



Influence of layer thickness on curl distortion in stereolithography

Abstract

Stereolithography (SLA) is one of the most important techniques used in rapid prototyping processes. It has a great industrial interest because it allows dramatic time saving with respect to traditional manufacturing processes. One of the main sources of errors in finished part dimensions is curl distortion effect owing to the shrinkage of the resin during the SLA process. Numerical simulation can help understanding the interaction between behavior and distortion of cured resin and resin parameters and process parameters. In present study take into consideration that Young modulus is variable in cured section so the numerical analysis of SLA and composite beam theory are used to analyse this effect. The results show that a thick layer causes less curl distortion than a thin layer where the experimental that built with SLA5000 agree very well with simulated results.

Keywords: Layer Thickness, Curl Distortion, Numerical Analysis, Composite Beam, Stereolithography



بررسی اثر تغییر ضخامت لایه‌ها، در پیچش کرل بوجود آمده در قطعات ساخته شده به روش استریولیتوگرافی

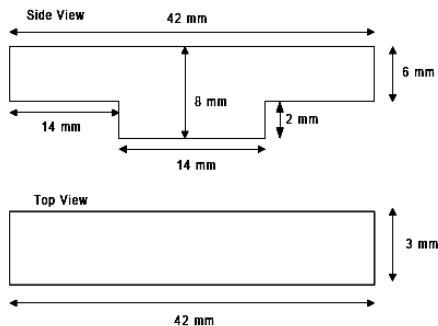
چکیده

استریولیتوگرافی یکی از مهمترین روش‌های نمونه سازی سریع می‌باشد، که به طور وسیع در صنایع مختلف به خاطر کاهش زمان ساختی که در مقایسه با روش‌های سنتی دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از منابع بزرگ خطا در این روش، خطای ابعادی بوجود آمده از تغییر شکل‌های کرل می‌باشد که خود ناشی از انقباض رزین در هنگام جامد شدن است. شبیه سازی‌های عددی کمک بسیار زیادی در شناخت ارتباط بین رفتار و تغییر شکل‌های رزین جامد شده با پارامترهای ذاتی رزین و پارامترهای پروسه استریولیتوگرافی دارد. تحقیق حاضر با در نظر گرفتن متغیر بودن مدول الاستیسیته در سطح مقطع رزین جامد شده و استفاده از آنالیز عددی روابط حاکم بر پروسه استریولیتوگرافی و روابط حاکم بر تیرهای کامپوزیتی به بررسی دقیق اثر تغییر ضخامت لایه‌ها، در پیچش کرل می‌پردازد و در نهایت نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی که توسط دستگاه SLA 5000 ساخته شده اند مورد مقایسه قرار می‌گیرد. و نشان داده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌ها پیچش کرل قطعات کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ضخامت لایه‌ها - پیچش کرل - آنالیز عددی - تیرهای کامپوزیتی - استریولیتوگرافی

۱- مقدمه

در روش استریولیتوگرافی که یکی از پرکاربردترین روش‌های نمونه سازی سریع است، مستقیماً از مدل سه بعدی و کامپیوتری به قطعه‌ای واقعی می‌توان دست یافت. یکی از دلایل اصلی اختلاف بین مدل کامپیوتری و قطعه ساخته شده توسط این روش پیچش و انحرافات کرلی است که ناشی از انقباض رزین در هنگام جامد شدن می‌باشد. این انحرافات که به خاطر نیروهای داخلی می‌باشد، تحت عنوان پیچش کرل (Curl Distortion) معرفی می‌شود. در صورتی که بدرستی پیچش کرل و یا نیروهای داخلی کنترل نشوند، باعث از بین رفتن قطعه کار می‌شود. در قطعه نشان داده شده در شکل ۱ که نمونه استاندارد تیر یک سرگردار دوقلو می‌باشد [۱] و با دستگاه SLA5000 و رزین SOMOS11120 ساخته شده است به خاطر نبودن تکیه‌گاه‌های ساخت، نیروهای داخلی بوجود آمده در حین ساخت باعث چرخش قطعه و از بین رفتن آن شده است. در صورتی که با استفاده از تکیه‌گاه‌های ساخت، مانع از آزاد شدن نیروهای داخلی در حین پروسه شود، بعد از جدا کردن تکیه‌گاه‌ها این نیروها آزاد شده و باعث انحرافات ابعادی قطعه می‌شوند. در این مقاله هدف تخمین پیچش کرل بوجود آمده در قطعات استریولیتوگرافی و تاثیر ضخامت لایه‌ها بر نیروهای داخلی و پیچش کرل می‌باشد که با در نظر گرفتن تغییرات مدول الاستیسیته در مقاطع مختلف از سطح مقطع رزین جامد شده و با استفاده از تئوری کلاسیک تیرهای کامپوزیتی انجام شده است.



