



## بررسی و تحلیل تجربی اثر ضخامت پوسته و جهت ساخت بر روی دقت ابعاد خارجی قطعات ساخته شده به روش FDM و ارائه‌ی مدل پیش‌بینی خطا

ایمان عموهادی<sup>۱</sup>، احسان فروزمهر<sup>۲\*</sup>، محسن بدرسمای<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* eforoozmehr@cc.iut.ac.ir ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

### چکیده

فرآیند FDM یکی از روش‌های ساخت افزودنی است که قطعات سه بعدی از جنس پلیمری را مستقیماً توسط اکستروژن ماده‌ی خام نیمه مذاب از درون یک نازل بر روی صفحه‌ی ساخت و به صورت لایه به لایه تولید می‌کند. مزیت‌های منحصر به فرد نظیر سادگی عملکرد، سرعت تولید بالا و هزینه‌های بسیار پایین (در مقایسه با دیگر روش‌های ساخت افزودنی) باعث شده که این فرآیند در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گیرد. با این حال یکی از چالش‌های مهم فرآیند که تحت تأثیر پارامترهای فرآیند قرار دارد، اختلاف در دقت ابعادی بین مدل طراحی شده و قطعه‌ی ساخته شده می‌باشد. در این تحقیق دو پارامتر مهم تأثیر گذار ضخامت پوسته و جهت ساخت قطعه بر دقت ابعاد خارجی مدنظر قرار گرفته و با طراحی و ساخت قطعات محک‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی خطا و جبران خطا ارائه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت پوسته باعث کاهش دقت ابعادی و جهت ساخت ۴۵° بیشترین دقت ابعادی را دارد.

کلید واژگان: فرآیند ساخت افزودنی، فرآیند FDM، دقت ابعادی در FDM، ضخامت پوسته، جهت ساخت

## Experimental analysis of the effects of contour width and built orientation on dimensional accuracy of FDM made parts and introducing an error prediction model

Iman Amouhadi, Ehsan Foroozmehr\*, Mohsen Badrossamay

Department of Mechanical Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

### ABSTRACT

FDM process is a kind of additive manufacturing method for constructing three-dimensional parts made of semi molten polymer directly by extruding the raw material through a nozzle on the platform in a layer-by-layer fashion. Unique advantages such as simplicity of operation, high production rate and low cost (compared with other methods of AM) makes the process very attractive in recent years. The deviation of the dimensions of the parts from their corresponding CAD models is greatly affected by the process parameters. In this study, the effects of two parameters of contour width and built orientation on the exterior dimensional accuracy were analyzed by a prediction and compensation error model. The results show that the increase in contour width reduces the dimensional accuracy and the built orientation of 45° has the highest dimensional accuracy.

**Keywords:** Additive Manufacturing process, FDM process, dimensional accuracy, contour width, orientation.

می‌باشد [۳-۶]. در فرآیند FDM با اعمال نیروی پیشران، ماده‌ی خام به درون محفظه‌ی اکستروژن فرستاده می‌شود. سپس گرم کننده‌های تعبیه شده در بدنه‌ی نازل، ماده پلیمری را گرم و به حالت نیمه مذاب تبدیل کرده و مذاب تحت فشار مناسب و به‌صورت رشته از دهانه‌ی نازل که توانایی حرکت در صفحه (صفحه‌ی X-Y) را دارد، خارج می‌شود. رشته‌های ایجاد شده با توجه به شکل هندسی مورد نظر در هر لایه بر روی صفحه ساخت و در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک لایه را تشکیل می‌دهند. پس از پایان عملیات ساخت یک لایه، صفحه‌ی ساخت به اندازه‌ی ضخامت یک لایه و در امتداد محور عمودی (محور Z) به طرف پایین حرکت کرده و عملیات ساخت لایه‌ی جدید بر روی لایه‌ی قبلی آغاز می‌شود. این فرآیند ساخت لایه به لایه تا تکمیل شدن ساخت مدل سه بعدی ادامه پیدا خواهد کرد [۳، ۴، ۷]. گاهی اوقات هندسه‌ی قطعه‌ی موردنظر به گونه‌ای طراحی

