سنجش و مقایسه‌ی فرایندهای مستقیم ابزارسازی سریع به‌روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

حامد اصغرزاده و محمود اعظمی (دانشجویان کارشناسی ارشد)
عبدالرضا سیم‌چی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی و علم‌مواد، دانشگاه صنعتی شریف

فناوری «نمونه‌سازی سریع»[1] یکی از جذاب‌ترین روش‌هایی است که برای تسریع مراحل طراحی و ساخت قطعات صنعتی به‌کار می‌رود. گسترش کاربرد این فناوری در ابزارسازی سریع[2] به حدی است که امروزه از آن به‌عنوان یکی از عناصر اصلی ساخت و تولید نام می‌برند. با این وجود، تعدد بسیار زیاد روش‌ها، قابلیت‌های متفاوت آنها، تنوع محصولات تولیدی، نو و جدید بودن فناوری و مهم‌تر از همه ریسک بالای سرمایه‌گذاری باعث می‌شود مقایسه و انتخاب روش بهینه با توجه به نیازهای صنعت کاری دشوار باشد. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی[3] (AHP) یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری در مسائل اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی است.

در این نوشتار با استفاده از این فرایند، روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع با توجه به شرایط و نیازهای کشور مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، پتانسیل استفاده از فرایندهای مختلف برای واحد نمونه‌سازی سریع شرکت سایکو بحث و تحلیل می‌شود.

مقدمه

نمونه‌سازی و ابزارسازی با استفاده از روش‌های متداول و سنتی مانند ماشین‌کاری با تخلیه‌ی الکتریکی[4] (EDM) یا CNC معمولاً فرایندی زمان‌بر است. امروزه صنعت نیازمند ابداع روش‌های نو با ویژگی‌های خاص است که بتواند در حداقل زمان محصولات جدید را به بازار عرضه کند.[1]

در راستای تحقق این هدف، از فناوری نمونه‌سازی، ابزارسازی و قطعه‌سازی سریع[5] (RPTM) استفاده می‌شود. در این فرایند، ابتدا مدل سه‌بعدی جسم به‌کمک رایانه طراحی می‌شود (3D-CAD) و سپس اطلاعات حاصل به فایل استریو لیتوگرافی[6] (STL) تبدیل می‌شود. پس از لایه‌زنی و کنترل اطلاعات، محصول به‌صورت لایه به لایه توسط یکی از دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع ساخته می‌شود. استفاده از فرایند RPTM موجب افزایش سرعت طراحی و ساخت می‌شود و ضمناً هزینه‌ی تولید را به‌مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.[2] تحقیقات نشان داده است که با استفاده از این فناوری، کاهش زمان ساخت تا ۵۰ درصد و کاهش هزینه‌های تولید به میزان ۴۰ تا ۶۰ درصد امکان‌پذیر است.[3]

در سال‌های اخیر کاربرد فناوری نمونه‌سازی سریع در ساخت ابزارها و قالب‌ها بسیار گسترش یافته است. این روش که به ابزارسازی سریع موسوم است به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی می‌شود.[4]

در ابزارسازی سریع به روش مستقیم، ابزار بدون نیاز به الگوی مادر و توسط یکی از فرایندهای نمونه‌سازی سریع ساخته می‌شود. برخلاف آن، در ابزارسازی به‌روش غیرمستقیم به یک الگوی مادر نیاز است که توسط یکی از فرایندهای نمونه‌سازی سریع مانند روش استریولیتوگرافی (SLA) یا تف‌جوشی انتخابی توسط لیزر (SLS) تولید و سپس به روش‌های مختلف به قالب مورد نیاز تبدیل می‌شود.[5]

روش‌های متنوعی برای ابزارسازی سریع به‌صورت مستقیم ابداع شده‌اند. در جدول ۱ متداول‌ترین روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع و مراحل ساخت محصولات ذکر شده است. در جدول ۲ نیز خلاصه‌ی برخی از ویژگی‌های این فرایندها مانند نوع مواد مصرفی، کاربردها، مزایا و محدودیت‌ها ذکر شده است. با وجود مزایای فراوانِ کاربرد این فرایندها، هنوز بسیاری از شرکت‌ها از این فناوری بهره نمی‌برند. شاید محدودیت‌های فنی موجود در روش‌های توسعه‌یافته، عدم آگاهی کامل از قابلیت‌های تکنیکی فرایند، و ریسک زیاد سرمایه‌گذاری مهم‌ترین علت این مسئله باشد. از طرف دیگر، تنوع زیاد روش‌ها و مواد مصرفی، و وجود مزایا و

جدول ۱. نام و مراحل ساخت مهم‌ترین روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع.

نام روش	علامت اختصاری	مراحل فرایند
تف‌جوشی مستقیم لیزری (Direct Metal Laser Sintering)	DMLS	تف جوشی مستقیم پودر فلز توسط لیزر و ماده‌خورانی به‌وسیله‌ی رزین اپوکسی یا آلیاژهای مس
تف‌جوشی انتخابی لیزری (Selective Laser Sintering)	SLS	تف‌جوشی پودر فلز مخلوط با پلیمر توسط لیزر، حذف پلیمر و ماده‌خورانی توسط آلیاژهای مس
قالب‌گیری تزریقی مستقیم (Direct ACES Injection Mold)	Direct AIM	ایجاد پوسته‌ی خارجی دوتکه توسط روش استریولیتوگرافی و ریختن پشت‌بند در پشت قالب
چاپ سه‌بعدی (3Dimensional Printing)	3DP	اتصال ذرات پودر توسط چسب به روش مشابه چاپگرهای نقطه‌یی، تف جوشی و ماده خورانی
ابزارسازی لایه‌یی (Laminated Tooling)	LT	برش‌کاری شکل هندسی بر روی ورق‌ها توسط لیزر و مونتاژ ورقه‌ها بر روی هم
شکل‌دهی دقیق توسط لیزر (Laser Engineered Net Shaping)	LENS	ایجاد یک حوضچه‌ی مذاب توسط لیزر و دمیدن پودر به داخل آن
رسوب‌دهی مستقیم فلز (Direct Metal Desposition)	DMD	تمرکز لیزر برای ایجاد حوضچه‌ی مذاب، تزریق پودر فلز به حوضچه‌ی مذاب، جابه‌جایی محل تمرکز لیزر و ماشین‌کاری لایه به لایه توسط CNC
ماشین‌کاری با سرعت بالا (High Speed Machining)	HSM	تراش‌کاری توسط ماشین‌های CNC سریع