شکل ۱: شکل سمت راست: قطعات استاندارد محاسبه ضریب کرل [۱]. شکل سمت چپ: خراب شدن قطعه ساخته شده در دستگاه SLA 5000 به دلیل جابجایی لایه‌ها و چرخش آنها به خاطر شکست تکیه‌گاه‌های آن در اثر بزرگی نیروهای داخلی وجودآمده در آن

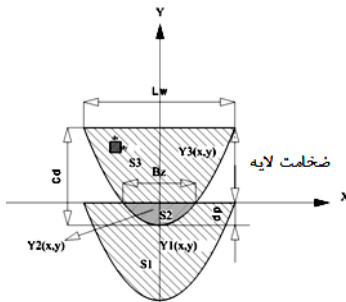
۲- مروری بر کارهای صورت گرفته تاکنون

در طول چند سال اخیر تحقیقات و پیشرفت‌های زیادی برای بهبود و بالا بردن پروسه استریولیتوگرافی صورت گرفته است. جاکوب [۲۰۱] نشان داد که خواص مکانیکی قطعات ساخته شده تابعی از درخشندگی لیزر می‌باشد. ویدمان [۳] روش بدست آوردن میزان درخشندگی رسیده به لایه‌های ساخته شده، ناشی از لایه‌های در حال ساخت را ارائه کرد. هانگ [۴] روشی برای محاسبه دینامیک پلیمرزاسیون، انقباض و حساسیت پلیمرزاسیون تحت شرایط پروسه ارائه داد و چگونگی محاسبه مدول الاستیسیته در لایه‌ها ارائه داد و نشان داد که با افزایش ضخامت لایه‌ها پیچش کرل کاهش می‌یابد. گابریل [۵] با استفاده از روش المان محدود و فرض ثابت بودن مدول الاستیسیته نشان داد که افزایش ضخامت لایه‌ها باعث کاهش میزان پیچش کرل می‌شود. جی دای کیم [۶] با استفاده از آزمایشات تجربی که بر روی قطعات بعد از بازپردازش انجام داد نشان داد نیروهای داخلی بعد از جداسازی تکیه‌گاه‌ها آزاد شده و باعث انحرافات کرل می‌شود و با افزایش ضخامت لایه‌ها پیچش کرل نهایی کاهش می‌یابد.

۳- تخمین پیچش کرل بصورت عددی

۳-۱- پروفیل ایجاد شده توسط لیزر و محاسبه خواص مکانیکی در آن

مطابق با جاکوب [۱] تک پروفیل پخته شده توسط لیزر بصورت تابعی سهمی می‌باشد. پس می‌توان لایه‌های پخته شده متوالی را مطابق با شکل ۲ در نظر گرفت. این شکل تنها نمایش دهنده دو لایه پشت سرهم است. در شکل عمق پخت توسط لیزر (C_d)، پهنای پخت (LW) و تاثیر ضخامت لایه در نفوذ دو لایه در یکدیگر نشان داده شده است. جاکوب [۲۰۱] مطابق با رابطه ۲ ارتباط بین مدول الاستیسیته (Y) حاصله از پخت لایه‌ها را با درخشندگی لیزر (E) بیان نموده است. همانطور که از این رابطه مشخص است مدول الاستیسیته تابعی از درخشندگی لیزر می‌باشد، البته درخشندگی جذب شده در نقاط مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشند [۱]. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدول الاستیسیته نقاط مختلف یک لایه با یکدیگر متفاوت می‌باشد.