### ۱- مقدمه

فرآیند ساخت افزودنی<sup>۱</sup> یکی از انواع روش‌های جدید تولید برای ساخت لایه به لایه‌ی قطعات با استفاده از مدل سه بعدی کامپیوتری<sup>۲</sup> و با شکل هندسی دلخواه می‌باشد [۱]. یکی از پرکاربردترین و شناخته شده‌ترین فرآیندهای ساخت افزودنی که بر مبنای اکستروژن ماده می‌باشد، فرآیند FDM<sup>۳</sup> است [۲، ۱]. ماده‌ی خام مورد استفاده در این فرآیند به صورت سیم<sup>۴</sup> و از جنس پلیمرهای ترموپلاستیک نظیر<sup>۵</sup> ABS، PLA<sup>۶</sup> و PC<sup>۷</sup>

1. Additive Manufacturing
2. 3D CAD
3. Fused Deposition Modeling
4. Filament
5. Acrylonitrile butadiene styrene
6. Polylactic acid
7. Polycarbonate

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

I. Amouhadi, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, Experimental analysis of the effects of contour width and built orientation on dimensional accuracy of FDM made parts and introducing an error prediction model, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 455-459, 2015 (in Persian فارسی)

ساخت مختلف بر روی دقت ابعادی نمونه‌های تست کشش، بهترین جهت ساخت (جهت ساخت  $45^\circ$ ) را برای تولید این قطعات پیشنهاد نمودند [۸]. محمد الهیبل با طراحی و ساخت قطعات محک‌سنجی با ویژگی‌های هندسی رایج به بهینه‌سازی پارامترهای ضخامت لایه، فضای خالی بین رشته‌ها، عرض رشته‌ها، ضخامت پوسته و جهت رشته‌ها پرداخته است [۴]. نگرش جبران خطا بر خلاف نگرش قبلی، به دنبال پیدا کردن منابع خطا نمی‌باشد، بلکه بدون توجه به منابع خطای موجود سعی در جبران خطا و بهبود دقت ابعادی را دارد [۲]. این نگرش به میزان بیشتری نسبت به نگرش قبلی، خطا را کاهش می‌دهد و پژوهش‌های کمتری در حوزه این نگرش انجام شده است. کان تانگ با استفاده از قطعات محک‌سنجی استوانه‌ای و بدست آوردن انحراف مراکز هر یک از آن‌ها نسبت به مقدار نامی‌شان یک مدل کلی ریاضی خطا برای جبران خطاهای نرم افزاری و سیستمی ارائه داده است [۲]. گرگورین و همکاران با تولید و اندازه‌گیری قطعات محک‌سنجی با ویژگی‌های هندسی رایج یک مدل برای جبران خطا و بهبود دقت ابعادی قطعات در فرآیند FDM پیشنهاد نمودند [۱۰].

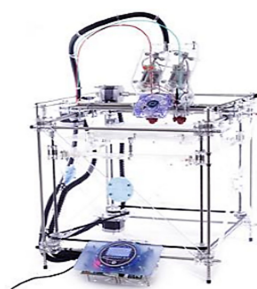
با توجه به مطالب بیان شده، مقاله‌ی پیش رو با استفاده از طراحی و تولید قطعات محک‌سنجی متفاوت و دقیق‌تر به بررسی و تحلیل دقیق پارامترهای مهم ضخامت پوسته و جهت ساخت پرداخته است. هم چنین در نهایت با بررسی و تحلیل اندازه‌ها و نمودارهای به‌دست آمده یک مدل ریاضی پیش‌بینی و جبران خطا پیشنهاد خواهد شد.

## ۲- مراحل انجام کار

برای بررسی اثر ضخامت پوسته و جهت ساخت بر روی دقت ابعادی و هم چنین به منظور پیش‌بینی و جبران خطا، ابتدا به طور جداگانه قطعات محک‌سنجی مناسب با استفاده از نرم‌افزار سالیید و مرکز طراحی شده‌اند. سپس فایل STL مربوط به هر یک از قطعات برای ساخت آن‌ها استخراج و به دستگاه منتقل گردید. ساخت تمام قطعات محک‌سنجی مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از دستگاه RapMan3.2 (ساخت شرکت 3D Systems) نشان داده شده در شکل ۲ و از جنس پلیمر ABS و با پارامترهای پیش‌فرض صورت گرفته است.

جدول ۱ مقادیر پیش‌فرض پارامترهای فرآیند ساخت قطعات را نشان می‌دهد.