جدول ۲. مشخصات و ویژگی‌های مهم‌ترین روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع.

روش	مواد مصرفی	کاربردها	مزایا	معایب
DMLS	پودرهای آلیاژی مانند برنز و فولاد،سرامیک	قالب‌های تزریق پلاستیک ریخته‌گری تحت فشار، کشش عمیق، قطعات فلزی	دقت ابعادی بالا، زمان ساخت کم، امکان تولید اشکال پیچیده و ایجاد سیستم خنک‌کننده‌ی داخلی	نیاز به مرحله‌ی تمام‌کاری و کاری نهایی، گران‌قیمت بودن صیقل تجهیزات
SLS	فولاد + مس، مس + پلی‌آمید (CuPA) و سرامیک	قالب‌های دائم برای تزریق و ریخته‌گری تحت فشار، پلاستیک توپی‌های قالب	امکان استفاده از گستره وسیعی از مواد، دقت ابعادی بالا، امکان تولید اشکال پیچیده و ایجاد سیستم‌های خنک‌کننده داخلی	نیاز به عملیات ثانویه و صیقل‌کاری نهایی
Direct AIM	پلیمرهای حساس به اشعه ماورای بنفش	قطعات پلاستیکی	عدم نیاز به عملیات تکمیلی، سرعت تولید بالا	کاربرد فقط برای تولید قطعات پلاستیک
3DP	فولاد ابزار	قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار	ساخت قطعات پیچیده با ابعاد نسبتاً بزرگ	دقت ابعادی متوسط و سطح نامرغوب نهایی
LT	فولاد	قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار،قالب‌های تزریقی، قالب‌های دمشی، ابزارهای پرس، قطعات در ابعاد بزرگ	امکان تولید قطعات بزرگ به‌صورت مستقیم، امکان ایجاد کانال‌های خنک‌کننده	کیفیت سطحی نامطلوب و نیاز به ماشین‌کاری نهایی
LENS	فولادهای زنگ‌نزن،فولادهای ابزار، آلیاژهای پایه‌نیکل، آلیاژهای تیتانیوم	ساخت و تعمیر قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار، قالب‌های تزریقی و قطعات بزرگ از جنس تیتانیوم	عدم نیاز به فرایندهای ثانویه، چگال بودن کامل قطعه، قابلیت استفاده از مخلوط پودرهای فلزی و فلز ـ سرامیکی	کیفیت سطحی نامطلوب و نیاز به ماشین‌کاری نهایی
DMD	فولادهای ابزار، فولادهای زنگ‌نزن،آلومینیم، اینکونل، مس، کاربید تنگستن	تولید یا اصلاح شکل قطعات و قالب‌های ساخته شده، پوشش دادن سطح قالب‌های صنعتی، تعمیر قطعات هواپیما	ایجاد قطعات کاملاً چگال، خواص مکانیکی و متالورژیکی خوب، امکان تولید قطعات و ابزارها از چند فلز مختلف	کیفیت سطحی نامطلوب و نیاز به ماشین‌کاری نهایی
HSM	فولاد، آلومینیم، آلیاژهای تیتانیوم	تولید قالب‌های صنعتی	سرعت و دقت ابعادی بالا، عدم نیاز به عملیات ثانویه سطحی، ساخت قطعات فلزی سخت	محدودیت در پیچیدگی محصول، سرعت نسبتاً کم

محدودیت‌های متعدد، انتخاب روش مناسب را بسیار مشکل کرده است.

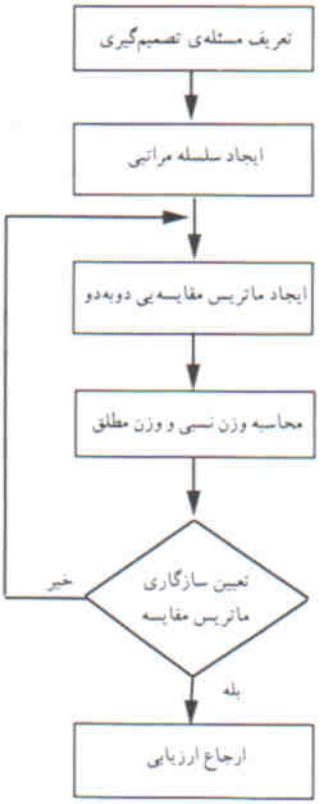
هدف این تحقیق، سنجش و مقایسه‌ی فرایندهای ابزارسازی سریع به‌روش مستقیم با توجه به شرایط و نیازهای کشور است. برای این منظور از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در واحد نمونه‌سازی شرکت ساپکو (به‌عنوان یک مطالعه‌ی موردی) استفاده شد که نتایج حاصل در این نوشتار به بحث گذاشته می‌شوند.

روش تحقیق:

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولین بار توسط توماس ال ساعتی[7] در سال ۱۹۸۰ مطرح شد.[6] این فرایند با تجزیه‌ی مسائل مشکل و پیچیده، ابتدا آنها را ساده می‌کند و سپس به حل آن می‌پردازد.

