

# مروری بر الگوریتم‌های برش‌زنی مدل قطعه و تأثیر آن بر نمونه‌سازی سریع

محمد خوران<sup>۱</sup>، خلیل خلیلی<sup>۲</sup>، حسین امیرآبادی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲ عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، [kkhalili@birjand.ac.ir](mailto:kkhalili@birjand.ac.ir)

۳ عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

## چکیده

روش‌های نمونه‌سازی سریع به‌عنوان گروهی از فرایندهای تولید، عضو روش‌های مهم ساخت نمونه اولیه و گاه قطعه نهایی محسوب می‌شوند که مطالعه آنها با توجه به ماهیت هر یک از فرایندها امری ضروری به‌نظر می‌رسد. تمام فرایندهای نمونه‌سازی سریع بر پایه ایجاد مدل اولیه و برش‌زنی آن استوار است. برش‌زنی یا مستقیماً از مدل CAD صورت می‌گیرد و یا به فایل STL تبدیل شده و برش‌زنی انجام می‌شود. الگوریتم‌های برش‌زنی تأثیر مستقیمی بر هزینه و کیفیت قطعه تولیدی دارند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ضخامت لایه‌ها زمان تولید قطعات و هزینه آن کم می‌شود؛ از سوی دیگر، کیفیت قطعه تولیدی نیز کاسته خواهد شد. به این دلیل پژوهشگران این حوزه را بر آن داشته تا الگوریتم‌های متنوعی را برای برش قطعه نمونه‌سازی سریع گسترش دهند. در این مقاله به بررسی اثر روش‌های مختلف برش‌زنی قطعات (الگوریتم‌های برش‌زنی مدل CAD) پرداخته شده و مورد تحلیل و کنکاش قرار گرفته است.

## واژگان کلیدی

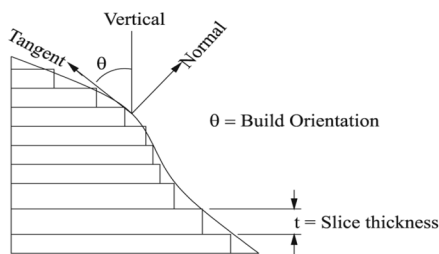
نمونه‌سازی سریع، الگوریتم برش‌زنی قطعات، مدل موزاییکی، روش ساخت افزایشی

### ۱. مقدمه

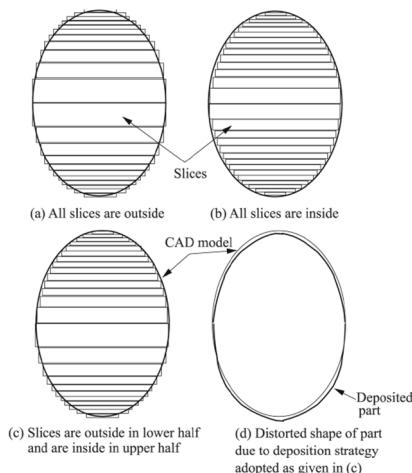
استفاده از آن، از فایل‌های سه‌بعدی نمونه واقعی ساخت. پرینترهای سه‌بعدی توانایی تولید انواع قطعات با شکل و زوایای مختلف را دارند. این نیاز در همه‌جا قابل لمس است. صنعت، پزشکی، آموزشی، خودروسازی، نظامی و هر کاری که نیاز به شبیه‌سازی، تولید ماکت و ساخت طرح اولیه دارد. با استفاده از پرینتر سه‌بعدی می‌توان فرایندهای زمان‌بر شبیه‌سازی و ساخت

امروزه مدل‌سازی سه‌بعدی در رشته‌های گوناگونی چون قطعه‌سازی، معماری، طراحی صنعتی، رباتیک، صنایع هوافضا و جزاین‌ها رایج است. این مدل‌سازی‌ها تا پیش از این به شکل تصاویر دوبعدی روی صفحه‌های نمایشگر یا روی کاغذ ارائه می‌شدند تا افراد با دیدن آنها درکی از آنچه طراحان در ذهنشان دارند به‌دست آورند. پرینتر سه‌بعدی وسیله‌ای است که می‌توان با

ذکر شده می‌توان دریافت که تمامی برش‌ها داخل یا خارج مدل CAD باشند. در روش محاطی همیشه قطعه ساخته شده کوچکتر از قطعه CAD است. مسئله پله‌ای شدن و خطای مرزی برای مهندسان مسائل مهمی هستند؛ زیرا کیفیت نهایی نمونه ساخته شده و عملکرد آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هزینه نمونه‌سازی رابطه مستقیمی با زمان تولید دارد. تناقض بین زمان تولید و کیفیت نهایی سطح، سبب پیشرفت الگوریتم‌های برش‌زنی متفاوتی شده است. در ابتدا برش‌زنی با ضخامت لایه‌های برابر مورد استفاده قرار می‌گرفت. برخی از پژوهشگران ضخامت برابر اما بررسی جهت بهترین زاویه قرارگیری قطعه و برش‌زنی آن را مورد مطالعه قرار دادند. بعدها برش‌زنی تطبیقی<sup>۷</sup>، که از ضخامت‌های برش متفاوت به جای ضخامت‌های برش یکسان استفاده می‌کند، مورد استفاده قرار گرفت.



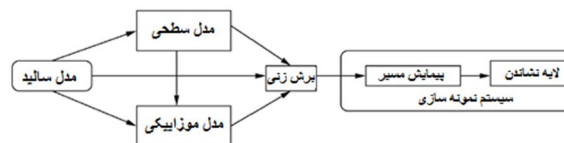
شکل ۲. اثر پله‌ای شدن



شکل ۳. روش ساخت محیطی و محاطی [۴]

ضخامت اعمالی در این روش بسته به شکل قطعه و مشخصات دستگاه متفاوت است. همان‌طور که مشخص است، برش‌زنی تطبیقی روش بسیار مناسبی است که نیازمند الگوریتم پیچیده و هوشمندتر نسبت به برش‌زنی با ضخامت ثابت دارد، که با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش، محققان روش‌های مختلفی

