

شبیه‌سازی تحلیلی فرایند نمونه‌سازی سریع در محیطی مجازی

محمود هوشمند (استاد یار)

علیرضا مختار (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

فناوری نمونه‌سازی سریع به مجموعه فرایندهایی اطلاق می‌شود که در آن مستقیماً از روی مدل سه‌بعدی و با افزایش لایه به لایه اقدام به ساخت نمونه‌ی جامد از جسم می‌کنند. هزینه‌ی کُراف مواد و تجهیزات مورد استفاده و نیاز به تکرار فرایند به منظور رسیدن به نمونه‌ی دلخواه چالش‌های عمده در توسعه‌ی این فناوری است. در نوشتار حاضر ضمن تحلیل و بررسی کامل روش‌های تجاری موجود و طبقه‌بندی این فرایندها، مدلی برای شبیه‌سازی تحلیلی چهار روش نمونه‌سازی سریع طراحی شده و براساس آن نرم‌افزار کاملی توسعه یافته است. این نرم‌افزار براساس معیارها و خواسته‌های کیفی طراح، و با استفاده از روش سلسله مراتبی^۱ (AHP)، بهترین روش ساخت را پیشنهاد می‌کند و نیز نشانگر تأثیر تغییر کمی پارامترهای فرایند بر مشخصه‌های کیفی نمونه‌سازی است.

مقدمه

در علم ساخت و تولید، بهره‌وری را انتقال سریع و کم هزینه‌ی محصول از ایده‌ی اولیه تا شکل واقعی در بازار مصرف تعریف می‌کنند، که فناوری جدید نمونه‌سازی سریع به تحقق این شعار کمک فراوانی کرده است. در تقسیم‌بندی روش‌های شکل‌دهی، این فناوری از نوع افزودنی است (شکل ۱).

فرایند «طراحی و تکوین محصول» اولین مرحله از زنجیره‌ی فعالیت‌های ساخت و تولید است. یکی از قدم‌های مهم طراحی محصول، ساخت و ارزیابی نمونه‌ی اولیه است (شکل ۲). ساخت این نمونه ممکن است به شکل فیزیکی یا مجازی باشد.^۱ نمونه‌سازی سریع^۲ چنان‌که از نامش پیداست، فناوری نسبتاً جدیدی است برای ساخت سه‌بعدی نمونه با صرف هزینه و زمان اندک، که از اواخر دهه‌ی ۸۰ معرفی شده است.

برای ساخت نمونه با این روش، ابتدا مدل سه‌بعدی جسم با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی^۳ (CAD) تولید شده و سطح آن با مثلث هاشور زده می‌شود. فایلی که به وجود آمده با فرمت STL ذخیره می‌شود و سپس به نرم‌افزار ماشین نمونه‌ساز معرفی می‌شود تا به وسیله برش‌هایی افقی، مشخصات همه‌ی لایه‌ها به دست آید. روش‌های مختلف نمونه‌سازی از دیدگاه نوع مواد به کار رفته در نمونه، به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- روش‌های مبتنی بر مواد مایع، مانند روش سنگ‌نگاری برجسته^۴ (SLA)، مدل‌سازی رسوب‌گذاخته^۵ (FDM)
- روش‌های مبتنی بر مواد پودری، مانند تف‌جوشی لیزری انتخابی^۶ (SLS)، تف‌جوشی بازدارای انتخابی^۷ (SIS)

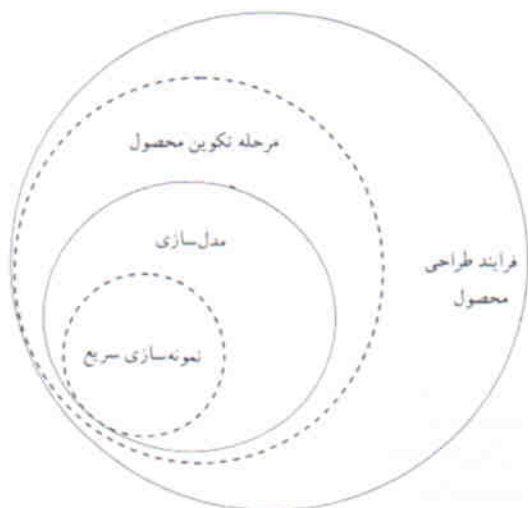
● روش‌های مبتنی بر مواد جامد، مانند ساخت شیء چند

لایه^۸ (LOM)، فناوری چند لایه‌ی کاغذی^۹ (PLT)

در دسته‌ی اول لایه‌هایی از ماده‌ی اولیه‌ی مایع را که معمولاً یک بسیار حساس در برابر نور است در برابر اشعه‌ی ماوراء بنفش سخت



شکل ۱. روش‌های کلی شکل‌دهی مواد.



