۱۴ نمایی سه‌بعدی از فایل خروجی برنامه را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی توانسته است کلیه اجزاء سطح ساختار را شناسایی نموده و به صورت فایل استی‌ال ذخیره و ارائه نماید.



شکل ۱۴ نمایش فایل استی‌ال به دست آمده از الگوریتم

پس از ایجاد فایل استی‌ال ساختار مورد بررسی، فایل در نرم‌افزار اسلایسر کورا^۱ اجرا و برای چاپ سه‌بعدی به صورت FDM آماده‌سازی می‌گردد. برای چاپ از دستگاه چاپگر سه‌بعدی مدل اسکورپیون-۵^۲ استفاده می‌شود. دقت پرینت ۰/۱ میلی‌متر بوده و تراکم داخلی قطعه ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. فیلامنت از جنس PLA با گرید A استفاده شد. شکل ۱۵ ساختار را در هنگام چاپ و پس از آن نمایش می‌دهد. ابعاد ساختار ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین هر وکسل یک میلی‌متر مکعب فضا اشغال می‌کند.

با مقایسه شکل‌های ۱۲-الف، ۱۴ و ۱۵-ب توانمندی و صحت روش پیشنهاد شده در این مقاله تایید می‌گردد. به این مفهوم که در شکل ۱۴، فایل استی‌ال شکل ۱۲-الف ارائه شده است و دقیقاً همین فایل، در شکل ۱۵-ب به صورت فیزیکی و نهایی پرینت شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۵ الف) پرینت سه‌بعدی ساختار (ب) مدل پرینت‌شده‌ی نهایی

¹ Qura

² Scorpion-5

از نظر مقایسه روش ارائه شده در این پژوهش با روش های ارائه شده توسط سایر پژوهشگران (به عنوان نمونه مرجع [۱۰])، می توان به ایجاد فایلی که قابلیت خواندن در کلیه دستگاه های پرینت را دارد اشاره نمود. به علاوه روش ارائه شده، قبل از ایجاد فایل اس تی ال، ابتدا نواحی ای که به هر دلیل از ساختار اصلی جدا افتاده اند و در پرینت مسئله ساز می شوند را شناسایی و حذف می کند. قابل ذکر است که روش ارائه شده در این مقاله برای ساختارهای وکسلی ارائه شده است به این معنی که الزاماً بردارهای نرمال سطوح، در راستای محورهای مختصات خواهند بود و سطح ایجاد شده نیز دقیقاً از ساختار اصلی تبعیت خواهد نمود که ممکن است مطابق با شکل ۱۴ و ۱۵-ب ناهمواری هایی داشته باشد. بعضی نرم افزارها نظیر شکل ۱۲-الف در نمایش، سطح ساختار را نرم و هموار می کنند اما تبدیل این سطوح به صورت فایل اس تی ال و نهایتاً پرینت آن ها نیاز به بررسی و تعمق بیشتر دارد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا یک روش کارآمد برای شناسایی خوشه های ساختارهای سه بعدی مبتنی بر وکسل که با استفاده از تصاویر دوبعدی، ایجاد می شوند، ارائه شد؛ سپس الگوریتمی برای ایجاد فایل اس تی ال ساختار، با کدگذاری ASCII و به صورت مستقیم ایجاد گردید. الگوریتم های معرفی شده در این مقاله توانست تمام مناطق متصل و بهم پیوسته در ساختار را شناسایی نموده، سپس خوشه اصلی را جداسازی کرده و فایل اس تی ال آن را ایجاد کند. الگوریتم های معرفی شده، در نرم افزار متلب برنامه نویسی و اجرا شد و برای استفاده عمومی و راحت تر، رابط کاربری گرافیکی طراحی گردید. الگوریتم ها و برنامه معرفی شده در این مقاله می تواند در علم مواد برای ایجاد ساختارهای سه بعدی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی دلخواه و همچنین در مهندسی پزشکی برای ایجاد مدل سه بعدی از تصاویر توموگرافی استفاده شود. برای تحقیقات آینده می توان به بهینه سازی الگوریتم ایجاد فایل اس تی ال پرداخت و افزودن امکاناتی مثل امکان خروجی گرفتن فایل اس تی ال از نوع باینری و همچنین امکان هموارسازی سطوح به رابط کاربری پیشنهاد می گردد.

References

- [1] Roppolo I, Caprioli M, Pirri CF, Magdassi S. 3D Printing of Self-Healing Materials. *Advanced Materials*. 2024 Mar;36(9):2305537. doi: 10.1002/adma.202305537
- [2] Abidaryan S, Barmouz M, Hedayati SK. Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jul 22;7(5):14-23. [In Persian]
- [3] Karakurt I, Lin L. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2020 Jun 1;28:134-43. doi: 10.1016/j.coche.2020.04.001
- [4] Gholizadeh Roshan A, Zolfaghari A, Shakeri M. Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):1-9. [In Persian]
- [5] Saraeian P, Shakouri E. Study on the effect of thickness of layers, temperature and speed of nozzle on circularity error and surface roughness of holes in parts produced during fused deposition modeling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Sep 22;7(7):38-50. [In Persian]
- [6] Bougdid Y, Sekkat Z. Voxels optimization in 3D laser nanoprinting. *Scientific Reports*. 2020 Jun 26;10(1):10409. doi: 10.1038/s41598-020-67184-2
- [7] Zohdi TI. Rapid voxel-based digital-computation for complex microstructured media. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019 Nov;26(5):1379-94. doi: 10.1007/s11831-018-9284-1
- [8] Duran AH, Duran MN, Masood I, Maciolek LM, Hussain H. The additional diagnostic value of the three-dimensional volume rendering imaging in routine radiology practice. *Cureus*. 2019 Sep;11(9). doi: 10.7759%2Fcureus.5579
- [9] Bader C, Kolb D, Weaver JC, Sharma S, Hosny A, Costa J, Oxman N. Making data matter: Voxel printing for the digital fabrication of data across scales and domains. *Science advances*. 2018 May 30;4(5):eaas8652. doi: 10.1126/sciadv.aas8652
- [10] Ghadai S, Jignasu A, Krishnamurthy A. Direct 3D printing of multi-level voxel models. *Additive Manufacturing*. 2021 Apr 1;40:101929. doi: 10.1016/j.addma.2021.101929
- [11] Xu Y, Tong X, Stilla U. Voxel-based representation of 3D point clouds: Methods, applications, and its potential use in the construction industry. *Automation in Construction*. 2021 Jun 1;126:103675. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103675