در هر قسمت پس از تولید قطعات محک‌سنج، اندازه‌گیری‌های لازم بر روی هر یک از آن‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال انجام شده است. سپس اندازه‌های بدست آمده در هر قسمت وارد نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> شده و محاسبه‌ی میانگین، انحراف معیار و رسم نمودارها توسط آن انجام پذیرفته است.

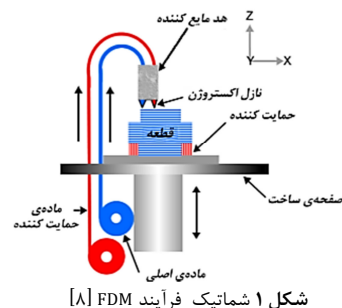


شکل ۲ دستگاه RapMan3.2

شده که نیاز به حمایت‌کننده‌هایی<sup>۱</sup> برای جلوگیری از فروریزی مواد در برخی از نقاط می‌باشد. به‌طوری که این حمایت‌کننده‌ها در عملیات‌های نهایی به صورت مکانیکی (مانند سنگ زدن) یا شیمیایی (حل کردن در محلول‌ها) از قطعه‌ی اصلی جدا خواهد شد [۱]. شکل ۱ شماتیک از فرآیند FDM را نشان می‌دهد.

ویژگی‌هایی مانند: فرآیند ساخت ساده، استفاده از گستره‌ی وسیعی از مواد پلیمری با پایداری و طول عمر بالا، ساخت قطعات و نمونه‌های پیچیده با صرف کمترین هزینه و زمان، هزینه‌ی پایین تعمیر و نگهداری [۵،۴] باعث شده فرآیند FDM در زمینه‌های مختلفی مانند پزشکی، خودروسازی، هوا و فضا و نظامی مورد استفاده قرار گیرد. اما این فرآیند با یک سری چالش‌هایی مانند استحکام، صافی سطح و تکرارپذیری قطعات ساخته شده روبرو می‌باشد [۲-۴]. یکی از چالش‌های مهم فرآیند FDM که مانع اصلی توسعه و پیشرفت بیشتر آن در تولید قطعات کاربردی و دقیق شده، دقت ابعادی است. به‌عبارت دیگر در این فرآیند بین دقت ابعادی قطعه‌ی ساخته شده و مدل کامپیوتری (مدل CAD) اختلافاتی وجود دارد [۸،۷،۲]. از جمله عوامل مهم و تاثیرگذار بر روی دقت ابعادی قطعات تولید شده در فرآیند FDM می‌توان به عوامل نرم‌افزاری (تبدیل مدل سه‌بعدی به فایل STL<sup>۲</sup>، تبدیل فایل STL به فایل برش لایه لایه) [۲،۳]، پارامترهای فرآیند (مانند جهت ساخت، ضخامت پوسته، جهت رشته‌ها و فضای خالی بین رشته‌ها) [۹،۸،۴]، جنس ماده [۶،۵]، هندسه قطعه کار و خطای سیستمی [۲] دستگاه اشاره کرد.

بررسی دقت ابعادی در فرآیند FDM می‌تواند دو رویکرد ارزیابی دقت و بهبود دقت را داشته باشد. در ارزیابی دقت، قطعات محک‌سنجی با ویژگی‌های هندسی موردنظر تولید و اندازه‌گیری‌های لازم بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. سپس اختلاف هر یک از اندازه‌ها با اندازه‌ی نامی آن‌ها محاسبه و دقت فرآیند ارزیابی می‌شود. اما در روش بهبود دقت، نگرش کلی بر مبنای بهبود دقت ابعادی به صورت اجتناب از خطا<sup>۳</sup> یا جبران خطا<sup>۴</sup> می‌باشد. نگرش اجتناب از خطا ابتدا سعی در شناسایی و پیدا کردن منابع خطا و سپس کاهش اثر آن‌ها را به منظور بهبود دقت ابعادی دارد [۷،۳،۲]. بیشتر پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی نگرش اجتناب از خطا به صورت شناسایی و بهینه‌سازی پارامترهای مهم فرآیند می‌باشد. داینش کومار و همکاران با تولید قطعات ساده‌ی محک‌سنجی مکعبی و با بهره بردن از روش تاگوچی به بهینه‌سازی پارامترهای ضخامت پوسته، جهت رشته‌ها، فضای خالی بین رشته‌ها پرداخته و دقت ابعادی قطعات تولید شده را بهبود بخشیدند [۹]. فیلیپ گورسکی و همکارانش با بررسی اثر جهات