شکل ۲. جایگاه نمونه‌سازی سریع در طراحی محصول.

به منظور تحقق خواسته‌های اصلی نمونه، استفاده از یک محیط شبیه‌سازی به نحوی که قادر به نمایش مجازی مشخصات نمونه براساس پارامترهای متفاوت در فرایند باشد ضروری به نظر می‌رسد. این ابزار سیستم نمونه‌سازی مجازی^{۱۱} (VPS) نام دارد و هدف چنین سیستمی آگاهی بیشتر از نحوه‌ی عملکرد فرایند و به حداقل رساندن تعداد تکرارها برای رسیدن به نمونه‌ی مطلوب است.

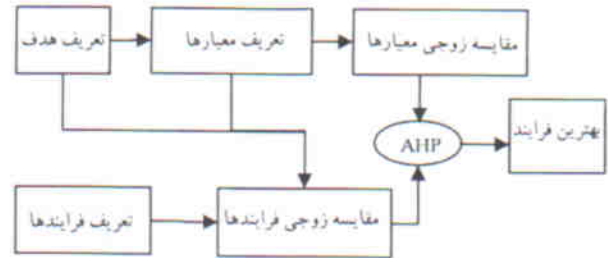
در مدل‌سازی یک سیستم نمونه‌سازی مجازی باید ضمن شناسایی دقیق «نیازمندی‌های ساخت»^{۱۱} و «پارامترهای کلیدی فرایند»^{۱۲} ارتباط بین آنها به درستی بیان شود. پارامترهای مؤثر ممکن است ضخامت هر لایه، راستای قرار گرفتن مدل برای ساخت^{۱۳} و یا سرعت پیمایش پرتو لیزر باشد. «نیازمندی‌های ساخت» شامل زمان ساخت مدل، دقت نهایی قطعه‌ی ساخته شده و کارایی عملیات نمونه‌سازی است. مثلاً در صورتی که کم‌ترین ارتفاع قطعه به عنوان راستای مدل در نظر گرفته شود، تعداد برش‌های کم‌تری مورد نیاز است و به همین نسبت زمان ساخت مدل کوتاه‌تر می‌شود.^{۱۵} هر قدر که تأثیر تغییرات پارامترهای یک فرایند بر مشخصه‌های کیفی آن بیشتر شناخته شود، از صرف زمان و هزینه‌های نامطلوب جلوگیری خواهد شد.

در فرایند نمونه‌سازی سریع نیز اگر پارامترهای کلیدی و مشخصه‌های کیفی به درستی تعریف شوند و در محیطی مجازی ارتباط بین آنها تحلیل شود، نتایج حاصله برای ساخت فیزیکی نمونه قابل استفاده است و تعداد تکرارهای فرایند به حداقل می‌رسد.

روش‌های تحلیلی و کمی بسیاری برای به تصویر کشیدن فرایند نمونه‌سازی سریع در قالب مدل شبیه‌سازی انجام گرفته است. اما اغلب آنها فقط توانسته‌اند یک پارامتر را مورد تحلیل قرار دهند، یا در مورد تنها یک فرایند محاسبات را انجام دهند. تحقیقات مارسان در ۱۹۹۷، زو در ۱۹۹۹، و تامسون و کافورد در سال ۱۹۹۵ نمونه‌یی از کارهای انجام شده در این زمینه است.^{۱۶}

یکی از بهترین مدل‌ها برای نمونه‌سازی مجازی به صورت نمایش ساخت لایه به لایه به کمک رایانه، در سال ۲۰۰۱ و توسط چوی و ساماودام توسعه یافت که روش SLS را شبیه‌سازی می‌کند و نشانگر ارتباط میان پارامترهای فرایند و زمان و دقت نمونه است.