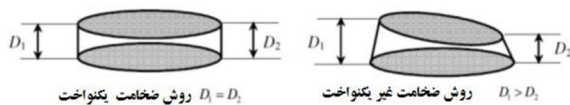
ماکت قطعات را تسریع بخشد. هرچند امروزه پرینتر سه‌بعدی گام در فضای تولید قطعه نهایی گذاشته است. طرح اولیه پرینترهای سه‌بعدی در دهه ۸۰ م با نام نمونه‌سازی سریع ارائه و اولین نمونه از آن توسط چارلز هال ساخته و به نام این دانشمند ثبت شد. تمام فرایندهای نمونه‌سازی سریع بر پایه ایجاد مدل CAD، برش‌زنی، ایجاد مسیر حرکت لیزر یا مسیر نشانیدن مواد (به‌طور مثال فرایند (FDM)<sup>۱</sup>، نشانیدن لایه به لایه و در نهایت عملیات پس‌پردازش<sup>۲</sup> می‌باشد. در این فرایندها زمان تولید قطعه یا ایجاد تغییرات در مدل قطعه‌کار پایین است. تقریباً برای تمامی فرایندهای RP<sup>۳</sup>، مدل قطعه تولیدی در محیط CAD ایجاد شده و قبل از انتقال اطلاعات به ماشین نمونه‌سازی برش‌زنی می‌شوند (شکل ۱). برش مدل قطعه می‌تواند مستقیماً روی مدل CAD یا مدل سطحی موزاییکی شده انجام شود. در برش‌زنی مجموعه‌ای از صفحات افقی با مدل قطعه تقاطع داده می‌شود که نتیجه آن یک منحنی یا چندضلعی بسته است. فضای بین دو صفحه متوالی به‌عنوان یک برش در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. رویه برش‌زنی قطعات [۴]

مدل موزاییکی (مدل STL) به‌عنوان مدل استاندارد فناوری RP شناخته شده است. البته این مدل به‌علت تقریب درجه یک منحنی سطح خطا نیز دارد. حداکثر انحراف بین سطح اصلی مدل CAD و سطح موزاییکی شده، خطای تتری<sup>۴</sup> گفته می‌شود. هیچ اطلاعات توپولوژی مربوط به مدل CAD به‌جز لیست مثلث‌ها و بردار نرمال آنها وجود ندارد. مدل موزاییکی شده، چندین مزیت از جمله انجام الگوریتم برش ساده‌تر، توانایی جهت‌یابی مدل و اضافه کردن ساده‌تر تکیه‌گاه را دارد. لایه‌نشینی قطعات منجر به پدیده پله‌ای شدن در قطعات RP می‌شود که هیچ‌گاه نمی‌توان آن را کاملاً حذف کرد. انتهای برش‌ها می‌تواند به‌طور کامل داخل محدوده قطعه کار باشد (محاطی) و یا به‌طور کامل خارج از منحنی CAD (محیطی) باشد. تحت شرایط مخصوص، لبه‌های برشی می‌تواند در قسمت به‌خصوصی بیرون مدل CAD و در قسمت دیگری داخل مدل CAD باشند. این عمل باعث واپیچش<sup>۵</sup> قطعه می‌شود که خطای مرزی<sup>۶</sup> نامیده می‌شود [۴]. با توجه به خطای

می‌گردد. هوپ در تحقیق اولیه خود از یک ورق پلی استایرن به ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان ماده و دستگاه واترجت استفاده کرد و با چسباندن لایه‌لایه مواد و برش آنها قطعه را تولید نمود. این روش محدود به چند فرایند نمونه‌سازی است و نمی‌توان ایده وی را برای تمام فرایندها استفاده نمود. به‌طور مثال قابلیت به‌کارگیری این ایده در فرایندهای  $DMD^A$ ،  $UC^A$  و  $LOM^1$  وجود دارد. در ادامه مسیر توسعه و بهبود روش‌های نمونه‌سازی لایه‌ای اشیاء محققانی پیشنهاد می‌کردند که برای بهبود کیفیت ساخت قطعاتی که دارای انحنا می‌باشند از روش لایه‌های غیر کنواخت استفاده گردد. به این معنا که در قطعاتی که هندسه شکل اجازه می‌دهد، به‌جای استفاده از لایه‌های موازی از لایه‌هایی استفاده شود که ضخامت متغیر دارند.



شکل ۷. وضعیت لایه‌ها در حالت ضخامت متغیر [۳]

اخیراً نیز شکل واقعی پروفایل به‌عنوان مثال پارابولیک برای فرایند FDM مد نظر قرار گرفته شده است [۱۴]. دستگاه‌های RP محدودکننده حداقل و حداکثر ضخامت لایه می‌باشند؛ چون بیشتر دستگاه‌ها توانایی تولید ضخامت ثابت دارند و برای ضخامت‌های بیشتر نیاز به تغییر در مشخصات سخت‌افزار ماشین نمونه‌سازی است.

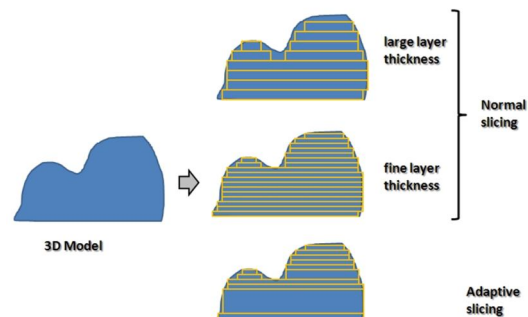
## ۲. برش‌زنی مدل موزاییکی شده

در فرایندهای مختلف برش‌زنی تطبیقی، ضخامت برش توسط کاربر با در نظر گرفتن حداکثر ارتفاع هلال<sup>۱۱</sup> مجاز یا مقدار زبری سطح Ra مجاز انتخاب می‌شود. اولین بار دولنس در سال ۱۹۹۴ م مفهوم حداکثر ارتفاع هلال مجاز را تعریف کرد و پس از وی محققان زیادی از ایده وی استفاده نمودند. ارتفاع هلال پارامتر استاندارد در طراحی یا روش ساخت به‌منظور مشخص کردن کیفیت سطح تمام شده نمی‌باشد. بدین منظور مفهوم حداکثر Ra مجاز توسط پانندی در سال ۲۰۰۳ م معرفی شد.