روش AHP کاربردهای فراوانی در مسائل اقتصادی و اجتماعی دارد و در سال‌های اخیر نیز در امور مدیریتی از آن استفاده می‌شود.[7] مراحل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای انتخاب فرایند مناسب ابزارسازی سریع به روش مستقیم به شرح زیر است:(شکل ۱)



شکل ۱. نمودار گردشی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP.

ساختن سلسله‌مراتب

اولین قدم در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، ایجاد یک نمایش‌گرافیکی از مسئله است که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. سطح اول در هر سلسله‌مراتب نشان‌دهنده‌ی هدف است. در سطح دوم نیز معیارهای مسئله‌مانند قیمت، زمان و کیفیت قرار می‌گیرند. در سطح آخر نیز گزینه‌هایی وجود دارند که روش‌های پیشنهادی هستند.

محاسبه‌ی وزن

در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوطه‌ی خود در سطح بالاتر، به‌صورت دوبه‌دو، مقایسه و وزن آنها محاسبه می‌شود. این وزن‌ها را وزن نسبی[8] می‌نامند. سپس با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌شود که آن را وزن مطلق[9] می‌نامند. برای این منظور، ارجحیت گزینه‌ها نسبت به‌یکدیگر با اعداد ۱ تا ۹ نشان داده می‌شود. جدول ۳ چگونگی استفاده از این اعداد را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی تمام مقایسه‌های دوتایی، جدول‌هایی به تعداد معیارها خواهد بود. گام بعدی، مقایسه یا به‌عبارتی ارزش‌گذاری تک تک معیارها نسبت به یکدیگر است، زیرا ممکن است اهمیت یک معیار نسبت به معیار دیگر بیشتر باشد. برای این منظور هر کدام از معیارها از لحاظ درجه‌ی اهمیت درجه‌بندی می‌شوند.

برای محاسبه‌ی وزن نسبی از روش‌های مختلفی مانند حداقل مربّعات، حداقل مربّعات لگاریتمی، بردار ویژه و روش‌های تقریبی مانند میانگین حسابی و میانگین هندسی، استفاده می‌کنند. در این تحقیق از روش میانگین هندسی برای محاسبه‌ی وزن نسبی استفاده شده است. در روش میانگین هندسی، ابتدا میانگین عناصر هر سطر محاسبه می‌شود و سپس بردار حاصل به‌هنجار می‌شود تا بردار وزن به دست آید. وزن نهایی هر گزینه از مجموع حاصل‌ضرب وزن نسبی هر معیار در وزن نسبی گزینه‌ی مربوط به آن به دست می‌آید.

جدول ۳. مقادیر عددی برای مقایسه‌های دوتایی.[8]

ترجیحات (قضاوت شفاهی)	مقدار عددی
کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر	۹
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی	۷
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی	۵
کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوبتر	۳
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۸ و ۶ و ۴ و ۲

سازگاری سیستم

یکی از مزایای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی کنترل سازگاری تصمیم است. به‌عبارت دیگر، همواره در فرایند تصمیم‌گیری می‌توان میزان سازگاری سیستم را محاسبه کرد و نسبت به خوب و بد بودن، یا قابل قبول و مردود بودن آن قضاوت کرد. در صورتی که A ماتریس مقایسه‌ی زوجی و W بردار وزن باشد، برای به دست آوردن میزان ناسازگاری مراحل زیر را می‌بایست انجام داد:[۶-۸]

الف) به دست آوردن مقدار ویژه‌ی ماتریس A (λ_{max}): گام اول ضرب بردار W در ماتریس A است تا تخمین مناسبی از W λ_{max} به دست آید ($A.W=\lambda_{max}W$). گام بعدی تقسیم مقادیر به دست آمده برای W λ_{max} بر W مربوطه است تا λ_{max} به دست آید. مقدار متوسط λ_{max}های به دست آمده، برابر با λ_{max} خواهد بود.

ب) مقدار شاخص ناسازگاری [۱۰] (I.I.) از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$I.I.=\frac{\lambda max - n}{n-1} \qquad (۱)$$

ج) نرخ ناسازگاری [۱۱] (I.R.) از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$I.R.=\frac{I.I.}{I.I.R} \qquad (۲)$$

شاخص ناسازگاری برای ماتریس‌هایی که اعداد آنها کاملاً تصادفی اختیار شده باشد، محاسبه و شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی [۱۲] (I.I.R) نامیده می‌شود که مقادیر آنها برای ماتریس‌های n بعدی در جدول ۴ ارائه شده است.

براساس مبانی AHP، اگر نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری سیستم قابل قبول است، در غیر این‌صورت باید در قضاوت‌ها تجدید نظر کرد.[۷]

جدول ۴. شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی.[۸]