نمونه‌های مجازی به دو دسته‌ی نمایشی و تحلیلی تقسیم می‌شوند. در نوع اول با بهره‌گیری از امکانات گرافیکی رایانه و نیز سخت‌افزارهای پیشرفته، از قبیل عینک‌های سه‌بعدی، امکان نمایش ساخت لایه به لایه‌ی نمونه از طریق رایانه فراهم می‌آید. در نوع دوم تنها شبیه‌سازی تحلیلی مورد نظر است؛ به این ترتیب که کلیدی



شکل ۳. الگوی جریان اطلاعات در تصمیم‌گیری AHP.

می‌کنند (SLA) و یا ماده را به صورت رشته‌ی بسیاری یا پلاستیکی ذوب، و پس از ریزش سرد می‌نمایند تا لایه‌یی از نمونه ساخته شود (FDM).

در دسته‌ی دوم به جای مایع، پودر مواد سرامیکی، پلاستیکی یا حتی آلیاژهای فلزی را به وسیله‌ی لیزر کلوخه می‌کنند تا لایه‌یی جامد به دست می‌آید (SLS).

در دسته‌ی سوم نیز لایه‌های ورق کاغذی یا پلاستیکی را در معرض تابش یک لیزر پر قدرت از نوع CO₂ می‌برند که از برهم نهادن این لایه‌ها مدل جامد به دست می‌آید (LOM).

انتخاب فرایند

وجه تمایز فرایندهای مذکور کاربردها، امتیازات و معایب آنهاست. تا این زمان (تابستان ۲۰۰۳) از بین بیش از ۳۰ روش توسعه یافته‌ی موجود هیچ فرایند نمونه‌سازی سریعی نتوانسته است به طور کامل جایگزین فرایندهای دیگر شود.^{۱۷} ویژگی‌های منحصر به فرد هر فرایند، تصمیم‌گیری راجع به انتخاب مناسب‌ترین گزینه را حائز اهمیت می‌سازد. ضمن آنکه هزینه‌ی گزاف مواد مصرفی و استفاده از سیستم‌های گران‌قیمت نمونه‌سازی سریع نیز اهمیت این انتخاب را دوچندان می‌کند.^{۱۸}

الگوی ارائه شده در این نوشتار، استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره یا سلسله‌مراتبی (AHP) است. در اینجا معیارهایی نظیر کیفیت نمونه‌ی نهایی، هزینه‌ی ساخت و زمان تکمیل آن که در هر فرایند ساختی مدنظر است مبنای انتخاب قرار گرفته است.^{۱۹} به این ترتیب، مبنای مقایسات زوجی بین معیارها و آگاهی از تفاوت فرایندهای موجود، معرف بهترین روش نمونه‌سازی و امتیازات کمی آن است (شکل ۳).

نمونه‌سازی مجازی، شبیه‌سازی تحلیلی

برای پرهیز از صرف هزینه و زمان زیاد در اثر تکرار ساخت نمونه، و

روش SLA:

$$T = \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{V \cdot D} \right) + (T_d)(N-1) \quad (2)$$

که در آن N تعداد کل لایه‌ها و A_i مساحت لایه‌ی iام (میلی متر مربع)، V سرعت پیمایش اشعه‌ی لیزر (معمولاً بین ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ میلی متر بر ثانیه)، D پرتو لیزر (میلی متر)، و T_d تأخیر بین ساخت لایه‌های متوالی (به منظور تغییر وضعیت میز کار و تنظیم تابش لیزر) است.

روش FDM:

$$T = \frac{V}{v \cdot \pi \cdot r_w^2} + \frac{h}{r_w} t_d \quad (3)$$

که در آن V بیشترین حجم مدل (میلی متر مکعب)، T زمان ساخت نمونه (ثانیه)، h ارتفاع ساخت نمونه (میلی متر)، v سرعت ریزش مذاب از دهانه‌ی نازل (میلی متر بر ثانیه)، r_w شعاع دهانه‌ی نازل (معمولاً بین ۰/۱۲۵ تا ۰/۴۷۸ میلی متر)، t_d زمان تأخیر بین ساخت لایه‌های متوالی (ثانیه) و r_a قطر هر لایه (معمولاً بین ۰/۱۷۲ تا ۰/۳۵۶ میلی متر) و قابل تنظیم به وسیله‌ی اپراتور است.

