ارائهٔ مدل ریاضی و تهیه نرم‌افزار برای ماشینکاری سه بعدی مواد مرکب پایه پلیمری الیافی به کمک کامپیوتر

سید محمد رضا خلیلی*، مهدی ظهور**، آرش خرمی***
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت مقاله: ۸۰/۳/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۸/۲۰)

چکیده – با توجه به گسترش استفاده از مواد مرکب پایه پلیمری الیافی در صنایع مختلف، ماشینکاری بر روی این مواد برای دستیابی به اشکال متنوع و با دقت ابعادی بالا و صافی سطح مطلوب از اهمیت خاصی برخوردار شده است. لیکن مواد مرکب الیافی به علت دارا بودن ساختاری غیر ایزوتروپیک، از مکانیزم براده‌برداری ویژه‌ای تبعیت می‌کنند. از پارامترهای مؤثر در ماشینکاری این مواد می‌توان به زاویه بین راستای الیاف با جهت تراش و اختلاف خواص فیزیکی و گرمایی الیاف با ماتریس نام برد. در کار حاضر با استفاده از آخرین نظریه‌های براده‌برداری در این مواد و ارائهٔ مدلی جدید برای بهینه سازی سرعت پیشروی و سرعت خطی با توجه به راستای الیاف در هر لایه از مواد مرکب چند لایه‌ای الیافی، نرم افزاری برای ماشینکاری (فرزکاری) سه بعدی مواد مرکب الیافی ارائه شده است. تعدادی قطعات ساخته شده از مواد مرکب ترکیبی ماشینکاری شده و عملکرد برنامه مورد بررسی قرار گرفته است. قطعات ماشینکاری شده دارای صافی سطح بسیار مطلوب و یکنواخت و بدون نقایص ویژه مانند سوختگی ماتریس، متورق شدن لایه‌ها و بیرون آمدن الیاف از ماتریس‌اند.

واژگان کلیدی: مواد مرکب الیافی، ماشینکاری، نرم‌افزار، نیروی تراش، راستای الیاف

Introducing A New Mathematical Model and Developing A Computer Package For 3-D Machining of Fiber Reinforced Polymer Composites

S. M. R. Khalili , M. Zohour and A. Khorrami
Mechanical Engineering Department K. N. Toosi University of Technology

Abstract: *Due to the widespread applications of fiber reinforced polymer composites in various industries, the machining of these materials to reach the desired shapes, close tolerances and surface finish quality is of great importance. But the composite materials are anisotropic and are mostly prepared in laminated form and, therefore, they have special chip formation behaviour. Among the effective parameters in machining of these materials, the angle between the fibre orientation and machining direction and also the properties of fiber and matrix are of great significance. In the present paper, using the latest theories in the field of machining of FRP materials, a mathematical model to improve the feed rate as well as the cutting speed with respect to the fiber orientation has been introduced and, a computer package was developed for the 3-dimensional CNC machining of fiber composite materials. A number of composite pieces were fabricated and machined to check the output of the programme and the*

---

* -دانشیار **- استادیار *** -کارشناسی ارشد

work pieces. Besides the reduction in the machining time, the machined work pieces had desired surface quality, while the common defects like matrix burning, delamination and fiber pullout were completely absent.

Keyword: *Fiber composite Materials, Machining, Software, Cutting force, fiber orientation*

۱-مقدمه

مواد مرکب در مقایسه با سایر مواد به لحاظ دارا بودن خواص ویژه متعدد به مهندسان این امکان را می‌دهند که سازه‌های کارآمدتری را طراحی کنند. از جمله محاسن مواد مرکب می‌توان کاهش وزن سازه، استحکام و سفتی بالا، مقاومت خوب در برابر سایش و گرما، مقاومت خوب در برابر خوردگی، مقاومت مناسب در خستگی و خزش را نام برد. به لحاظ این مزیتها، هم اکنون استفاده از مواد مرکب الیافی[1] و مواد مرکب هیبریدی[2] در صنایع مختلف خصوصاً نظامی و فضایی گسترش پیدا کرده است.