n	I.I.R
۱	۰
۲	۰
۳	۰/۵۸
۴	۰/۹
۵	۱/۱۲
۶	۱/۲۴
۷	۱/۳۲
۸	۱/۴۱
۹	۱/۴۵
۱۰	۱/۴۵

نتایج و بحث

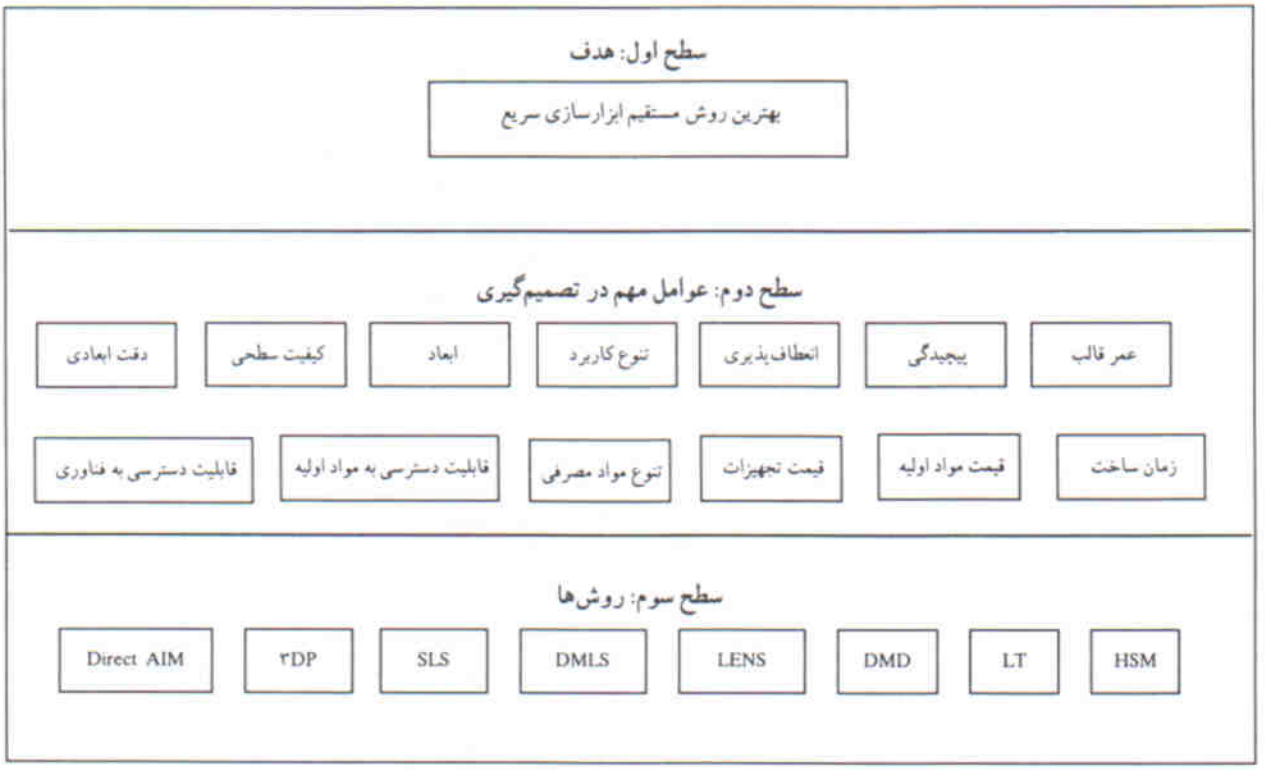
شکل ۲ نمودار سلسله‌مراتبی مورد استفاده برای ارزیابی و انتخاب فرایند مستقیم ابزارسازی سریع را نشان می‌دهد. هدف در این سلسله‌مراتب، پیش‌بینی بهترین فرایند مستقیم ابزارسازی سریع برای یک سیستم است که در سطح اول نمایش داده شده است. در سطح دوم سیزده معیار مسئله شامل دقت ابعادی، کیفیت سطحی، تنوع مواد مصرفی، تنوع کاربرد، ابعاد، پیچیدگی، عمر قالب، قابلیت دسترسی به فناوری، قابلیت دسترسی به مواد اولیه، انعطاف‌پذیری، زمان ساخت، قیمت تجهیزات و قیمت مواد اولیه قرار داده می‌شوند. در سطح آخر نیز گزینه‌ها یعنی روش‌های مختلف ابزارسازی سریع به‌طریقه‌ی مستقیم جا می‌گیرند.

در این پژوهش فناوری‌های قالب‌گیری تزریقی مستقیم (Direct AIM)، چاپ سه‌بعدی (3DP)، تف‌جوشی انتخابی لیزری (SLS)، تف‌جوشی مستقیم لیزری (DMLS)، شکل‌دهی دقیق توسط لیزر (LENS)، رسوب‌دهی مستقیم فلز (DMD)، ابزارسازی لایه‌یی (LT)، و ماشین‌کاری با سرعت بالا (HSM) با مشخصات مندرج در جدول ۲ به‌عنوان مطالعه‌ی موردی برای واحد نمونه‌سازی شرکت ساپکو در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از اعمال روش AHP به شرح زیر ارائه می‌شوند:

در جدول‌های ۵ تا ۱۷ مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به هرکدام از معیارها ارائه شده است. برای مثال، در اینجا نحوه‌ی به دست آمدن این ماتریس نسبت به معیار دقت ابعادی توضیح داده می‌شود (جدول ۵).

در میان روش‌های مستقیم ابزارسازی، روش HSM از بیشترین دقت ابعادی و روش LT از کم‌ترین دقت ابعادی برخوردارند. بنابراین از لحاظ معیار دقت ابعادی، روش HSM نسبت به روش LT کاملاً مرجح است و مطابق جدول ۳ مقدار عددی این قضاوت ۹ در نظر گرفته می‌شود. همچنین روش‌های Direct AIM، 3DP، SLS، DMLS، LENS، DMD از نظر دقت ابعادی به‌ترتیب بین روش‌های HSM و LT قرار دارند و بنابراین ارجحیت روش HSM بر آنها به ترتیب ۲، ۴، ۵، ۵، ۶ و ۶ منظور می‌شود. باید توجه داشت که در مقایسه‌ی دوتایی، ترجیح هر عنصر بر خودش برابر یک است. بنابراین، تمام عناصر روی قطر ماتریس مقایسه‌ی دوتایی برابر با یک هستند.