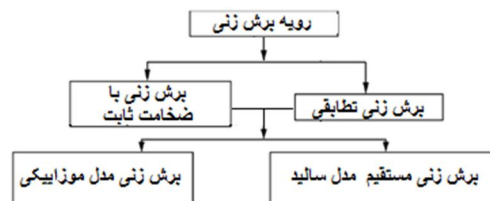
### ۲-۱. ایده ارتفاع هلال

در این ایده  $t$  ضخامت لایه و  $C$  مقدار ارتفاع هلال و  $C_{max}$  حداکثر ارتفاع مجاز می‌باشد. نرمال در هر نقطه‌ای مانند  $P$ ، بوسیله

برای بررسی شرایط قطعه داشته‌اند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود (شکل ۵). بیشتر محققان از مقاطع مستطیلی برای برش استفاده کرده‌اند؛ یعنی قطعه را با لایه‌های مستطیلی برش زده‌اند. محققان اندکی نیز از مقاطع دوزنقه‌ای یا شیب‌دار استفاده کرده‌اند. هوپ پیشنهاد کرد که به‌جای دیدگاه‌های رایج از روش سطح مایل استفاده شود، به این طریق که در میانه هر لایه خطی روی مدل CAD قطعه مماس گردد تا خطای حاصل از تقریب کاهش یابد. این نخستین بار بود که استفاده از تقریب خطی درجه یک به‌جای تقریب خطی درجه صفر پیشنهاد می‌شد. این روش کیفیت سطح را بهبود بخشیده و از اثر نامطلوب پله‌ای می‌کاهد [۲۲]. اما در مرحله اجرا و در واقعیت مشکلاتی به‌وجود می‌آید که در مرحله نخست مشهود نیست.



شکل ۴. برش‌زنی تطبیقی



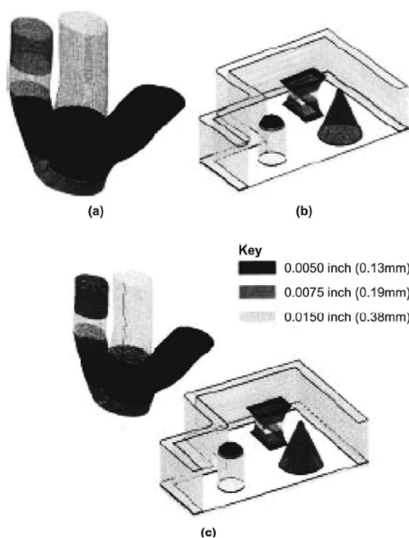
شکل ۵. انواع روش برش‌زنی قطعات [۴]



شکل ۶. روش ساخت انطباق سطح مایل

اولین مشکل آن استفاده از دستگاهی که در قسمت کله‌گی خود دارای چند درجه آزادی برای ابزار باشد تا در هر لایه بتواند شیب و زاویه لازم را تأمین کند. این موضوع سبب افزایش هزینه‌های ساخت دستگاه و افزوده شدن بر پیچیدگی‌های دستگاه

در نهایت هر زیر برش به طور مستقل براساس شیب عمودی سطح خودش به لایه‌های نازکتری تقسیم می‌شود [۹]. برش‌زنی تطبیقی موضعی نتیجه مناسبی روی تورق داشته است. شکل ۹ نمونه‌ای از قطعه برش داده شده توسط این رویه آورده شده است. شکل a یک قطعه دارای منحنی، شکل b یک قطعه دارای چندین شکل هندسی و شکل c نیز ترکیب این دو شکل می‌باشد. با استفاده از این الگوریتم زمان تولید ۷۳، ۴۲ و ۵۵ درصد به ترتیب برای قطعات a، b و c کاهش یافته است [۱۰].



شکل ۹. برش‌زنی تطبیقی موضعی [۹-۱۰]

#### ۲-۴. الگوریتم بیرون دقیق، داخل سریع

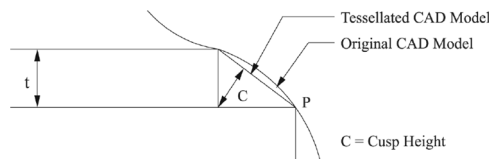
در این روش لایه خارجی نازک، دقیق و منظم تولید می‌گردد در حالی که لایه داخلی ضخیم و عریض ساخته می‌شود. لایه‌های داخلی چند برابر لایه‌های خارجی ضخامت دارند. ابتدا لایه بیرونی با ضخامت کم سپس لایه داخلی به‌عنوان پرکننده با ضخامت زیاد ساخته می‌شود. این روش زمان تولید را ۵۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌دهد [۱۱]. تا تا نشان داد که بهبود نرم‌افزارهای برش‌زنی تأثیر زیادی بر بهبود فرایند LM<sup>۲</sup> دارد. آنها چهار نکته را در بهبود روش برش‌زنی در نظر گرفتند [۱۲].

#### ۲-۵. ارتفاع هلال غیریکنواخت

اغلب الگوریتم‌های برشی تطبیقی، حداکثر ارتفاع هلال مجاز را در نظر می‌گیرند، که این فرض برای کل قطعه اعمال می‌شود. با توجه به کاربرد قطعات، در تمامی محل‌ها نیاز به ارتفاع هلال یکسان نیست. تعدادی از سطوح نمونه نیاز دارند که صاف باشند (صیقلی باشد)، در حالی که تعدادی از سطوح دیگر نیاز کمتری به

به‌دست می‌آید. بردار ارتفاع هلال متناظر  $N=(N_x \ N_y \ N_z)$  است و زمانی که  $|C| = c \leq C_{max}$  باشد. مقدار ضخامت لایه  $t$  به‌وسیله معادله ۱ به‌دست می‌آید [۷].

$$t = \frac{C_{max}}{N_z}, \quad N_z \neq 0 \quad (1)$$



شکل ۸. ارتفاع هلال

اگر مقدار  $t$  در بازه  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$  باشد، مناسب است در غیر این صورت  $t=t_{min}$  است اگر  $t < t_{min}$  و  $t=t_{max}$  اگر  $t > t_{max}$  است.