به این ترتیب مدت زمان ساخت یک نمونه با روش FDM نیز از رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که در اینجا ضخامت رشته‌ی نازک که برابر با قطر دهانه‌ی قیف نازل است، با ضخامت لایه‌ها برابر در نظر گرفته شده است و انتهای قیف مذاب با سطح نمونه تماس ندارد. همچنین فرض می‌شود که r_a در طول ساخت نمونه ثابت است.

روش LOM:

$$T = \frac{\gamma(x+y)}{v} + \frac{z}{l_m} d \quad (4)$$

که در آن γ سرعت برش لیزر (میلی متر بر ثانیه)، $x+y$ محیط مربع محیطی لایه اول (میلی متر)، l_m ضخامت ورقه مواد مصرفی (میلی متر)، z ارتفاع ساخت مدل (میلی متر)، d تأخیر زمانی بین ساخت دو لایه متوالی (ثانیه) است.

محاسبه‌ی دقت ساخت

برای آن که بتوان کیفیت نمونه‌ی ساخته شده را به صورت کمی محاسبه کرد، یکی از خطاهایی را که در حین فرایند بر هم نهادن لایه به لایه‌ی مواد، و بر اثر اختلاف در شکل نمونه‌ی فیزیکی و فایل STL پدید می‌آید، مورد محاسبه قرار داده و معکوس آن به عنوان دقت کمی نمونه در مدل در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ میزان اختلاف در هر لایه برابر ch است که هرچه

مشخصه‌های کیفی فرایند به صورت کمی در خروجی سیستم نمایش داده می‌شود و امکان تراکنش کاربر از طریق مشاهده‌ی تاثیر تغییرات پارامترها بر این مشخصه‌ها به وجود می‌آید.

مدل توسعه یافته در این تحقیق از نوع دوم بوده و مزایای آن نسبت به اغلب انواع قبلی به طور کلی عبارت‌اند از:

- در نظر گرفتن چند فرایند ساخت و استفاده از یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری؛
- در نظر گرفتن کلیه‌ی پارامترهای ثابت و غیر ثابت فرایند و ارائه‌ی امکان اعمال تغییر توسط کاربر؛
- محاسبه‌ی قیمت تمام شده‌ی ساخت نمونه از طریق یک مدل هزینه‌ی و حاصل مجموع هزینه‌ی مواد، نیروی انسانی و ماشین‌آلات مصرف شده در طول عملیات ساخت؛
- محاسبه‌ی کارایی استفاده از مواد اولیه به صورت درصدی از مواد که مستقیماً صرف ساخت قطعه می‌شوند نسبت به کل مواد مصرفی با توجه به نوع فرایند.

الگوریتم پیشنهادی، نرم‌افزار نمونه‌سازی سریع مجازی^{۱۴} (VRPS)

نرم‌افزار نمونه‌سازی سریع مجازی در ۴ روش موسوم به SLS، SLA، LOM، FDM دو هدف عمده را دنبال می‌کند:

- بهینه‌سازی از طریق تغییرات در پارامترهای فرایند انتخاب شده؛
 - تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین روش از بین ۴ روش موجود.
- وارد کردن همه‌ی روش‌های تجاری موجود مستلزم آگاهی از مشخصات فنی یکایک آن‌هاست که از محدوده‌ی فعالیت این تحقیق خارج است. در قسمت اول مدل، مشخصه‌های کیفی فرایند نمونه‌سازی سریع که به آنها اشاره شد، محاسبه شده‌اند.