نکته‌ی قابل توجه دیگر این که در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی اگر ترجیح روش A بر روش B نسبت به یک معیار برابر با n باشد، ترجیح روش B بر روش A برابر با $\frac{1}{n}$ خواهد بود. مثلاً، ترجیح روش



شکل ۲. نمایش گرافیکی سلسله‌مراتب مورد استفاده در این تحقیق برای ارزیابی انتخاب فرایند مستقیم ابزارسازی سریع.

جدول ۵. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار دقت ابعادی.

دقت ابعادی	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۶	۱/۲
3DP	۱/۲	۱	۲	۲	۳	۳	۴	۱/۴
SLS	۱/۳	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۴	۱/۵
DMLS	۱/۳	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۴	۱/۵
LENS	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۳	۱/۶
DMD	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۳	۱/۶
LT	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱	۱/۹
HSM	۲	۴	۵	۵	۶	۶	۹	۱

λ_{max}=۸/۲۲ I.I=۰/۰۳۱ I.R.=۰/۰۲۲

جدول ۶. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار کیفیت سطحی.

کیفیت سطحی	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۲	۴	۴	۵	۵	۶	۱/۲
3DP	۱/۲	۱	۲	۲	۳	۳	۴	۱/۴
SLS	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۳	۱/۶
DMLS	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۳	۱/۶
LENS	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۱/۷
DMD	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۱/۷
LT	۱/۶	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۹
HSM	۲	۴	۶	۶	۷	۷	۹	۱

λ_{max}=۸/۱۲۴۶ I.I=۰/۰۱۸ I.R.=۰/۰۱۳

جدول ۷. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار تنوع مواد مصرفی.

تنوع مواد مصرفی	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱/۴	۱/۶	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱
3DP	۴	۱	۱/۲	۴	۳	۳	۲	۴
SLS	۶	۲	۱	۶	۵	۵	۳	۶
DMLS	۱	۱/۴	۱/۶	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱
LENS	۲	۱/۳	۱/۵	۲	۱	۱	۱/۲	۲
DMD	۲	۱/۳	۱/۵	۲	۱	۱	۱/۲	۲
LT	۳	۱/۲	۱/۳	۳	۲	۲	۱	۳
HSM	۱	۱/۴	۱/۶	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱

λ_{max}=۸/۰۷۳۱ I.I=۰/۰۱ I.R.=۰/۰۰۷

جدول ۸. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار ابعاد قالب.

ابعاد	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۶	۱/۳
3DP	۱	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۶	۱/۳
SLS	۱	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۶	۱/۳
DMLS	۱	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۶	۱/۳
LENS	۲	۲	۲	۲	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۲
DMD	۳	۳	۳	۳	۲	۱	۱/۳	۱
LT	۶	۶	۶	۶	۴	۳	۱	۳
HSM	۳	۳	۳	۳	۲	۱	۱/۳	۱

λ_{max}=۸/۰۴۱۳ I.I=۰/۰۰۶ I.R.=۰/۰۰۴

جدول ۹. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار پیچیدگی.

پیچیدگی	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱
3DP	۴	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۴
SLS	۴	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۴
DMLS	۴	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۴
LENS	۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۳
DMD	۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۳
LT	۲	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۲
HSM	۱	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱

λ_{max}=۸/۰۶۱۶ I.I=۰/۰۰۸ I.R.=۰/۰۰۶

جدول ۱۰. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار تنوع کاربرد.

تنوع کاربرد	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱/۴
3DP	۲	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۲
SLS	۲	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۲
DMLS	۲	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۲
LENS	۴	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱
DMD	۴	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱
LT	۲	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۲
HSM	۴	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱

λ_{max}=۸/۰۰۰ I.I=۰/۰۰۰ I.R.=۰/۰۰۰

جدول ۱۱. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار عمر قالب.

عمر قالب	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶
3DP	۲	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴
SLS	۳	۲	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
DMLS	۳	۲	۱	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
LENS	۶	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۱
DMD	۶	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۱
LT	۶	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۱
HSM	۶	۴	۲	۲	۱	۱	۱	۱

λ_{max}=۸/۰۰۷۸ I.I=۰/۰۰۱ I.R.=۰/۰۰۱

جدول ۱۲. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار قابلیت دسترسی به فناوری.

قابلیت دسترسی به فناوری	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
3DP	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
SLS	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMLS	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LENS	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMD	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LT	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
HSM	۱/۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

λ_{max}=۸/۰۰۰ I.I=۰/۰۰۰ I.R.=۰/۰۰۰

جدول ۱۳. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار قابلیت دسترسی به مواد اولیه.

قابلیت دسترسی به مواد اولیه	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
3DP	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
SLS	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMLS	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LENS	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMD	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LT	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
HSM	۱/۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

λ_{max}=۸/۰۷۲۹ I.I=۰/۰۱ I.R.=۰/۰۰۷

جدول ۱۴. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار انعطاف‌پذیری.

انعطاف‌پذیری	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱	۱	۱	۱		۱	۳
3DP	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
SLS	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
DMLS	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
LENS	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
DMD	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
LT	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
HSM	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱

λ_{max}=۸/۰۰۰ I.I=۰/۰۰۰ I.R.=۰/۰۰۰

جدول ۱۵. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار زمان ساخت.

زمان ساخت	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۳	۴	۴	۵	۵	۷	۸
3DP	۱/۳	۱	۲	۲	۳	۳	۵	۶
SLS	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۳	۵
DMLS	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۲	۲	۳	۵
LENS	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۴
DMD	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۱	۲	۴
LT	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱	۲
HSM	۱/۸	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱

λ_{max}=۸/۱۷۶۶ I.I=۰/۰۲۵ I.R.=۰/۰۱۷۸

جدول ۱۶. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار قیمت تجهیزات.