شکل ۲ - نمودار نمایش دو پروفیل پخته شده توسط لیزر در SLA

$$Y(x, y) = Y(E(x, y), t) = Y_{\max} \left(1 - e^{-\beta \left(\frac{E}{E_c} - 1\right)}\right) (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

در این رابطه Y_{\max} بیشتر مقدار مدول الاستیسیته قابل دسترسی برای رزین، β ثابت بی بعدی است که مستقیماً متناسب با درخشندگی بحرانی رزین (E_c) می‌باشد و α ثابتی بی بعد می‌باشد. ویدمان [۳] نشان داده است که درخشندگی لیزر رسیده از لایه‌های بالاتر به لایه‌های زیرین با درخشندگی خود لایه‌ها جمع شده و در نهایت باعث افزایش مدول الاستیسیته لایه‌های زیرین می‌شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته مناطق ۱ و ۳ ($Y1, Y3$) مطابق با روابط ارائه شده توسط جاکوب [۱] می‌باشد. ولی در منطقه ۲ رزین جامد شده در مرحله قبل دوباره تحت درخشندگی لیزر قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن میزان درخشندگی رسیده به آن می‌توان این‌گونه فرض نمود که درخشندگی‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند، پس می‌توان مقدار درخشندگی لیزر رسیده به نقاط مختلف منطقه ۲ را مطابق با رابطه ۳ تخمین زد.

$$E_2(x, y) = \underbrace{E_0(x, y) \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)}_{\text{First Exposure}} + \underbrace{E_0(x, y) \exp\left(\frac{-(z+d)}{D_p}\right)}_{\text{Second Exposure}} \quad (3)$$

در این رابطه z عمق نفوذ پرتوی لیزر در لایه دوم، d ضخامت لایه‌ها و E_0 مقدار تشعشع در سطح لایه دوم می‌باشد. با استفاده از این رابطه و قرار دادن آن در رابطه ۱ می‌توان مدول الاستیسیته هر نقطه داخل ناحیه ۲ را محاسبه نمود. هانگ [۴] مطابق با رابطه ۴ را در ارتباط بین درخشندگی لیزر (E) و پارامترهای رزین برای تقریب مقدار انقباض لایه‌ها بیان نموده است.

$$\varepsilon(E, t) = \varepsilon_{\max} \left(1 - \exp\left[-\alpha_a \left(\frac{E}{E_c}\right) - \alpha_b t\right]\right) [1 - \exp(-\alpha_c t)] \quad (4)$$

در این رابطه ε میزان کرنش رزین، ε_{\max} بیشترین انقباض رزین، α_a بیانگر میزان نرخ واکنش در اولین مرحله درخشندگی، α_b ضریبی برای مدل کردن انقباض رزین و α_c ضریبی برای نشان دادن منحنی انقباض می‌باشد. این رابطه بر مبنای انقباض مرکز پروفیل ساخته شده و درخشندگی یک بار عبور لیزر ارائه گشته است که با توجه به موارد ذکر شده بایستی برای محاسبه و تخمین دقیق میزان پیچش کرل انقباض کلیه نقاط محاسبه شود. این درحالی است که درکارهای قبلی این مدنظر قرار نمی‌گیرد [۵].



۳-۲- تئوری کلاسیک حاکم بر تیرهای کامپوزیتی

با توجه به اینکه، ماهیت ساخت در استریولی توگرافی ساخت لایه به لایه ای قطعات می باشد، می توان خواص قطعات را مشابه با خواص کامپوزیت ها فرض نمود [۶] و از روابط حاکم بر آنها برای محاسبه خواص قطعات استریولی توگرافی استفاده نمود. در تئوری کلاسیک تیرهای کامپوزیتی هنگامی که المانی از تیر تحت نیروی خارجی (N) و گشتاور خارجی (M) و همچنین نیروی داخلی (N_t) و گشتاور داخلی (M_t) قرار گیرد، بعد از نوشتن روابط تعادل برای این المان، ارتباط بین میزان پیچش قطعه (K)، میزان کرنش لایه میانی (ε₀) با بارهای اعمالی مطابق با دستگاه معادلات زیر بیان می شود [۷]

$$\begin{cases} M = \varepsilon_0 B + k_x D - M_t \\ N = \varepsilon_0 A + k_x B - N_t \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & D \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ k_x \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_t \\ N_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

که A ضریب سختی کششی- فشاری، B کوپلینگ کششی - خمشی و D ضریب سختی خمشی می باشد. در مورد قطعات استریولی توگرافی می توان فرض نمود که نیروهای خارجی به قطعات وارد نمی شود و این نیروهای داخلی می باشد که باعث انحرافات ابعادی می شود.