شکل ۱ شماتیک فرآیند FDM [۸]

1. Support
2. Stereolithography
3. Error avoidance
4. Error compensation

عملیات تکمیلی و پرداخت کاری، اندازه‌گیری شدند. اضلاع خارجی هر مربع به ترتیب در جهات  $X$  و  $Y$  (اندازه‌های  $A$  و  $B$  در شکل ۴) و متناسب با طول ضلع مربع‌ها در چندین نقطه اندازه گرفته شدند. به‌عنوان مثال اندازه‌گیری هر ضلع مربع طراحی شده با اضلاع ۱۰ میلی‌متری در چهار نقطه، مربع با اضلاع ۲۰ میلی‌متری در ۶ نقطه و مربع با اضلاع ۱۰۰ میلی‌متری در ۸ نقطه انجام گردید. سپس مقادیر میانگین اندازه‌ها و انحراف‌های مربوطه نسبت به مدل سه بعدی کامپیوتری محاسبه و ذخیره گردیدند.

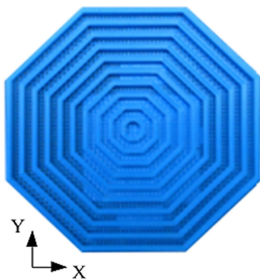
## ۲-۲- جهت ساخت

زاویه‌ای که یک مدل سه بعدی می‌تواند نسبت به محور  $X$ ،  $Y$  و یا  $Z$  داشته باشد، جهت ساخت نامیده می‌شود [۸]. به عنوان مثال زاویه  $\theta$  در شکل ۳ بیانگر جهت ساخت نسبت به محور  $X$  می‌باشد. به منظور بررسی اثر جهت ساخت مختلف  $0^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $90^\circ$  (نسبت به محور  $X$ ) بر روی دقت ابعاد خارجی و به طور همزمان در یک قطعه، قطعه‌ی محک‌سنجی نشان داده شده در شکل ۵ طراحی و تولید شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این قطعه شامل هشت ضلعی‌های منتظم تو در تو و با قطر دایره‌های محاطی  $10$  (mm) تا  $100$  (mm) و با فواصل  $10$  میلی‌متری می‌باشد. در مورد هر یک از هشت ضلعی‌های منتظم، اندازه‌گیری‌ها بر روی فاصله‌ی اضلاع خارجی موازی با یکدیگر در جهت مورد نظر و در امتداد طول اضلاع و در نقاط مختلف انجام شده‌اند. به طوری که اندازه‌گیری بر روی هر یک از هشت ضلعی‌ها با قطر دایره‌های محاطی  $40$  (mm) تا  $100$  (mm) در  $8$  نقطه، هشت ضلعی‌ها با قطر دایره‌های محاطی  $20$  (mm) و  $30$  (mm) در  $4$  نقطه و هشت ضلعی با قطر دایره محاطی  $10$  (mm) در  $3$  نقطه و در امتداد طول اضلاع آن‌ها به طور جداگانه در جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  تکرار شده است. در مورد هر یک از هشت ضلعی‌های منتظم، میانگین اندازه‌های بدست آمده مربوط به هر یک از فاصله‌ها به طور جداگانه در جهت  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  محاسبه شده و اختلاف هر یک از آن‌ها از اندازه‌ی نامی مربوطه در مدل اولیه‌ی CAD به‌دست آمده است.

## ۲-۳- جبران خطا

در این قسمت به منظور پیش بینی و جبران خطا ابتدا رفتار خطای ابعاد خارجی را بررسی و سپس براساس آن یک مدل ریاضی پیش‌بینی و جبران خطا پیشنهاد می‌شود. بدین منظور از قطعه‌ی محک‌سنجی طراحی شده در قسمت بررسی اثر ضخامت پوسته با ضخامت  $2$  (mm) (به دلیل اثر ضخامت پوسته بر روی دقت ابعادی) استفاده شده است. اندازه‌گیری بر روی ابعاد خارجی هر یک از مربع‌ها به طور جداگانه در جهات  $X$  و  $Y$  و در



شکل ۵ قطعه‌ی محک‌سنجی برای بررسی اثر جهت ساخت

مقادیر	نام پارامتر
۰/۲۵(mm)	ضخامت لایه
۱۰۰٪	چگالی پر کردن
۲	ضخامت پوسته
۲۶۰°C	دمای اکستروژن
۰/۶(mm)	عرض رشته
زیگزاگ	الگوی پر کردن

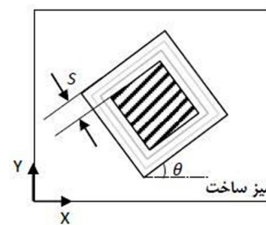
در ادامه به توضیح قطعات محک‌سنجی طراحی شده در هر قسمت و روش اندازه‌گیری آن‌ها می‌پردازیم.