قیمت تجهیزات	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۴	۳
3DP	۱/۳	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۱/۲
SLS	۱/۲	۳	۱	۱	۲	۳	۴	۲
DMLS	۱/۲	۳	۱	۱	۲	۳	۴	۲
LENS	۱/۲	۲	۱/۲	۱/۲	۱	۲	۳	۲
DMD	۱/۳	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۱/۲
LT	۱/۴	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۱/۳
HSM	۱/۳	۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۲	۳	۱

λ_{max}=۸/۱۷۴۹ I.I=۰/۰۲۵ I.R.=۰/۰۱۷۷

جدول ۱۷. مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به معیار قیمت مواد اولیه.

قیمت مواد اولیه	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
Direct AIM	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳
3DP	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
SLS	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMLS	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LENS	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
DMD	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
LT	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
HSM	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

λ_{max}=۸/۰۰۰ I.I=۰/۰۰۰ I.R.=۰/۰۰۰

Direct AIM بر روش DMLS برابر با ۳ است، در نتیجه ترجیح روش DMLS بر روش Direct AIM برابر با ۰/۳۳ خواهد بود. به‌همین ترتیب، پس از مقایسه‌ی سایر روش‌ها نسبت به یکدیگر، برای معیار دقت ابعادی جدول ۵ تکمیل می‌شود. به‌همین روش، مقایسه‌ی دوتایی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع نسبت به سایر معیارها انجام شده است (جداول ۶ تا ۱۷). همچنین جدول ۱۸ نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی دوتایی معیارهای مؤثر بر فرایند است. شایان ذکر است اعداد ذکر شده در این جدول‌ها با بهره‌گیری از تجربه‌ی نویسندگان، و تحقیقات صورت‌گرفته در واحد نمونه‌سازی شرکت ساپکو به دست آمده‌اند.

جدول ۱۸. ماتریس مقایسه‌ی دوتایی معیارهای سیزده‌گانه مهم مؤثر بر فرایند سنجش.

پارامترها	دقت ابعادی	کیفیت سطحی	تنوع مواد مصرفی	ابعاد	پیچیدگی	تنوع کاربرد	عمر قالب	قابلیت دسترسی‌به فناوری	قابلیت دسترسی‌به مواد اولیه	انعطاف پذیری	زمان ساخت	قیمت تجهیزات	قیمت مواداولیه
دقت ابعادی	۱	۱	۶	۷	۲	۶	۲	۵	۸	۳	۲	۴	۸
کیفیت سطحی	۱	۱	۶	۷	۲	۶	۲	۵	۸	۳	۲	۴	۸
تنوع موادمصرفی	۱/۶	۱/۶	۱	۲	۱/۴	۱	۱/۵	۱/۲	۲	۱/۳	۱/۴	۱/۲	۲
ابعاد	۱/۷	۱/۷	۱/۲	۱	۱/۵	۱/۲	۱/۶	۱/۲	۲	۱/۴	۱/۵	۱/۳	۲
پیچیدگی	۱/۲	۱/۲	۴	۵	۱	۴	۱/۲	۳	۶	۲	۱	۲	۶
تنوع کاربرد	۱/۶	۱/۶	۱	۲	۱/۴	۱	۱/۵	۱/۲	۲	۱/۳	۱/۴	۱/۲	۲
عمرقالب	۱/۲	۱/۲	۵	۶	۲	۵	۱	۴	۷	۲	۲	۳	۷
قابلیت دسترسی به فناوری	۱/۵	۱/۵	۲	۲	۱/۳	۲	۱/۴	۱	۳	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۲
قابلیت دسترسی به مواد اولیه	۱/۸	۱/۸	۱/۲	۱/۲	۱/۶	۱/۲	۱/۷	۱/۳	۱	۱/۵	۱/۶	۱/۴	۱
انعطاف پذیری	۱/۳	۱/۳	۳	۴	۱/۲	۳	۱/۲	۲	۵	۱	۱/۲	۲	۵
زمان ساخت	۱/۲	۱/۲	۴	۵	۱	۴	۱/۲	۳	۶	۲	۱	۲	۶
قیمت تجهیزات	۱/۴	۱/۴	۲	۳	۱/۲	۲	۱/۳	۲	۴	۱/۲	۱/۲	۱	۴
قیمت مواد اولیه	۱/۸	۱/۸	۱/۲	۱/۲	۱/۶	۱/۲	۱/۷	۱/۲	۱	۱/۵	۱/۶	۱/۴	۱

$I.R.=۰/۰۷$ $I.I=۱۰۲$ $\lambda_{max}=۱۴/۲۲$

جدول ۱۹. وزن نسبی روش‌های مستقیم ابزارسازی سریع، نسبت به معیارهای سیزده‌گانه‌ی مهم مؤثر بر فرایند سنجش.

	Direct AIM	3DP	SLS	DMLS	LENS	DMD	LT	HSM
دقت ابعادی	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۳۶
کیفیت سطحی	۰/۲۳	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۳۸
تنوع مواد مصرفی	۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۴
ابعاد	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۶	۰/۳۷	۰/۱۶
پیچیدگی	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۴
تنوع کاربرد	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹۰	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۱۹
عمر قالب	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸
قابلیت دسترسی به فناوری	۰/۵۳	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
قابلیت دسترسی به مواد اولیه	۰/۵۳	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
انعطاف‌پذیری	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۴
زمان ساخت	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۲
قیمت تجهیزات	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱
قیمت مواد اولیه	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳

وزن نسبی هر یک از گزینه‌ها نسبت به معیارها و وزن نسبی معیارها به‌روش میانگین هندسی تعیین شدند که نتایج حاصل به ترتیب در جداول ۱۹ و ۲۰ ارائه شده است. برای مثال، در اینجا نحوه‌ی به‌دست آمدن وزن نسبی هر کدام از روش‌ها نسبت به معیار دقت ابعادی توضیح داده می‌شود. میانگین هندسی بردار وزن نسبت به معیار دقت ابعادی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \sqrt[8]{1\times2\times3\times3\times4\times4\times6\times\frac{1}{2}} = 2/33 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{2}\times1\times2\times2\times3\times3\times4\times\frac{1}{4}} = 1/43 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{3}\times\frac{1}{2}\times1\times1\times2\times2\times4\times\frac{1}{5}} = 0/92 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{3}\times\frac{1}{2}\times1\times1\times2\times2\times4\times\frac{1}{5}} = 0/92 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{4}\times\frac{1}{3}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times1\times1\times3\times\frac{1}{6}} = 0/56 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{4}\times\frac{1}{3}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times1\times1\times3\times\frac{1}{6}} = 0/56 \\ \sqrt[8]{\frac{1}{6}\times\frac{1}{4}\times\frac{1}{4}\times\frac{1}{3}\times1\times\frac{1}{4}} = 0/27 \\ \sqrt[8]{2\times4\times4\times5\times5\times6\times6\times9\times1} = 3/99 \end{bmatrix}$$

وزن نسبی روش‌ها نسبت به معیار دقت ابعادی از نرمالیزه کردن ماتریس ستونی فوق به دست می‌آید (ستون اول جدول ۱۹):

$$W=\begin{bmatrix} 0/21 \\ 0/13 \\ 0/08 \\ 0/08 \\ 0/05 \\ 0/05 \\ 0/02 \\ 0/36 \end{bmatrix}$$

وزن نسبی هر یک از گزینه‌ها نسبت به سایر معیارها، و وزن نسبی معیارها نسبت به یکدیگر به همین صورت تعیین شدند (جداول ۱۹ و ۲۰). سپس با استفاده از این نتایج، وزن نهایی هر گزینه ــ که

جدول ۲۰. وزن نسبی معیارها.

معیار	وزن نسبی
دقت ابعادی	0/186
کیفیت سطحی	0/186
تنوع مواد مصرفی	0/029
ابعاد	0/022
پیچیدگی	0/104
تنوع کاربرد	0/029
عمر قالب	0/139
قابلیت دسترسی به فناوری	0/039
قابلیت دسترسی به مواد اولیه	0/016
انعطاف‌پذیری	0/074
زمان ساخت	0/104
قیمت تجهیزات	0/055
قیمت مواد اولیه	0/017

جدول ۲۱. وزن نهایی گزینه‌ها.

فرایند	وزن نهایی
Direct AIM	0/187
3DP	0/123
SLS	0/113
DMLS	0/104
LENS	0/093
DMD	0/091
LT	0/078
HSM	0/193

مجموع حاصل‌ضرب وزن نسبی هر معیار در وزن نسبی گزینه‌ی مربوط به آن معیار است ــ محاسبه شد، (جدول ۲۱). مثلاً، وزن نهایی در روش Direct AIM به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$0/186\times0/21+0/186\times0/23+0/029\times0/05+0/022\times$$
$$0/05+0/104\times0/05+0/029\times0/05+0/139\times0/03+$$
$$0/039\times0/53+0/016\times0/53+0/074\times0/14+0/104\times$$
$$0/37+0/055\times0/25+0/017\times0/04=0/187$$

برای تعیین میزان ناسازگاری، مقادیر λ_{max}، I.I و I.R. برای هر جدول محاسبه، و در زیر آن آورده شده است. مثلاً، این مقادیر برای جدول ۵ به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$A.W=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 & 6 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 1/4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 4 & 1/5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 4 & 1/5 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 3 & 1/6 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/9 \\ 2 & 4 & 5 & 5 & 6 & 6 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0/21 \\ 0/13 \\ 0/08 \\ 0/08 \\ 0/05 \\ 0/05 \\ 0/02 \\ 0/36 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/65 \\ 1/025 \\ 0/647 \\ 0/647 \\ 0/396 \\ 0/396 \\ 0/201 \\ 2/88 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{max}= \begin{bmatrix} \frac{۱/۶۵}{۰/۲۱} \\ \frac{۱/۰۲۵}{۰/۱۳} \\ \frac{۰/۶۴۷}{۰/۰۸} \\ \frac{۰/۶۴۷}{۰/۰۸} \\ \frac{۰/۳۹۶}{۰/۰۵} \\ \frac{۰/۳۹۶}{۰/۰۵} \\ \frac{۰/۲۰۱}{۰/۰۲} \\ \frac{۲/۸۸}{۰/۳۶} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ۷/۸۵۷ \\ ۷/۸۸۵ \\ ۸/۰۸۷ \\ ۸/۰۸۷ \\ ۷/۹۲ \\ ۷/۹۲ \\ ۱۰/۰۵ \\ ۸ \end{bmatrix}$$

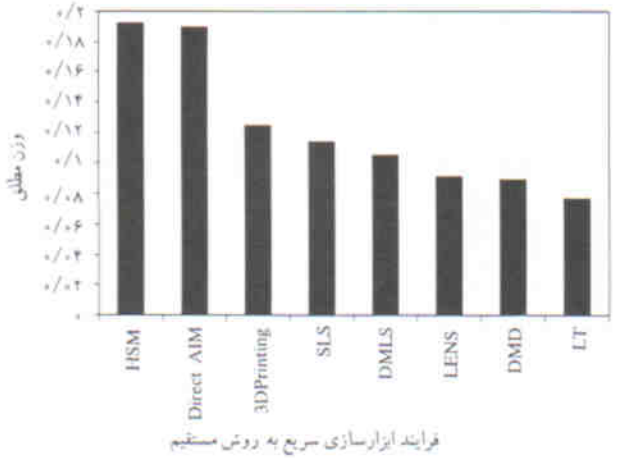
مقدار λ_{max} میانگین مقادیر فوق بوده و برابر است با ۸/۲۲.

$$I.I.=\frac{۸/۲۲-۸}{۸-۱}=۰/۰۳۱$$

$$I.R.=\frac{۰/۰۳۱}{۱/۴۱}=۰/۰۲۲$$

چنان‌که از این جداول بر می‌آید، نرخ ناسازگاری در تمامی محاسبات ارائه شده کم‌تر از ۰/۱ است و لذا سازگاری سیستم قابل قبول است.