#### ۲-۲. بهسازی یکنواخت قدم به قدم

برش‌زنی تطبیقی با استفاده از بهسازی یکنواخت قدم به قدم توسط سابورین ارائه شده است [۸]. این روش از مفهوم ارتفاع هلال، که در بحث قبل به آن پرداخته شد، استفاده می‌کند. در این روش مدل موزاییکی شده به‌صورت یکنواخت با حداکثر ضخامت برش داده می‌شود. سپس لایه‌های که ارتفاع هلال (مربوط به شرط قبلی) را ارضاع نمی‌کند به ضخامت‌های یکنواخت و ریزتر تقسیم می‌شود. میزان ضخامت از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{slab} = \text{int} \left[ \frac{t_{max}}{C_{max}} \max \{ N_{z \text{ bottom}}, N_{z \text{ top}} \} \right]$$

$$\alpha_{slab} \in [1, \alpha_{max}], \alpha_{slab} = \text{int} \left( \frac{t_{max}}{t_{min}} \right) \quad (2)$$

$$t = \frac{t_{maz}}{\alpha_{slab}}$$

#### ۲-۳. برش‌زنی تطبیقی موضعی

همانند روش قبل این روش نیز بر پایه استفاده از مفهوم ارتفاع هلال بنا شده است. در این روش ابتدا محل‌های مخصوص مشخص می‌شوند و سپس برش‌زنی در هر کدام از آنها جدای از محل‌های دیگر صورت می‌گیرد. اغلب دیده می‌شود که قسمت‌های با ارتفاع برابر و هندسه متفاوت به‌منظور ارضاع تفرانس، ضخامت‌های متفاوتی از یکدیگر دارند. ابتدا قطعه با حداکثر ضخامت ممکن برش داده می‌شود. کانتورهای ایجادشده متعلق به برش‌های بالا و پایین قطعات با استفاده از اطلاعات توپولوژیکی تطابق داده می‌شوند و تعدادی زیر برش ایجاد می‌کنند.

صافی دارد. این روش از مدل موزاییکی شده به عنوان ورودی استفاده می‌کند، لبه‌ها به وسیله الگوریتم لبه‌یابی پیدا شده و گروه‌بندی سطوح انجام می‌شود [۱۳].

## ۲-۶. در نظر گرفتن لبه ساخته شده پارابولیک

تلاش‌هایی به منظور پیشرفت دادن روش برش‌زنی تطبیقی برای مدل موزاییکی شده صورت گرفته است و معمولاً پروفیل برش را مستطیلی انتخاب کرده‌اند. اخیراً الگوریتم‌های برش براساس پروفایل لبه واقعی ارائه شده است. در شرایط واقعی نیز پروفایل لبه ایجاد شده توسط فرایند FDM به صورت پارابولیک است و مستطیلی نمی‌باشد. در این الگوریتم مقدار Ra به عنوان یک پارامتر مشخص می‌شود. مزیت اصلی استفاده کردن از Ra استاندارد بودن آن است. مقدار زبری سطح بستگی به ضخامت لایه و جهت ساخت  $\theta$  دارد. مثلاً رابطه بین مقدار زبری سطح و ضخامت به صورت ۳ می‌باشد [۱۴].

$$t(mm) = Ra(\mu m) \cos \theta / 70.82 \quad (3)$$

## ۲-۷. روش Ra متغیر

در این الگوریتم از مدل STL استفاده شده است، اما به جای محاسبه ارتفاع هلال، Ra که قبلاً علت آن شرح داده شد، محاسبه می‌شود و ملاک برش لایه‌ها قرار می‌گیرد. شالندار و همکاران این الگوریتم را برای فرایند SLS به کار گرفت. معمولاً زبری سطح در جهات مختلف متفاوت است. وی میزان زبری سطح را از بالا به پایین قطعه متفاوت با پایین به بالا دانست و برای هر یک فرمولی آماری استخراج شده از مقالات پیشین را بکار گرفت [۱۵]. در فرمول‌های زیر  $l_t$  ضخامت لایه، P قدرت لیزر برحسب وات است.

$$Ra_{up} = -2.04067 - 0.22\alpha + 0.06722l_t - 0.00136\alpha^2 \quad (4)$$

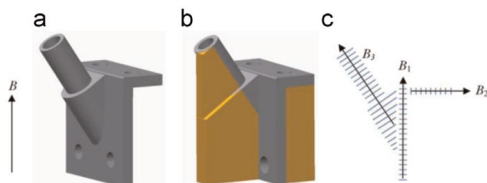
$$Ra_{down} = 185 - 9.52P - 0.834\alpha - 0.157l_t + 0.15P^2 - 0.00099\alpha^2 + 0.0058 \alpha \cdot l_t \quad (5)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \right) \quad (6)$$

## ۲-۸. روش برش چندجهته

یکی از قسمت‌های زمان‌بر در نمونه‌سازی سریع بحث ساخت ساپورت است. اگر به طریقی این موضوع مرتفع شود، زمان تولید کمتر خواهد شد. محققانی به این موضوع توجه کرده و مقالاتی

منتشر نموده‌اند. دینگ و لینگ‌پنگ به بررسی برش‌زنی در جهت محورهای مختلف یک جسم پرداخته‌اند؛ به گونه‌ای که یک جسم از چند جهت برش می‌خورد [۱۶ و ۲۹]. در شکل ۱۰ می‌توان دید، اگر جسم به صورت معمولی برش بخورد (در یک جهت) نیاز به ساپورت دارد (شکل b)؛ در صورتی که اگر این الگوریتم استفاده گردد دیگر نیازی به ساخت ساپورت وجود ندارد بلکه خود قطعه اصلی به عنوان ساپورت قسمت‌های بعدی عمل می‌کند (شکل c). این ایده نیازمند دستگاه و تجهیزات با اتوماسیون بالاست. این روش برای اکثر روش‌های نمونه‌سازی سریع که نیاز به ساخت ساپورت دارند قابل اجراست. باید در نظر داشت دستگاهی که از این الگوریتم استفاده می‌کند، باید دارای میزی باشد که نسبت به محورها زاویه بگیرد.



شکل ۱۰. روش حداقل ساپورت [۱۶]

## ۳. برش مستقیم مدل CAD

استفاده از مدل موزاییکی شده علاوه بر مزایا، معایبی نیز دارد. فایل STL معمولاً دارای حجم بالاتری نسبت به مدل واقعی است. مدل موزاییکی شده معمولاً در هنگام تبدیل از مدل CAD دچار مشکلات و نقایصی می‌شود. بعضی از مواقع برگشت به مدل CAD از مدل STL امکان‌پذیر نیست و معمولاً برش مدل‌های بزرگ STL زمان‌بر است. خطای واقعی بیشتر از خطای وتری است. برش‌زنی مستقیم برای قطعات که دارای شکل‌های هندسی متقارن مفید است و در مجموع برش‌زنی مستقیم سبب کاهش سایز فایل، دقت بالاتر مدل، کاهش پروسه RP و عدم نیاز به نرم‌افزارهای تصحیح خطای فایل STL می‌شود. هرچند محدودیت‌های چون سخت بودن ایجاد ساپورت برای قطعه، توانایی تغییر جهت قطعه کم و کم بودن دانش نسبت به روش برش‌زنی STL را دارد.