## ۲-۱- ضخامت پوسته

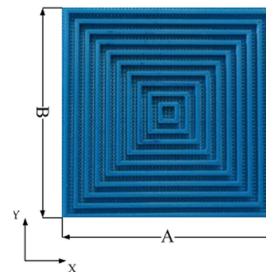
در فرآیند FDM برای افزایش دقت و کیفیت قطعه‌ی تولیدی در هر لایه معمولاً یک یا چند رشته به موازات مرز خارجی جسم ایجاد شده و سپس داخل مرز با استفاده از الگوهای مختلف (مانند زیگزاگ) پر خواهد شد. به ضخامت رشته‌های موازی با مرز خارجی جسم، ضخامت پوسته گفته می‌شود [۴]. شکل ۳ تصویری شماتیک از یک لایه‌ی در حال ساخت و الگوی ایجاد آن را روی میز ساخت دستگاه FDM نشان می‌دهد.

مطابق آنچه در شکل دیده می‌شود ضخامت پوسته ( $S$ ) برابر عرض رشته‌های موازی اکستروژن شده در مرزهای خارجی هر لایه بوده که می‌تواند از یک تا چند رشته را شامل گردد. به منظور مطالعه اثر ضخامت پوسته روی دقت قطعات ساخته شده توسط FDM، دو نمونه‌ی محک سنجی مطابق با هندسه نشان داده شده در شکل ۴ طراحی و ساخته شدند.

هریک از قطعات به صورت دیواره‌هایی با مقطع مربع‌های تو در تو و با ابعاد خارجی  $10$  (mm) تا  $100$  (mm) و با فواصل  $10$  میلی‌متری و ارتفاع  $2$  (mm) طراحی گردیدند. در نمونه اول ضخامت دیواره‌ها برابر  $2$  (mm) و یک رشته به عنوان پوسته در نظر گرفته شد. در حالی که نمونه‌ی دیگر حاوی سه رشته به‌عنوان ضخامت پوسته بوده و ضخامت دیواره برابر با  $2/6$  (mm) می‌باشد. ابعاد نمونه‌ها پس از تولید و بدون انجام هرگونه



شکل ۳ شماتیکی از یک لایه‌ی در حال ساخت



شکل ۴ قطعه‌ی محک‌سنجی برای بررسی اثر ضخامت پوسته

رشته‌های مجاور را به حالت نیمه مذاب درآورده و باعث اتصال رشته‌ها به یکدیگر و انعقاد مجدد آن‌ها به مقدار کم می‌شود. با توجه به این موضوع در قطعه‌ی محک‌سنجی با ضخامت ۲(mm) در هر لایه، خارجی‌ترین رشته فقط در تعدادی نقطه با رشته‌ی مجاور خود که الگوی زیگزاگ بوده در تماس است. اما در قطعه‌ی محک‌سنجی با ضخامت ۲/۶(mm) در هر لایه، خارجی‌ترین رشته با رشته‌ی مجاور خود در امتداد طول و به طور کامل در تماس می‌باشد. در نتیجه این امر باعث انعقاد مجدد بیشتر رشته‌ی خارجی در قطعه با ضخامت ۲/۶(mm) در هر لایه نسبت به قطعه‌ی دیگر با ضخامت ۲(mm) می‌شود. به‌طوری که انعقاد مجدد بیشتر به‌معنای کاهش اندازه‌ی رشته و کاهش دقت ابعادی به‌میزان بیشتر می‌باشد.