در شکل ۳ وزن‌های مطلق فرایندهای مستقیم ابزارسازی سریع نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید، فرایندهای ماشین‌کاری با سرعت بالا (HSM) و Direct AIM نسبت به سایر روش‌ها برای سرمایه‌گذاری از اهمیت و ارجحیت بیشتری برخوردارند. مهم‌ترین مزیت فرایند HSM کیفیت سطحی خوب و دقت ابعادی بالا نسبت به سایر روش‌ها است. همچنین تولید قطعات با ابعاد مختلف، عمر زیاد قالب‌های تولیدی و تنوع محصولات تولیدی از سایر مزایای این فرایند به حساب می‌آیند. اما، مدت زمان ساخت نسبتاً طولانی مهم‌ترین نقص این فرایند است. در ضمن، قطعات با اشکال پیچیده را نمی‌توان با این روش تولید کرد. به هر روی، نتایج مطالعه توسط تحلیل سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد که این فناوری در حال حاضر برای شرکت ساپکو می‌تواند مفیدتر باشد. مهم‌ترین مزیت فرایند Direct AIM دسترسی به دستگاه استریولیتوگرافی و مواد اولیه در واحد نمونه‌سازی شرکت ساپکو



شکل ۳. مقایسه‌ی وزن مطلق فرایندهای مستقیم ابزارسازی سریع.

است که‌نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید تجهیزات گران‌قیمت را برطرف می‌سازد. همچنین انعطاف‌پذیری فرایند و زمانِ ساختِ کم از سایر مزایای این روش است. اما از طرف دیگر، عمر کم قالب و پیچیدگی کم قطعات تولیدی از مهم‌ترین معایب این فرایند است. برایند این عوامل نشان‌گر آن است که این فرایند از لحاظ اقتصادی می‌تواند بسیاری از نیازهای شرکت را مرتفع کند. فرایندهای 3DP و SLS پس از دو فرایند مذکور در اولویت‌های بعدی قرار دارند و در آینده می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. تنوع مواد مصرفی و قابلیت تولید محصولاتی با پیچیدگی بالا از مهم‌ترین مزایای این دو فرایند هستند که آنها را در اولویت قرار می‌دهد.

به هر حال، این عملیات به‌صورت تحلیلی و مطالعه‌ی موردی برای شرکت ساپکو انجام شده است، ولی می‌توان از آن برای ارزیابی این فناوری در سطح گسترده‌تر و برای کشور نیز استفاده کرد. در اینجا باید توجه داشت که می‌توان این عملیات را برای یک قطعه‌ی خاص با مشخصات و ویژگی‌های تعریف شده نیز انجام داد تا نتایج بهتری به دست آید. ولی باید دقت داشت که خرید تجهیزات نمی‌تواند تنها به یک قطعه‌ی خاص محدود شود و می‌بایست در سطح وسیع‌تر انجام شود. در این نوشتار با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی این کلیت به بحث و بررسی گذاشته شده است.

نتیجه‌گیری

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها در مسائل تصمیم‌گیری است. در این مقاله فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین فرایند ابزارسازی سریع به‌روش مستقیم مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با استفاده از این روش می‌توان با تقریب خوبی

اولویت‌های سرمایه‌گذاری را سنجید تا ریسک سرمایه‌گذاری کاهش یابد.

برای نمونه و به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، این عملیات برای واحد نمونه‌سازی شرکت ساپکو انجام شد. نتایج حاصل از اعمال روش AHP نشان می‌دهد که با توجه به نیازهای این واحد، به ترتیب فرایندهای ماشین‌کاری با سرعت بالا (HSM)، Direct AIM و 3DP در بین فرایندهای مختلف برای سرمایه‌گذاری از ارجحیت بیشتری برخوردارند.

پانوشت

1. rapid prototyping
2. rapid tooling
3. Analytic Hierarchy Process (AHP)
4. electro-discharge machining
5. rapid prototyping, rapid tooling and rapid manufacturing
6. stereolithography
7. T.L. Saaty
8. local priority
9. overall priority
10. inconsistency index
11. inconsistency raito
12. inconsistency index of random matrix

منابع

1. Kai, C.C. and Fai, L.K. "Rapid prototyping: principles and application in manufacturing", John Wiley & Sons, Inc., Singapore (1997).
2. Muller, H. and Schimmel, A. "The decision dilemma assessment and selection of rapid prototyping process chains", 8th European Conf., Bringham, UK, pp 177-191 (1999).
3. Chua, C.K. Hong, K.H. and Ho, S.L. "Rapid tooling technology., Part 1: A comparative study", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **15**, pp 604-608 (1999).
4. Wohlers, T. in: *Proceedings of the uRapid Conference on Rapid Technologies Worldwide*, Berlin, Germany, pp 224-229 (2000).
5. Hague, R.J.M. and Reeves, P.E. "Rapid prototyping, tooling and manufacturing", Rapra Review Reports, **10** (9), (2000).
6. Saaty, T.L. "The analytic hierachy process", McGraw-Hill, NewYork (1980).
7. قدسی‌پور، سیدحسن. «فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)»، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (۱۳۸۱).
8. Triantaphyllou, E. and Mann, S.H. "Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges", *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, **2** (1), pp 35-44 (1995).