۳-۳- تخمین میزان پیچش کرل

برای تخمین پیچش کرل با استفاده از تئوری کلاسیک تیرهای کامپوزیتی بایستی به این نکته توجه نمود که در هنگام ساخت لایه ها نیروهای فشاری ایجاد شده از انقباض لایه ها در حین پروسه آزاد می شود، اما توسط تکیه گاهها از آزاد شدن ممان های داخلی ایجاد شده جلوگیری می شود و مانع از پیچش در حین پروسه می شود. پس می توان علت نهایی پیچش کرل را ناشی از آزاد شدن ممان هایی دانست که در طول پروسه ایجاد می شوند و در تکیه گاهها ذخیره می شوند. اما با توجه به شکل ۲ می توان تاثیر ضخامت لایه ها را، بر روی نفوذ پرتوی لیزر در لایه های زیرین را این گونه توجیح نمود، با افزایش ضخامت لایه ها لیزر کمتر در لایه زیرین نفوذ کرده و کمتر باعث تغییر در مدول الاستیسیته آن لایه و ایجاد انقباض در آن می شود. برای محاسبه ممان داخلی ایجاد شده در طول ساخت لایه ها از رابطه ۶ [۵] استفاده می شود.

$$M_t = \int Y(\alpha_t \Delta t + \alpha_\varepsilon) b z dz \quad (5)$$

در این رابطه Y مدول الاستیسیته المان مورد بررسی می باشد که از رابطه ۲ بدست می آید و α_ε مقدار انقباض المان می باشد. با توجه به اینکه در هنگام ساخت قطعات سعی می شود تغییرات دمایی وجود نداشته باشد، ترم α_t Δt از معادلات حذف می شود. که مقدار انحنای ایجاد شده و یا پیچش کرل با استفاده از رابطه ۶ بدست می آید.

$$k_{t2-1} = \frac{M_t}{\frac{-B_{s1,s2,s3}^2}{A_{s1,s2,s3}} + D_{s1,s2,s3}} \quad (6)$$



k_{f2-1} بیانگر انحنای القایی می‌باشد که در صورتی که در این لحظه تکه‌گاه‌ها از جسم جدا شوند بوجود می‌آید. در این رابطه به کل جسم می‌توان مقدار پیچش نهایی را بدست آورد.

۴- تخمین پیچش کرل برای قطعه مسطیلی شکل

به منظور بررسی و تاثیر ضخامت لایه‌ها بر روی پیچش کرل از مدل مدل مسطیلی شکل ارائه شده توسط جی دای کیم [۶] استفاده شده است. این قطعه مسطیلی در ابعاد $10\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ می‌باشد. که برای بررسی تنها ضخامت یک لایه بر روی پیچش نهایی، ضخامت 1.5 میلیمتر برای آن انتخاب شده است. انتگرال‌های محاسبه خواص مکانیکی با استفاده از روش انتگرال گیری عددی مربعی [۸] محاسبه شده‌اند. محاسبات سه مرتبه برای ضخامت لایه‌ای 150 میکرون، 125 میکرون و 100 میکرون تکرار شده است. پارامترهای لحاظ شده در محاسبات براساس پارامترهای حقیقی ساخت این قطعه در دستگاه SLA5000 می‌باشند. این پارامترها عبارتند از توان لیزر 163 میلی وات، قطر پرتو لیزر: 120 میکرون، سرعت اسکن لایه‌ها: 5 متر بر ثانیه، عمق نفوذ لیزر $0.16: D_p$ میلی‌متر، درخشندگی بحرانی رزین $11.5: E_c$ میلی ژول بر سانتی متر مربع، بیشترین مدول الیستیک رزین 2650.7 مگاپاسکال و بیشترین میزان انقباض رزین: 0.25% می‌باشد که این شرایط مربوط رزین somos ۱۱۱۲۰ می‌باشد. نتایج آنالیزها همراه با داده‌های اندازه گیری شده در شکل ۴ آورده شده است.