## ۳-۱. روش انحراف سطح

برش‌زنی مستقیم مدل CAD با ضخامت‌های برش یکسان، اولین بار توسط جیمیسون ارائه شد. این الگوریتم ابتدا توسط پیدا کردن حداکثر و حداقل ارتفاع قطعه شروع می‌شود. جهت برش‌زنی در

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \{k_n(u, v)\} \\ & \text{subject to:} \end{aligned} \quad (9)$$

$$z(u, v) = \text{constant}$$

۲. روش حداقل ضخامت لایه

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \{t(u, v)\} \\ & \text{subject to:} \end{aligned} \quad (10)$$

$$z(u, v) = \text{constant}$$

روش حداقل ضخامت لایه نتایج بهتری و بازده بالاتری نسبت به روش انحناى حداقل دارد. برش‌زنى در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول، مدل به چندین بخش مجزا تقسیم‌بندی می‌شود و مرحله دوم این بخش‌های جدا شده براساس ارتفاع هلال برش‌زده می‌شوند. برش تطبیقی یک قطعه دلخواه، که دارای سطوح مرزی زیادی است، براساس شرایط هندسی صورت می‌پذیرد. این سطوح سپس به سطوح اسپیلاین پارامتریک تبدیل شده و سپس برش‌زنى روی آنها انجام می‌شود.

### ۳-۳. در نظر گرفتن شیب سطح

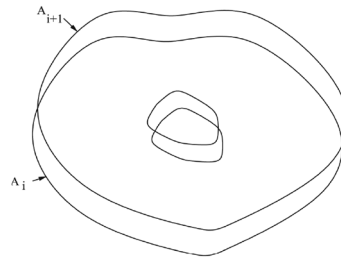
در اکثر روش‌های بالا، لبه‌های برش‌ها مستطیل فرض شده است. اولین بار هوپ از لبه شیب‌دار به جای مستطیل برای تقریب بهتر سطح قطعات استفاده کرد. مزیت اصلی این روش به دست آوردن کیفیت سطح بهتر و زمان ساخت کمتر در حالی که از لایه‌های ضخیم استفاده می‌شود، می‌باشد. در این روش از فرمت IGES<sup>۱۳</sup> جهت تعریف قطعه استفاده می‌شود. هوپ نرم‌افزاری را توسعه داد که فایل‌های IGES (استاندارد ایالات متحده ۱۹۸۸) را برای تعریف مدل به کار می‌گیرد؛ زیرا این فرمت قابلیت ارائه سطوح NURBS<sup>۱۴</sup> را دارد و می‌توان از این تعریف سطح به‌طور مستقیم به ردیابی خطوط و انجام محاسبات شیب پرداخت. آنها مدل را به وسیله ردیابی سطح کانتورها و محاسبه جهت برش در تعدادی نقاط که کاربر مشخص می‌کند، برش زدند. این نقاط و بردار برش متناظر جهت ایجاد کد دستگاه CNC مورد نظر، به‌منظور ماشینکاری لایه‌ها استفاده می‌شود. شکل ۱۳ خطای بین مدل CAD و لایه برش‌خورده را نمایش می‌دهد [۲۲].

دو نوع خطا به اسم ارتفاع هلال و حداکثر اختلاف در صفحه لایه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. معادلات این دو خطا یعنی حداکثر ارتفاع هلال ( $\Delta$ ) و حداکثر اختلاف در لایه ( $\epsilon$ ) در ادامه آورده شده است.

امتداد  $Z$  در نظر گرفته می‌شود. روش برش‌زنى تطبیقی بهینه براساس محدودیت انحرف سطح انتخاب می‌شود. انحرف سطح به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۸-۱۹].

$$\sigma = \left| \frac{A_{i+1} - A_i}{A_i} \right| \leq \Delta \quad (7)$$

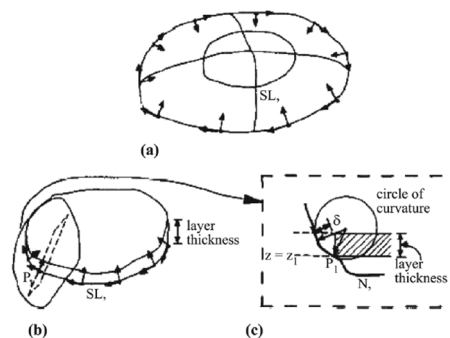
به‌طوری که  $A_{i+1}$  و  $A_i$  سطح دوتکه برش‌خورده پشت سر هم است. مقدار  $\Delta$  نیز ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱. روش انحرف سطح [۱۸]

### ۳-۲. روش برش‌زنى دقیق

اثر پله‌ای و مرزی بر کیفیت و دقت سطح نهایی تأثیر دارد. انحناى نرمال عمودی و بردار نرمال در هر نقطه  $P$  در مدل CAD محاسبه می‌شود. بخش نرمال در نقطه  $P$  به‌طور تقریبی به‌صورت یک دایره در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۲۱].



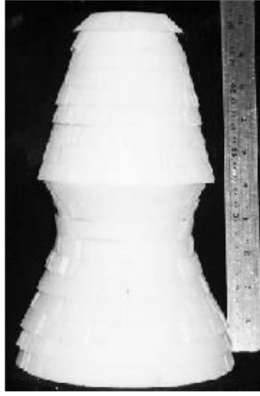
شکل ۱۲. انحناى نرمال عموی [۲۱]

ضخامت برش در هر نقطه  $P$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

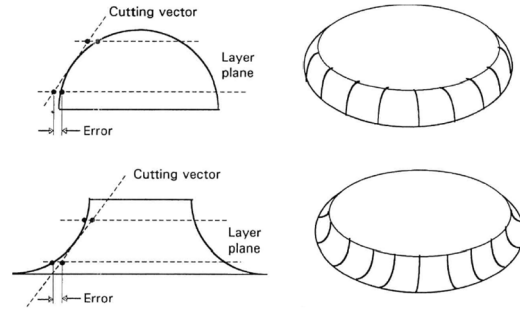
$$t = f(\delta, \theta, \rho) \quad (8)$$

که  $\rho$  انحنا منحنی عمودی،  $\theta$  زاویه بین محور افقی و نرمال و  $\Delta$  ارتفاع هلال مجاز است. دو روش برای محاسبه ضخامت برش استفاده می‌شود.