محاسبه‌ی مشخصه‌های کیفی ساخت

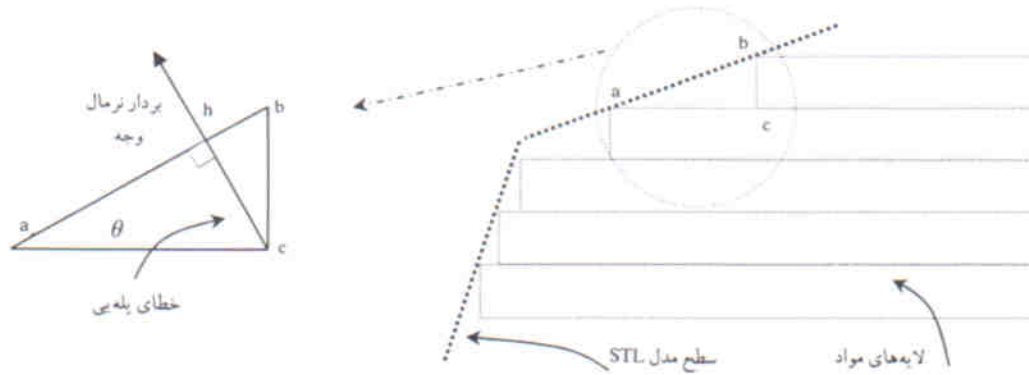
محاسبه‌ی زمان ساخت

اگر T زمان کل ساخت نمونه، بدون احتساب عملیات تکمیلی آن باشد، در ادامه رابطه‌های لازم برای محاسبه‌ی زمان در هر روش تشریح شده است.

روش SLS:

$$T = \sum_{i=1}^{N_l} T_{li} + T_s N_l \quad (1)$$

که در آن T_{li} زمان پیمایش لایه iام، T_s زمان راه‌اندازی برای ساخت هر لایه و N_l تعداد کل لایه‌ها است.



شکل ۴. خطای پله‌ی در ساخت نمونه.

تعداد کل قطعات برای ساخت، V_{pi} حجم مکعب در برگرفته‌ی نمونه z_{am} (میلی متر مکعب)، h_{mii} بیشترین ارتفاع قابل استفاده (میلی متر)، و A_w مساحت بستر ساخت نمونه است.

انتخاب مناسب‌ترین روش ساخت

همان‌طور که اشاره شد، تصمیم‌گیری راجع به انتخاب مناسب‌ترین روش به کمک الگوی فرایند تحلیل سلسله مراتبی صورت می‌گیرد که در آن معیارها و گزینه‌ها در قالب یک درخت تصمیم تعریف می‌شوند (شکل ۶). لازم به ذکر است که روش مذکور علی‌رغم اشکالاتی که به آن وارد است، در زمره‌ی بهترین روش‌های کنونی تصمیم‌گیری به شمار می‌رود. براساس مقایسات زوجی معیارها که از کاربرد گرفته می‌شود و نیز مقایسات زوجی گزینه‌ها که قبلاً طبق ترجیحات بین ۴ سیستم موجود در مدل وارد شده است، خروجی این

شیب سطح نمونه بیشتر باشد اندازه‌ی این خطا بزرگ‌تر است. تعیین دقیق این میزان خطا مستلزم آگاهی از شیب همگی منحنی‌های خارجی مدل STL می‌باشد.

$$\text{دقت} = \frac{1}{bc \cos(\theta)} \Rightarrow ch = bc \cos(\theta) \quad (5)$$

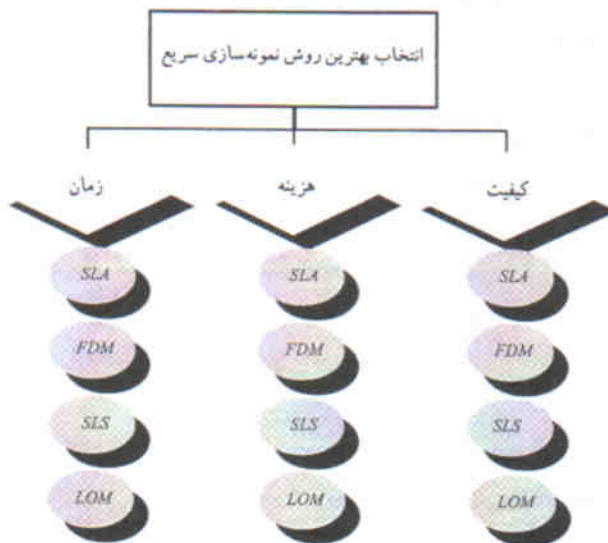
محاسبه‌ی کارایی در هر فرایند

در بیشتر روش‌های ساخت، مقدار قابل توجهی از مواد بدون استفاده باقی می‌ماند، که بسته به نوع مواد و فرایند شاید بتوان آنها را در تکرارهای بعدی مورد استفاده قرار داد (SLS)، یا ممکن است به‌عنوان دور ریز محسوب شوند (LOM). فقط در بعضی از روش‌ها، مانند FDM، از مواد به‌میزان لازم مصرف می‌شود و لذا از کارایی بالایی برخوردارند.