- [12] Chenyan L, Shikai J. Multi-attribute voxelization technology of AMF for 3D printing. In 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) 2019 Apr 12 (pp. 81-85). IEEE. doi: 10.1109/IEA.2019.8714990
- [13] Wang CS, Wang WH, Lin MC. STL rapid prototyping bio-CAD model for CT medical image segmentation. Computers in Industry. 2010 Apr 1;61(3):187-97. doi: 10.1016/j.compind.2009.09.005
- [14] Yin ZW. Direct generation of extended STL file from unorganized point data. Computer-Aided Design. 2011 Jun 1;43(6):699-706. doi: 10.1016/j.cad.2011.02.010
- [15] Hiller J, Lipson H. Design and analysis of digital materials for physical 3D voxel printing. Rapid Prototyping Journal. 2009 Mar 27;15(2):137-49. doi: 10.1108/13552540910943441
- [16] Aremu AO, Brennan-Craddock JP, Panesar A, Ashcroft IA, Hague RJ, Wildman RD, Tuck C. A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing. Additive Manufacturing. 2017 Jan 1;13:1-3. doi: 10.1016/j.addma.2016.10.006
- [17] Lv C, Lin W, Zhao B. Voxel structure-based mesh reconstruction from a 3D point cloud. IEEE Transactions on Multimedia. 2021 Apr 16;24:1815-29. doi: 10.1109/TMM.2021.3073265
- [18] Kaufman A, Cohen D, Yagel R. Volume graphics. Computer. 1993 Jul;26(7):51-64. doi: 10.1109/MC.1993.274942
- [19] Leary M, Mazur M, Watson M, Boileau E, Brandt M. Voxel-based support structures for additive manufacture of topologically optimal geometries. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019 Nov;105:1-26. doi: 10.1007/s00170-019-03964-z
- [20] Aleksandrov M, Zlatanova S, Heslop DJ. Voxelisation algorithms and data structures: a review. Sensors. 2021 Dec 9;21(24):8241. doi: 10.3390/s21248241
- [21] Patil S, Ravi B. Voxel-based representation, display and thickness analysis of intricate shapes. In Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD-CG'05) 2005 Dec 7 (pp. 6-pp). IEEE. doi: 10.1109/CAD-CG.2005.86
- [22] Wu X, Liu W, Wang T. Voxel-based model and its application in advanced manufacturing. In Fourth International Conference on Virtual Reality and Its Applications in Industry 2004 Mar 19 (Vol. 5444, pp. 383-388). SPIE. doi: 10.1117/12.561181
- [23] Torquato S, Stell G. Microstructure of two-phase random media. I. The n-point probability functions. The Journal of Chemical Physics. 1982 Aug 15;77(4):2071-7. doi: 10.1063/1.444011
- [24] Yeong CL, Torquato S. Reconstructing random media. Physical review E. 1998 Jan 1;57(1):495. doi: 10.1103/PhysRevE.57.495
- [25] Jiao Y, Stillinger FH, Torquato SA. A superior descriptor of random textures and its predictive capacity. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009 Oct 20;106(42):17634-9. doi: 10.1073/pnas.0905919106
- [26] Gonzalez RC. Digital image processing. Pearson education india; 2009.
- [27] Hasanabadi A, Baniassadi M, Abrinia K, Safdari M, Garmestani H. 3D microstructural reconstruction of heterogeneous materials from 2D cross sections: A modified phase-recovery algorithm. Computational Materials Science. 2016 Jan 1;111:107-15. doi: 10.1016/j.commatsci.2015.09.015
- [28] Hoshen J, Kopelman R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. Physical Review B. 1976 Oct 15;14(8):3438. doi: 10.1103/PhysRevB.14.3438
- [29] Hasanabadi A. Development of an algorithm for identifying active clusters in the microstructural design of materials. 10th International Conference on Materials Science & Metallurgical Engineering; 2021 Nov 16-17; Tehran, Iran.
- [30] Sun X, Ni Y, Liu C, Wang Z, Yin Y. A practical method for stability assessment of a damaged ship. Ocean Engineering. 2021 Feb 15;222:108594. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108594
- [31] Kamio T, Suzuki M, Asaumi R, Kawai T. DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. 3D printing in medicine. 2020 Dec;6:1-2. doi: 10.1186/s41205-020-00069-2
- [32] Gao S, Wu R, Wang X, Wang J, Li Q, Wang C, Tang X. A 3D model encryption scheme based on a cascaded chaotic system. Signal Processing. 2023 Jan 1;202:108745. doi: 10.1016/j.sigpro.2022.108745
- [33] Zhang Y, Shi X. Research on the three-dimensional displaying of STL ASCII and binary file. Advanced Materials Research. 2014 Jul 16;940:433-6. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.940.433
- [34] Wu T, Cheung EH. Enhanced stl. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006 Aug;29:1143-50. doi: 10.1007/s00170-005-0001-5