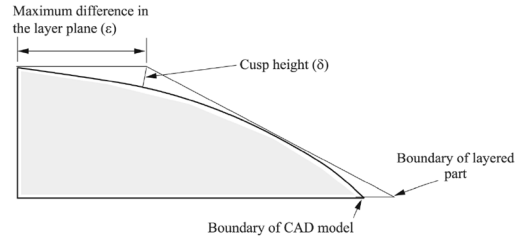
۱. روش انحناى حداکثر



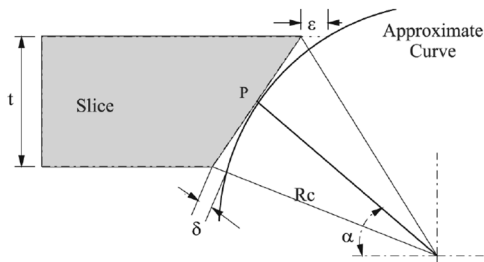
شکل ۱۶. قطعه ساخت شده از ۱۹ لایه ۱۰ میلی متری [۲۲]



شکل ۱۳. روش در نظر گرفتن شیب سطح [۲۲]



شکل ۱۴. خطا در منحنی درجه یک [۲۳]



شکل ۱۵. مشخصات هندسی شیب سطح [۲۳]

$$\Delta = \left[ \left( \frac{t}{2 \cos \alpha} \right)^2 + R_c^2 \right]^{\frac{1}{2}} - R_c \quad (11)$$

$$\varepsilon = (\Delta + R_c) \cos \varnothing - \left[ \{(\Delta + R_c) \cos \varnothing\}^2 - \left( \frac{t}{2 \cos \alpha} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\varnothing = \alpha \mp \arctan \left\{ \frac{t}{2R_c \cos \alpha} \right\}$$

به طوری که شعاع منحنی،  $t$  ضخامت لایه و  $\alpha$  زاویه بین افق و نرمال است. کاربرد در انتخاب هر کدام از دو معیار بالا مختار است. در این الگوریتم ماژول برش انجام می‌شود و کد CNC ماشینکاری آنها تولید می‌شود. این لایه‌ها به هم چسبانده می‌شود تا قطعه مورد نظر شکل گیرد. وی این روش را برای تولید قطعات با حجم بیشتر از یک متر مکعب بسیار مفید دانست، اما نیازمند یک ماشین ۴ تا ۵ محوره برای برش یا شکل‌دهی است. شکل ۱۶ نمونه ساخته شده با این الگوریتم را نشان می‌دهد.

### ۳-۴. برش‌زنی تطبیقی بر اساس منطقه

این الگوریتم روش بیرون دقیق، داخل سریع که قبلاً بحث شد می‌باشد. تفاوت بین برش‌زنی تطبیقی سنتی و برش‌زنی تطبیقی بر اساس منطقه در شکل ۱۷ نمایش داده شده است [۲۶].

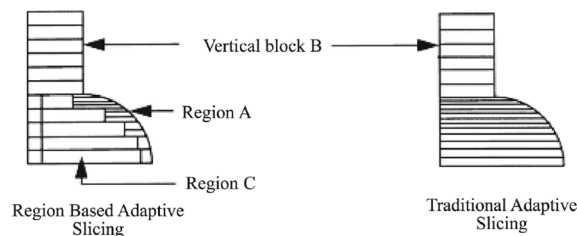
### ۳-۵. برش‌زنی تطبیقی و هاشورزنی انتخابی

این روش به وسیله برش‌زدن تطبیقی غیریکنواخت سطوح B\_Spline صورت گرفت. ابتدای به امر تعدادی زیادی از نقاط موثر سطح مشخص می‌گردید. مدل CAD در جهت  $z$  به چندین قسمت تقسیم می‌شود تا شکل‌های هندسی با شیب‌های متفاوت از هم جدا شوند. این الگوریتم از رویه برش قطعه الگوریتم برش‌زنی دقیق استفاده می‌کند. در انتها مختصات دور تا دور کانتور را محاسبه و یک کانتور جدید در داخل کانتور قبلی با افست مشخص ایجاد می‌کند. حد فاصل کانتور پوسته و کانتور داخلی برش‌های ریز می‌خورد و داخل مرز کانتور داخلی می‌تواند هر نوع برشی خورده شود که معمولاً حداکثر ضخامت را در نظر می‌گیرند. این ایده باعث کیفیت سطح خارجی خوب و زمان تولید کم می‌شود [۲۷].

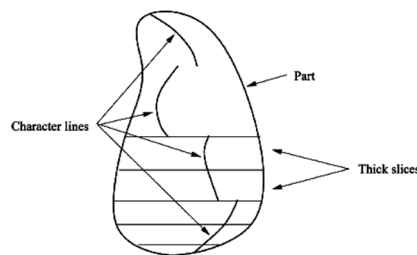
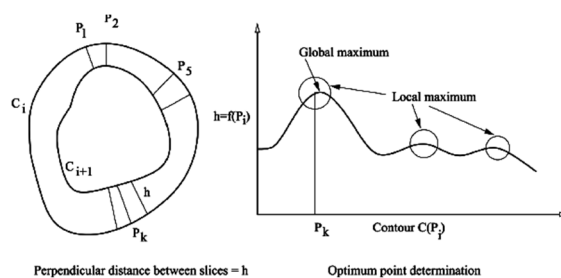
### ۳-۶. بهینه‌سازی با نمونه‌گیری نقاط

این روش، دو روش برش‌زنی مربوط به سطوح با فرم آزاد و شکل‌های چندوجهی را با هم ترکیب کرده است. در این روش در نقاط خاص کانتورهای دو برش متوالی بر روی صفحه  $x-y$  تصویر شده است. به جای کاهش ضخامت برش‌ها، در این روش فاصله عمودی بین دو نقطه متوالی در صفحه  $x-y$  را کاهش می‌دهند. معمولاً حد بهینه‌ای برای این منظور انتخاب می‌کنند که متوسط فاصله می‌باشد [۲۸].