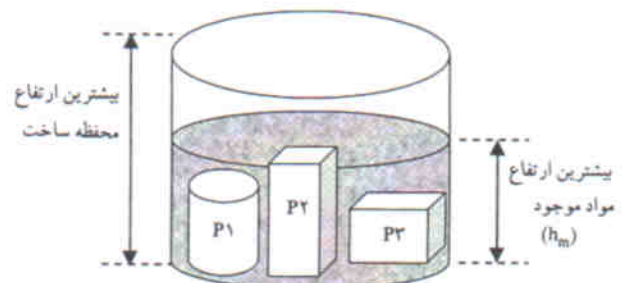
در مدل پیشنهادی میزان کارایی مواد معادل نسبت حجم قطعه(های) ساخته شده برحجم موادی که باید در فرایند وارد شود، محاسبه شده است (شکل ۵).

$$\text{راندمان راستا} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N_p} V_{pi}}{h_m A_w} \quad (6)$$

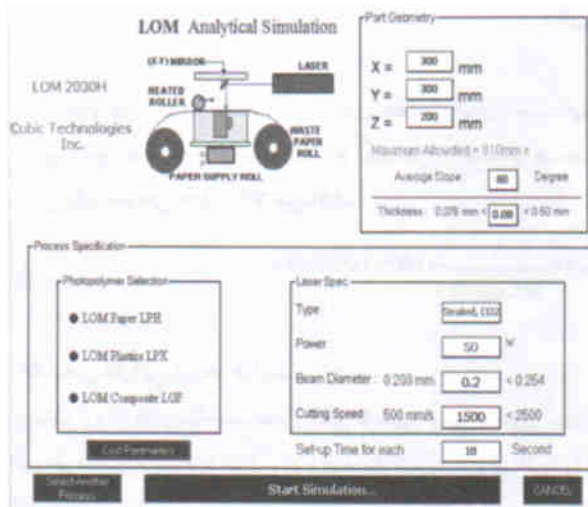
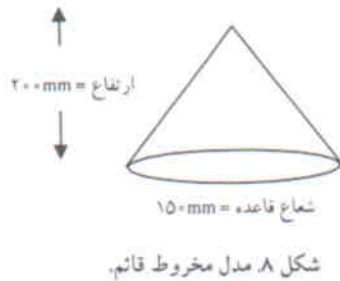
که در آن راندمان راستا برابر با ضریب کارایی فرایند (درصد)، N_p



شکل ۶. نمودار درخت تصمیم‌گیری AHP.



شکل ۵. مقایسه‌ی کل حجم قابل استفاده و حجم استفاده شده‌ی مواد.



شکل ۹. فرم اطلاعات پارامترهای شبیه‌سازی.

ابعاد کوچک‌ترین مکعبی که به‌طور کامل این حجم را محاط می‌کند عبارت‌اند از:

$$X = 300 \text{ و } Y = 300 \text{ و } Z = 200$$

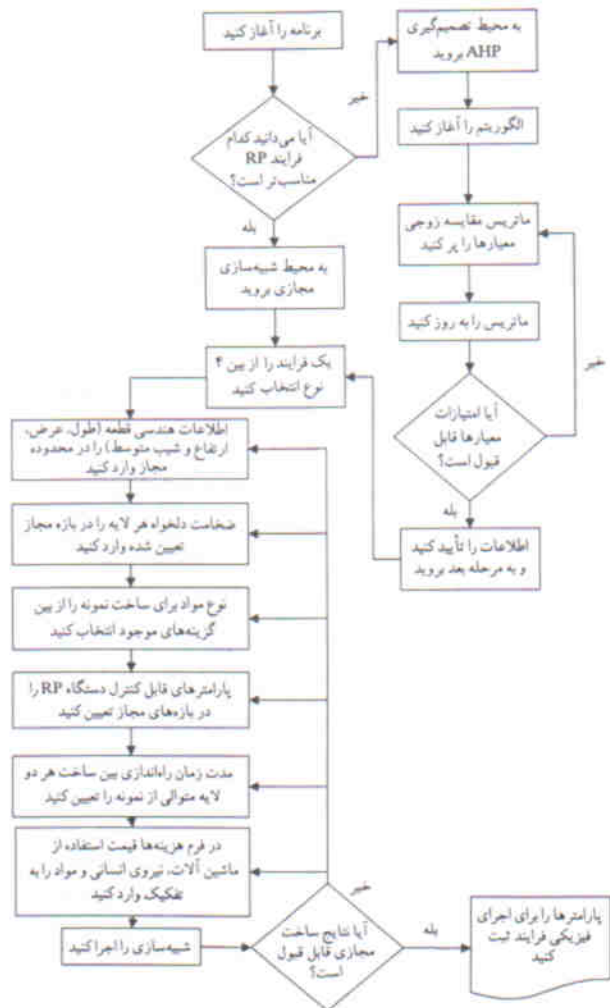
به این ترتیب حجمی معادل $X \times Y \times Z$ از مواد اولیه مصرف خواهد شد.

ضخامت هر لایه به دلخواه معادل $1/15$ میلی‌متر وارد می‌شود که در محدوده‌ی مجاز این سیستم (۹۰٪ تا ۷۶٪) قرار دارد. نوع ماده‌ی انتخابی LOM Paper LPH است و بین ساخت هر دو لایه‌ی متوالی به‌طور متوسط ۱۰ ثانیه طول می‌کشد. ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و سرعت برش ۱۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه برای پرتو لیزر وارد می‌شود. توان دستگاه لیزر ۵۰ وات و نوع لیزر CO₂ است که این پارامترها به‌صورت ثابت در مدل تعریف شده‌اند. سایر پارامترهای هزینه‌ی به شرح زیر است:

هزینه‌ی کار با ماشین نمونه‌ساز = ۱ واحد پولی بر ساعت؛

هزینه‌ی استهلاک ماشین = ۲۵ / واحد پولی بر ساعت؛

هزینه‌ی عملیاتی (راه‌اندازی + نظارت + عملیات تکمیل) = ۵ واحد پولی بر ساعت؛



شکل ۷. نمودار جریان اطلاعات در مدل پیشنهادی.

مدل عبارت است از رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس امتیازی که در این الگو کسب کرده‌اند. نرم‌افزار به کار گرفته شده که با زبان Visual Basic طراحی شده است. در ابتدا براساس روش سلسله‌مراتبی، مناسب‌ترین فرایند نمونه‌سازی سریع را به کاربر معرفی می‌کند و قادر است قبل از اقدام به ساخت فیزیکی جسم، با ورود اطلاعات هندسی شکل مدل، نوع ماده برای ساخت و نیز تعیین و تغییر پارامترهای فرایند، مشاهده کند که نمونه‌ی مزبور در چه زمانی و با چه دقت و هزینه‌ی ساخته می‌شود. الگوریتم رویه‌های به کار رفته در این نرم‌افزار در شکل ۷ نشان داده شده است.