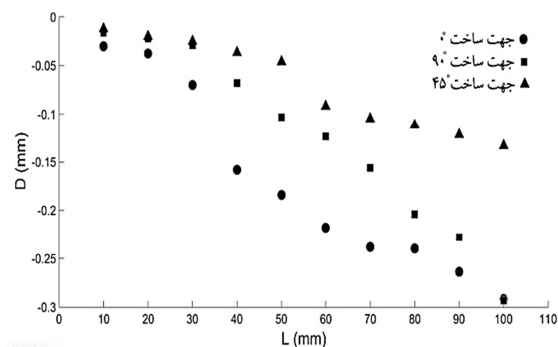
### ۳-۲- اثر جهت ساخت

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی قطعه‌ی محک‌سنجی مربوط به جهت ساخت، نتایج بر روی شکل ۸ که مقدار انحراف میانگین از اندازه‌ی نامی برای هر یک از ابعاد (D) را برحسب اندازه‌ی نامی‌شان (L) در سه جهت ۰°، ۴۵° و ۹۰° نشان می‌دهد، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار انحراف ابعاد و اندازه‌ها در جهت ۴۵° نسبت به جهت ۰° و ۹۰° کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر چون برای ساخت ابعاد و اندازه‌ها در جهت ساخت ۴۵° تعداد پالس‌های برابر در جهت X و Y از واحد کنترل به موتورها فرستاده می‌شود، در نتیجه این ابعاد و اندازه‌ها دارای خطای کمتری در این جهت نسبت به ساخت آن‌ها در جهت ۰° و ۹۰° می‌باشند.

### ۳-۳- پیش‌بینی و جبران خطا

پس از اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی قطعه‌ی محک‌سنجی مورد نظر، میانگین و انحراف معیار اندازه‌های مربوط به هر یک از ابعاد به طور جداگانه در جهت X و Y در جدول ۲ آورده شده است.

به‌طور کلی به‌منظور پیش‌بینی و جبران خطای منحنی با درجه‌ی مشخص و مناسب از نقاط موجود در نموداری که انحراف میانگین از اندازه‌ی نامی هر یک از ابعاد (D) را برحسب اندازه‌ی نامی (L) آن‌ها را نشان می‌دهد، گذرانده می‌شود. به طوری که هر چه درجه منحنی گذرانده شده بیش‌تر باشد، خطای باقی مانده کاهش می‌یابد. اما افزایش درجه‌ی منحنی گذرانده شده به دلیل افزایش خطای تکرارپذیری و عدم داشتن معنای فیزیکی قابل توجیح نمی‌باشد. با توجه به دلایل گفته شده، منحنی درجه سوم از نقاط مربوطه و به‌طور جداگانه در جهت X و Y گذرانده شده



شکل ۸. اثر جهت ساخت بر روی دقت ابعادی در جهت ۰°، ۴۵° و ۹۰°

امتداد طول آن‌ها و در نقاط مختلف تکرار شده است. به‌گونه‌ای که اندازه‌گیری بر روی مربع‌ها با ابعاد ۴۰(mm) تا ۱۰۰(mm) در ۱۶ نقطه، مربع با ابعاد ۳۰(mm) در ۸ نقطه، مربع با ابعاد ۲۰(mm) در ۶ نقطه و مربع با ابعاد ۱۰(mm) در ۴ نقطه و در امتداد طول اضلاع به طور جداگانه در جهات X و Y انجام شده است. برای افزایش دقت در اندازه‌گیری و نتایج، این روند اندازه‌گیری دو مرتبه انجام گرفته به‌طوری که در نهایت هر یک از ابعاد ۴۰ تا ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۳۲ اندازه، بعد ۳۰ میلی‌متری دارای ۱۶ اندازه، بعد ۲۰ میلی‌متری دارای ۱۲ اندازه و بعد ۱۰ میلی‌متری دارای ۸ اندازه و به طور جداگانه در جهت X و Y می‌باشند. سپس در نهایت میانگین و انحراف معیار هر یک از ابعاد با توجه به اندازه‌های موجود مربوط به آن‌ها به طور جداگانه در جهت X و Y محاسبه شده است.

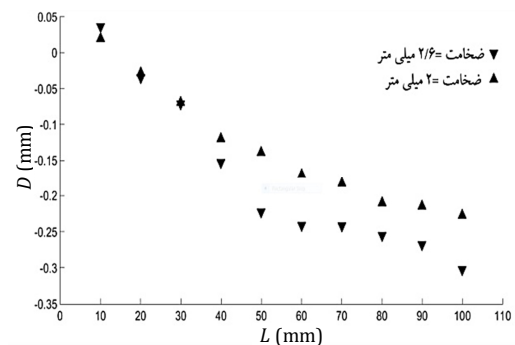
### ۳-۲- نتایج و تحلیل آن‌ها

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی قطعات محک‌سنجی در هر قسمت و هم چنین تحلیل آن‌ها در سه بخش زیر آورده شده است.