متفاوتی در اجرای این الگوریتم‌ها داشته‌اند و هدف آنها کاهش زمان تولید (کاهش هزینه) و بهبود کیفیت سطح بوده است. در انتخاب ضخامت برش باید به این نکته توجه داشته که افزایش ضخامت لایه‌ها زمان تولید قطعات و هزینه آن را کاهش می‌دهد، در صورتی که کیفیت محصول تولیدی که پارامتر مهم و قابل اهمیتی می‌باشد، کاهش خواهد یافت. در ابتدای معرفی فرایند RP، کل قطعه با ضخامت ثابت برش داده می‌شد، در صورتی که به علت متفاوت بودن زاویا و شکل‌های یک محصول و مقاطع مختلف، در بعضی نقاط ضخامت بیشتر و در نقاطی دیگر ضخامت کمتر نیاز است. به همین دلیل بعدها برش‌زنی تطبیقی معرفی گردید که در یک قطعه بسته به شیب سطح ضخامت‌های متفاوتی زده می‌شود، لذا زمان تولید کاهش داده خواهد شد. ملاک‌های مختلفی برای یافتن ضخامت برش مناسب بر پایه برش‌زنی تطبیقی چون حداکثر ارتفاع هلال، زبری سطح Ra، انحراف سطح، شیب سطح توسط پژوهشگران معرفی شد. بر پایه این موارد الگوریتم‌های بیشتری ابداع و به کار گرفته شد. انتخاب معیار Ra به جای ارتفاع هلال به علت استاندارد بودن در علم مکانیک بسیار مناسب‌تر به نظر می‌رسد. استفاده از ضخامت غیریکنواخت در یک لایه و نیز استفاده از شیب درجه یک تلاش‌های دیگر محققان در بهبود عملکرد الگوریتم‌های برش‌زنی بوده است که در بعضی از فرایندهای RP بسیار کارا بوده است. از سوی دیگر با پیشرفت سیستم‌های کامپیوتری و نرم‌افزاری به کارگیری مدل اصلی CAD به جای استفاده از فایل STL، به علت عدم وجود خطاهای وتری مناسب‌تر است. خلاصه و مقایسه‌ای از انواع الگوریتم‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱۷. برش‌زنی تطبیقی براساس منطقه [۲۶]



شکل ۱۸. حداقل فاصله کانتورهای متوالی [۲۸]

#### ۴. نتیجه گیری

برای تولید قطعات به روش RP، مدل ایجادشده ابتدا باید توسط الگوریتم‌های برش‌زنی به ضخامت‌های کوچک برش داده شود سپس مشخصات فرایند به دستگاه نمونه‌سازی ارسال گردد. برش‌زنی می‌تواند مستقیماً روی مدل CAD و یا مدل سطحی موزاییکی شده (STL) انجام گیرد. محققان مختلفی ایده‌های

جدول ۱. مقایسه الگوریتم‌های مختلف

انواع روش	زیرگروه	توضیحات
ساده	زیرگروهی وجود ندارد	- قطعه به صورت یکنواخت با ضخامت ثابت برش می‌خورد.
تطابق	ارتفاع هلال	- از ارتفاع هلال یکنواخت برای کل قطعه استفاده می‌کند. - براساس بردار نرمال هر نقطه ضخامت برش محاسبه می‌شود.
	بهسازی قدم به قدم	- از ارتفاع هلال یکنواخت برای برش کل قطعه استفاده می‌کند. - قطعه به صورت یکنواخت برش می‌خورد و در صورت نیاز یک یا چند ضخامت ریزتر می‌شود. - زمان ساخت و محاسبات نسبت به روش ارتفاع هلال کمتر
	مدل موزاییکی	- از ارتفاع هلال یکنواخت برای برش کل قطعه استفاده می‌کند. - قطعه بصورت یکنواخت برش می‌خورد و در صورت نیاز یک یا چند ضخامت ریزتر می‌شود. - باتوجه به مشخصات هندسی و توپوگرافی هر قسمت قطعه، بصورت جدای از هم موارد بالا برای آن اجرا می‌شود.
	بیرون دقیق، داخل سریع	- سطح خارجی با ضخامت کمتر و سطح داخلی با ضخامت بالاتر ساخته می‌شود.



انواع روش	زیرگروه	توضیحات
مدل CAD	ارتفاع هلال غیریکنواخت	- سطح خارجی دارای کیفیت بالا و سطح داخلی دارای کیفیت پایین - کاهش زمان تولید به میزان ۵۰ تا ۸۰ درصد.
		- سطح خارجی با توجه به کیفیت سطح مورد نیاز برش می‌خورد. - از ارتفاع هلال غیریکنواخت استفاده می‌کند.
	لبه پارابولیک	- عدم استفاده از لبه مستطیلی همانند روش‌های بالا - کیفیت سطح بالاتر نسبت به روش‌های بالا - از Ra مورد نیاز برای محاسبه ضخامت استفاده می‌کند.
		- از مقدار عدد زبری متفاوت برای هر قسمت از قطعه استفاده می‌شود. - کیفیت سطح در جهات مختلف محاسبه شد.
	برش زنی چند جهته	- برش با توجه به جهت محور قطعه زده می‌شود. - کیفیت سطح بالاتر - زمان تولید پایین‌تر - نیاز به تجهیزات گران قیمت‌تر
		- میزان اختلاف سطح، بالا و پایین یک لایه برش ملاک این روش است. - اولین روش برش مستقیم مدل CAD است.
	برش زنی دقیق	- از دو روش انحنای حداکثر و حداقل ضخامت لایه استفاده می‌کند. - ضخامت هر قسمت تابعی از شعاع منحنی عمودی، زاویه بین محور عمودی و نرمال، ارتفاع هلال مجاز
		- دارای کیفیت سطح بالاتر - در نظر گرفتن شیب سطح و عدم استفاده از لبه مستطیلی - استفاده از فرمت IGES - نیاز به دستگاه ۴ یا ۵ محوره
	تطبیقی براساس منطقه	- سطح خارجی با ضخامت کمتر و سطح داخلی با ضخامت بالاتر ساخته می‌شود. - سطح خارجی دارای کیفیت بالا و سطح داخلی دارای کیفیت پایین - زمان تولید کاهش قابل توجهی می‌یابد. - همانند روش بیرون دقیق - داخل سریع است
		- برش زدن تطبیقی غیریکنواخت سطوح B_Spline است. - همانند روش تطبیقی بر اساس منطقه است. - سطح خارجی شناخته و یک کانتور داخلی نسبت به آن ترسیم شده، فضای بین این دو کانتور با کمترین ضخامت برش می‌خورد.
نمونه‌گیری نقاط	- ترکیب دو روش برش زنی مربوط به سطوح با فرم آزاد و اشکال چند وجهی - فاصله عمودی بین دو نقطه در حالت دو بعدی ملاک عمل خواهد بود.	