مطالعه‌ی موردی

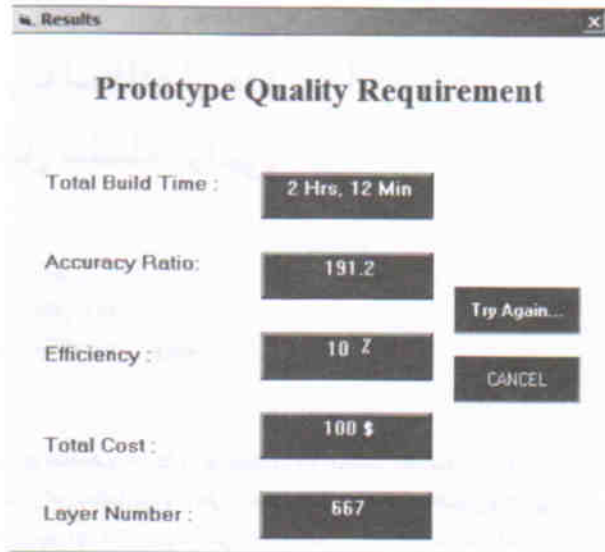
می‌توان چنین فرض کرد که نمونه‌سازی سریع مخروطی (شکل ۸) با مدل فوق شبیه‌سازی شود. اگر فرضاً روش LOM پس از اجرای الگوریتم AHP انتخاب شده باشد، در این صورت خواهیم داشت:

- دقت مدل = $110/7$ (بدون واحد و صرفاً برای مقایسه)؛
- کارایی فرایند = ۷۸ درصد؛
- قیمت تمام شده = ۱۳۸ واحد پولی؛
- تعداد لایه‌های ساخت = ۱۳۳۳ عدد؛

نمونه‌یی از فرم ورود اطلاعات و فرم نتایج شبیه‌سازی شده در اشکال ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار پس از بررسی انواع روش‌های موجود برای نمونه‌سازی سریع، و انتخاب بهترین روش با استفاده از یک رویکرد پشتیبانی تصمیم‌گیری کمی، نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی ساخت نمونه به صورت تحلیلی ارائه شد که در آن ضمن بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای کمی فرایند بر نتایج اصلی فرایند (هزینه، زمان، کیفیت و کارایی مواد مصرفی)، کاربر یا طراح پس از اجرای مکرر مدل مجازی نهایتاً قادر است میزان دقیق پارامترها و نوع مواد را برای رسیدن به نمونه‌ی دلخواه به منظور ساخت مدل فیزیکی در سیستم نمونه‌ساز به دست آورد، و نیز هزینه‌ی تمام شده را قبل از اقدام به ساخت نمونه برآورد کند.



شکل ۱۰. فرم نتایج شبیه‌سازی.

هزینه‌ی انرژی = ۱ واحد پولی بر ساعت؛

هزینه‌ی مواد مصرفی = ۲۰ واحد پولی بر هر متر مربع ورقه‌ی LPH؛

پس از اجرای مدل شبیه‌سازی نتایج حاصل به شرح زیر است:

● زمان ساخت = ۵ ساعت و ۳۵ دقیقه؛

پانوش

1. Analytical Hierarchy Process
2. Rapid Prototyping
3. Computer-Aided Design
4. Stereolithography Apparatus (SLA)
5. Fused Deposition Modeling (FDM)
6. Selective Laser Sintering (SLS)
7. Selective Inhibition Sintering (SIS)
8. Laminated Object Manufacturing (LOM)
9. Paper Laminated Technology (PLT)
10. virtual prototyping system
11. manufacturing requirement
12. key process parameters
13. orientation manufacturing
14. virtual rapid prototyping software

منابع

1. Chua C., Leong K.F., Lim C.S., "Rapid prototyping", principles and Application. Second Edition, Singapore: World Scientific

- Publishing, Compression, Pte. Ltd. (2003).
2. Wohlers Associates, "Rapid prototyping & tooling state of the industry annual worldWide progress report", Wohlers Report, **1**, pp 1-9 (2001).
3. Rennie A.E.W., Jacobson D.M., Bocking C.E., *Rapid Prototyping, Tooling, and Manufacturing*, London, UK, Professional Engineering Publishing (2002).
4. Mokhtar A.R., "Applying AHP methodology to select the best rapid prototyping technique", *Proceeding of International Conference of Industrial Engineering*, Ireland pp 62-69 (2003).
5. Nee A.Y.C., Fuh J.Y.H., Miyazawa T., "One the improvement of the stereolithography (SL) process", *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, pp 262-268 (2001).
6. Marsan, A.L., Allen S., Kulkarani P., Dutta D., "An integrated software system for process planning for layered manufacturing", *Proceeding of Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp 491-498 (1997).
7. Choi S.H., Samavedam S., "Modeling and optimization of rapid prototyping", *Computer in Industry*, **47**, pp 39-53 (2002).