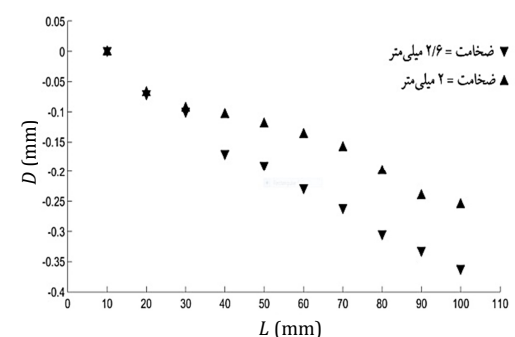
#### ۳-۱-۱- اثر ضخامت پوسته

نتایج اندازه‌گیری‌های ابعادی انجام شده بر روی هر دو قطعه‌ی محک سنجی با ضخامت دیواره‌های ۲(mm) و ۲/۶(mm) به طور جداگانه در جهت X و Y، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. به طوری که این نمودارها مقدار انحراف میانگین از اندازه‌ی نامی هر یک از ابعاد (D) را بر حسب اندازه‌ی نامی آن‌ها در مدل CAD (L) را نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار انحراف ابعاد خارجی از اندازه‌ی نامی در هر دو جهت X و Y برای قطعه محک‌سنجی با ضخامت ۲/۶(mm) بیشتر می‌باشد. این نتیجه را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که در فرآیند FDM هر رشته به هنگام قرارگیری بر روی صفحه‌ی ساخت، قسمتی از



شکل ۶. اثر ضخامت پوسته بر روی ابعاد خارجی در جهت X



شکل ۷. اثر ضخامت پوسته بر روی ابعاد خارجی در جهت Y

پوسته و جهت ساخت بر روی دقت ابعاد خارجی و هم چنین بدست آوردن مدل پیش‌بینی و جبران خطا انجام شده است. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها بر روی قطعات محک‌سنجی طراحی و تولید شده می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- افزایش ضخامت پوسته باعث کاهش دقت ابعاد خارجی قطعات ساخته شده می‌شود.
- جهت ساخت ۴۵° بیشترین دقت را نسبت به جهات ۰° و ۹۰° را دارد.
- رابطه‌ی بین انحراف ابعاد خارجی و اندازه‌ی نامی مربوط به آن‌ها، غیر خطی است. به طوری که با استفاده از نمودارها و رابطه‌های ارائه شده در قسمت پیش‌بینی و جبران خطا می‌توان مقدار خطای مربوط به هر یک از ابعاد را با خطای کم پیش‌بینی و جبران کرد.