## ۵. مآخذ

- [۱] ع. سیم‌چی، ا. توکلی، نمونه‌سازی و ابزارسازی سریع، انتشارات وزارت صنایع و معادن، ۱۳۸۴.
- [۲] ص. رحمتی، م. سلیمی، م. ایلدارزاله، فناوری نمونه‌سازی سریع، اصول، روشها، کاربردها، نمونه‌های مطالعات، انتشارات جهان جام جم، ۱۳۸۴.
- [۳] س. رحمتی، برش مستقیم لایه از مدل‌های CAD مبتنی بر استفاده از دستگاه نمونه‌ساز سریع با قابلیت تعویض ابزار برشی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۰.
- [4] P. M. Pandey, N. V. Reddy, S. G. Dhande, Slicing procedures in layered manufacturing: a review, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 5, 2003, pp. 274-288.
- [5] P. M. Pandey, N. V. Reddy, S. G. Dhande, Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modelling, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 132 No. 1, 2003a, pp. 323-31.
- [6] S. H. Choi, K.T. Kwok, A tolerant slicing algorithm for layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, Issue 3, 2002, pp. 161-179.

- International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 3, 2000, pp. 89-98.
- [19] R. Jamieson, H. Hacker, Direct slicing of CAD models for rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 1, 1995, pp. 12-19.
- [20] Z. Zhiwen, Z. Luc, Adaptive direct slicing of the solid model for rapid prototyping, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 1, 2000, pp. 69-83.
- [21] P. Kulkarni, D. Dutta, An accurate slicing procedure for layered manufacturing, *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 9, 1996, pp. 683-97.
- [22] R. L. Hope, P. A. Jacobs, R. N. Roth, Rapid prototyping with sloping surfaces, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 1, 1997, pp. 12-19.
- [23] R. L. Hope, R. N. Roth, P. A. Jacobs, Adaptive slicing with sloping layer surfaces, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, 1997b, No. 3, pp. 89-98.
- [24] N. Balashanmugam, K. Ankit, D. Aloysius, L. Sudha, R. S. Suresh, Prasad Krishna, P. V. Shashikumar, STL-less based CAD/CAM Approach for Laser Scanning in Micro Stereo Lithography, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, 2014, pp. 1466–1472.
- [25] S. Singamneni, A. Roychoudhury, O. Diegel, B. Huang, Modeling and evaluation of curved layer fused deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, Issue 1, January 2012, pp. 27–35.
- [26] K. Mani, P. Kulkarni, D. Dutta, Region-base adaptive slicing, *Computer Aided Design*, Vol. 31, No. 5, 1999, pp. 317-33.
- [27] M. Weiyin, H. Peiren, An adaptive slicing and selective hatching strategy for layered manufacturing, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 89 No. 90, 2009, pp. 191-7.
- [28] K. H. Lee, K. Choi, Generating optimal sliced data for layered manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, 2000, pp. 277-84.
- [29] W. Xiangping, Z. Haiou, W. Guilan, W. Lingpeng, Adaptive slicing for multi-axis hybrid plasma deposition and milling, *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014.
- [7] A. Dolenc, I. Makela, Slicing procedure for layered manufacturing techniques, *Computer Aided Design*, Vol. 1, No. 2, 1994, pp. 4-12.
- [8] E. Sabourin, S. A. Houser, J. H. Bohn, Adaptive slicing using stepwise uniform refinement, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 4, 1996, pp. 20-26.
- [9] J. Tyberg, J. H. Bohn, Local adaptive slicing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 3, 1998, pp. 118-127.
- [10] J. Tyberg, J. H. Bohn, FDM systems and local adaptive slicing, *Materials and Design*, Vol. 20, 1999, pp. 77-82.
- [11] E. Sabourin, S. A. Houser, J. H. Bohn, Accurate exterior, fast interior layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 2, 1997, pp. 44-52.
- [12] K. Tata, G. Fadel, A. Bagchi, N. Aziz, Efficient slicing for layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 4, 1998, pp. 151-167.
- [13] D. Cormier, K. Unnanon, E. Sanni, Specifying non-uniform cusp heights as a potential for adaptive slicing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, No. 3, 2000, pp. 204-11.
- [14] P. M. Pandey, N. V. Reddy, S. G. Dhande, A real time adaptive slicing for fused deposition modelling, *International Journal of Machine tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 1, 2003b, pp. 61-71.
- [15] S. K. Singhal, K. Prashant Jain, M. Pulak Pandey, Adaptive Slicing for SLS Prototyping, *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 5, No. 1-4, 2008, pp. 412-423.
- [16] D. Ding, Z. Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Nathan Larkin, Stephen van Duin, Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive Manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 37, 2016, pp. 139-150.
- [17] M. Vatani, A. R. Rahimi, F. Brazandeh, A. Sanati nezhad, An Enhanced Slicing Algorithm Using Nearest Distance Analysis for Layer Manufacturing, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, 2009.
- [18] Z. Zhao, L. Laperriere, Adaptive direct slicing of the solid model for rapid prototyping,

- 
1. Fused Deposition Manufacturing
  2. Post Processing
  3. Rapid Prototyping
  4. Chordal
  5. distortion
  6. Containment Error
  7. Adaptive Slicing
  8. Direct Metal Deposition
  9. Ultrasonic Consolidation
  10. Laminated Object Manufacturing
  11. Cups Height
  12. Layered manufacturing
  13. Initial Graphics Exchange Specification
  14. Non-Uniform Rational B-spline Surfaces