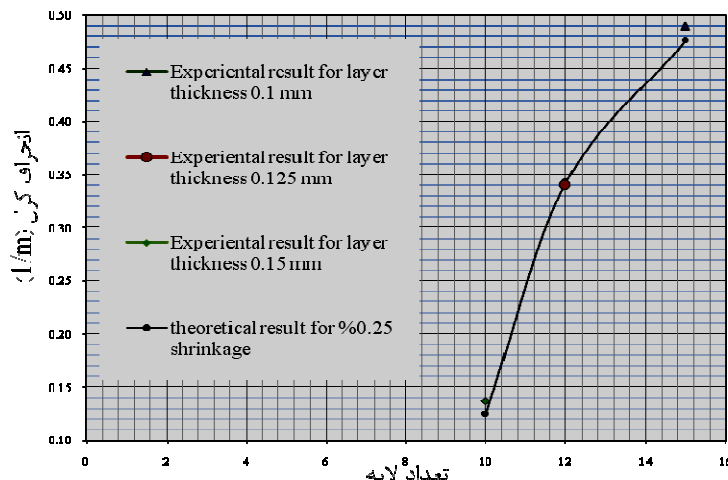
۵- اندازه‌گیری تجربی میزان پیچش کرل

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج حاصل شده از تخمین پیچش کرل، قطعات نمونه‌ای را دقیقاً با شرایط ذکر شده در حالت تخمین تئوری در دستگاه SLA5000 ساخته و بعد از ساخته شدن قطعات با سه ضخامت لایه‌ای 100 و 125 و 150 میکرون، تکیه‌گاه‌های آنها جدا شده و تحت عملیات بازپردازش قرار گرفته‌اند. قطعات ساخته شده مطابق با شکل ۳ می‌باشند که با اندازه‌گیری آنها نتایج نمودار شکل ۴ حاصل شده است.



شکل ۳ قطعات ساخته شده با ضخامت لایه‌ای متفاوت

همانطور که از شکل ۴ مشخص باشد، نتایج تئوری با تقریب بسیار خوبی مقدار پیچش کرل را تخمین می‌زند. آنچه که مشخص می‌باشد، با افزایش ضخامت لایه‌ای ساخت، مقدار پیچش کرل بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۴- نتایج محاسبات تخمین پیچش کرل و اندازه‌گیری قطعات ساخته شده برای بررسی اثر ضخامت لایه‌ها. نمودار افقی بیانگر تعداد لایه‌های ساخت از ضخامت لایه‌ای مورد نظر برای رسیدن به ضخامت قطعه می‌باشد. به عنوان مثال ۱۰ لایه ۰.۱۵ میلیمتری که معادل ۱.۵ میلیمتر است

۴- نتیجه گیری

در قطعات استریولیتوگرافی به خاطر اینکه مقدار انرژی جذب شده در نقاط لایه‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشند، خواص مکانیکی و مقدار انقباض نقاط مختلف لایه‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشد. این اختلافات باعث بروز نیروهای داخلی در قطعات می‌باشد. از عواملی که باعث بروز این اختلاف در خواص می‌شود، ضخامت لایه‌های ساخت می‌باشد. هر چقدر ضخامت لایه‌های ساخت بیشتر شود، این اختلاف کمتر و به تبع آن انحرافات نهایی قطعه نیز کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

لازم می‌دانم که از کمک‌های بخش نمونه‌سازی سریع شرکت ساپکو که برای انجام تست‌های عملی و ساخت قطعات امکانات لازم را در اختیار قرار دادند کمال تشکر را به عمل بیاورم.

مراجع

- [1] Jacobs, P., Rapid Prototyping and Manufacturing Fundamentals of Stereolithography, 1st ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1992.
- [2] B. Evans and P. Jacobs, "The development of photopolymer modulus with actinic exposure", Proceedings of 2nd International Conference on Rapid Prototyping, pp. 69-85, 1991.
- [3] B. Wiedemann, K.-H. Dusel /Investigation into the influence of material and process on part distortion/ 1/1995
- [4] Y.-M. Huang / Curl Distortion Analysis During Photopolymerisation of Stereolithography Using Dynamic Finite Element Method/International Journal of advanced Manufacturing Technology 21:586-595. 2003
- [5] Gabriel Bugada, Miguel Cervera, Guillermo Lombraand /Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method/Rapid Prototyping Journal Volume 1 · Number 2 · pp. 13-23.1995
- [6] Kim, Gi Die, Lee, Kon," Prediction of Curl Distortion using Classical Lamination Theory in Stereolithography. Korean Soc of Precision Eng J, Vol. 22, No. 11, November 2005
- [7] George H. Staabe," Laminar Composites", Butterworth-Heinemann, 1999
- [8] Curtis F. Jerald/Applied Numerical Analysis/Sixth Edition, 1999