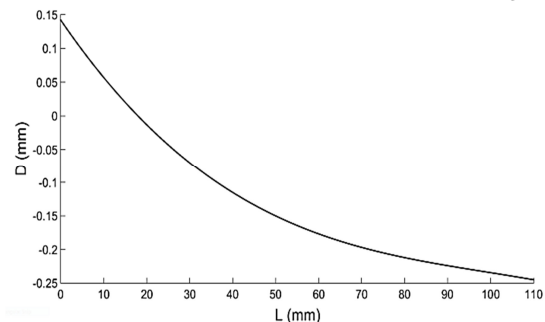
#### ۵- مراجع

- [1] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, *Additive manufacturing technologies*, Springer, 2010.
- [2] K. Tong, S. Joshi, E. Amine Lehtihet, Error compensation for Fused Deposition Modeling (FDM) machine by correcting slice files, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14, pp. 4 - 14, 2008.
- [3] D. A. BİRCAN, *Development of a NURBS based adaptive slicing procedure for fused deposition modeling in rapid prototyping applications*, PhD Thesis, Department Of Mechanical Engineering, Adana university, Turkey, 2008.
- [4] M. Alhubail, *Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modeling for improved quality*, PhD Thesis, Department of Mechanical and Design Engineering, University of Portsmouth, England, 2012.
- [5] R. Singh, process capability analysis of fused deposition modeling for plastic components, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20, pp. 69 - 76, 2014.
- [6] Q. Huang, J. Zhang, A. Sabbaghi, T. Dasgupta, Optimal offline compensation of shape shrinkage for three-dimensional printing processes, *Taylor & Francis, Institute of Industrial Engineers*, Vol. 47, 2015.
- [7] A. Noriega, D. Blanco, B. J. Alvarez, A. Garci, Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, pp. 2301-2313, 2013.
- [8] F. Górski, W. Kuczko, R. Wichniarek, Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modeling technology, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 7, No. 19, pp. 27-35, 2013
- [9] S. Dinesh Kumar, V. Nirmal Kannan, G. Sankaranarayanan, parameter optimization of ABS-M30i parts produced by fused deposition modeling for minimum surface roughness, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2014.
- [10] A. Gregorian, B. Elliott, R. Navarro, *Accuracy improvement in rapid prototyping machine (FDM-1650)*, NSF Research Experiences for the Undergraduates (REU), Loyola Marymount University, Los Angeles, 2003.

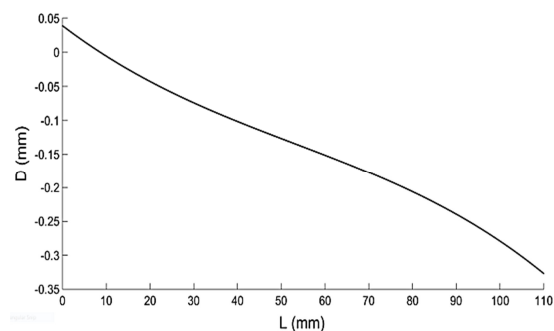
جدول ۲ میانگین و انحراف معیار ابعاد خارجی

انحراف معیار (Y)	انحراف معیار (X)	میانگین (Y)	میانگین (X)	ابعاد (mm)
۰/۰۴۴۱	۰/۰۳۶۱	۹۹/۷۲۴۱	۹۹/۷۶۵	۱۰۰
۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۷۱	۸۹/۷۵۳۴	۸۹/۷۷۵	۹۰
۰/۰۱۷	۰/۰۳۰۷	۷۹/۷۹۷۵	۷۹/۷۹۱۳	۸۰
۰/۰۴۰۹	۰/۰۵۱۵	۶۹/۷۸۸۱	۶۹/۸۶۷۲	۷۰
۰/۰۳۸۱	۰/۰۳۲۳	۵۹/۸۵۳۱	۵۹/۸۱۸۷	۶۰
۰/۰۳۵۱	۰/۰۵۲۷	۴۹/۸۶۱۹	۴۹/۸۵۰۶	۵۰
۰/۰۳۷۷	۰/۰۴۱۹	۳۹/۹۱۰۴	۳۹/۸۸۴۲	۴۰
۰/۰۶۱۱	۰/۰۳۰۳	۲۹/۹۲۳۶	۲۹/۹۳۶۸	۳۰
۰/۰۳۸۴	۰/۰۵۳۶	۱۹/۹۵۰۶	۱۹/۹۸۰۶	۲۰
۰/۰۲۸۶	۰/۰۷۷۲	۹/۹۹۷۵	۱۰/۰۵۸۳	۱۰

است [۲]. نمودارهای مربوط به هر یک از منحنی‌های گذرانده شده از نقاط مربوطه به‌طور جداگانه در جهات X و Y که دارای حداکثر خطای (mm) ۰/۰۱ (جهت X) و ۰/۰۲ (جهت Y) می‌باشند، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۹ رفتار خطای ابعاد خارجی در جهت X



شکل ۱۰ رفتار خطای ابعاد خارجی در جهت Y

معادله‌ی مربوط به هر یک از منحنی‌های بالا در جهات X و Y به ترتیب در معادله‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

$$D = -2/813 \times 10^{-7} L^2 + 8/369 \times 10^{-5} L^3 - 0/009 L + 0/141 \quad (1)$$

$$D = -2/884 \times 10^{-7} L^2 + 4/596 \times 10^{-5} L^3 - 0/004 L + 0/38 \quad (2)$$

با استفاده از فرمول‌ها و نمودارهای بالا می‌توان مقدار خطای مربوط به هر یک از ابعاد خارجی را به‌طور جداگانه در جهات X و Y با دقت کافی پیش‌بینی و جبران کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد، این تحقیق با هدف بررسی اثر پارامترهای ضخامت