مواد مرکب پایه پلیمری الیافی با توجه به ضریب تقویت کنندگی بالا وقیمت ارزان آنها و شکل پذیری راحت در قالب، در کاربردهای مختلف نظر طراحان و صنعتگران را به خود جلب کرده است. بر این مبنا، روشهای ساخت قطعات مواد مرکب توسعه یافته و از تنوع بالایی برخوردارند. با این وجود، هنوز در تولیدات با حجم پایین و اشکال بسیار پیچیده برای تکمیل قطعات و تهیه شکل ظاهری آنها، نیاز است تا از روشهای ماشینکاری برای این مواد نیز استفاده شود. تحقیقات علم ماشینکاری بیشتر بر روی مواد فلزی یعنی ایزوتروپ معطوف شده و با توجه به ماهیت غیرایزوتروپ بودن مواد مرکب الیافی، دانش و معلومات ماشینکاری این مواد جدید برای دستیابی به شرایط بهینه تراشکاری هنوز کافی نیست و با افزایش کاربرد مواد مرکب، می‌بایست مطالعات بیشتری بر روی تکنیکهای ماشینکاری آنها انجام شود [۱و۲].

اولین قدم در رابطه با دستیابی به شرایط تراش مطلوب و بهینه، مطالعهٔ مکانیزم شکل‌گیری براده در مواد مرکب الیافی است. لذا تحقیقاتی بر روی نحوهٔ شکل‌گیری براده و پیش‌بینی نیروهای تراش صورت پذیرفته و روابط بین نیروهای تراش با پارامترهای ماشینکاری نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱-۶].

۲- شبیه سازی ماشینکاری مواد مرکب

در تحقیقات به عمل آمده [۲و۵] بر اساس نوع و تولید براده، مکانیزمهای شکل‌گیری براده را به دو وضعیت ماشینکاری زیر تقسیم‌بندی کرده‌اند: ماشینکاری به موازات راستای الیاف و ماشینکاری غیر موازی با راستای الیاف.

۲-۱-مکانیزم ماشینکاری موازی با راستای الیاف

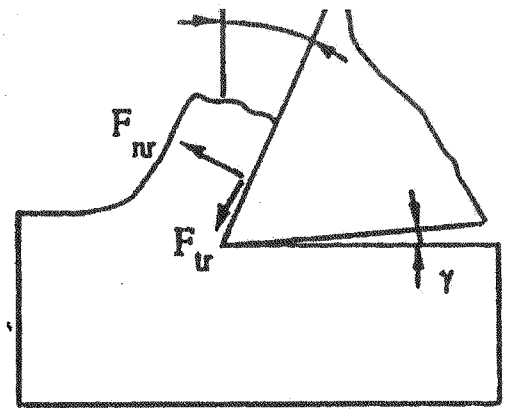
در مکانیزم ماشینکاری به موازات راستای الیاف از مدل رایج برای تبیین مکانیزم براده‌برداری در فلزات استفاده شده است [۷]. همان طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود F_{nr} نیروی گسترده عمود بر واحد عرض در محل برخورد براده ابزار بوده و F_{tr} نیروی مماس بر واحد عرض در اثر لغزش براده بر روی سطح ابزار به طرف بالاست. این دو نیرو توسط معادلهٔ زیر به هم مرتبط می‌شوند [۷]:

$$F_{tr} = f.F_{nr} \qquad (۱)$$

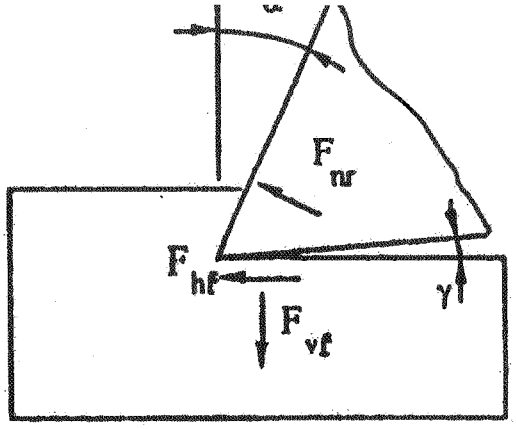
که در معادلهٔ بالا f ضریب اصطکاک دینامیکی بین ابزار و قطعه کار است. می‌توان از روابط مثلثاتی مؤلفه‌های موازی و عمودی بر واحد عرض راستای تراشکاری را به دست آورد و سپس با استفاده از معادلهٔ (۱) و تلفیق آنها، ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعات کار به دست می‌آید [۵]:

$$f = \frac{F_h \sin\alpha + F_v \cos\alpha}{F_h \cos\alpha - F_v \sin\alpha} \qquad (۲)$$

در معادلهٔ بالا فرض شده که تمام نیروهای افقی برای برداشتن براده به کار گرفته می‌شوند. از نتایج تجربی تحقیقات به عمل آمده بر روی مواد مرکب [۵] مشاهده شده که سایش براده بر روی سطح ابزار وجود ندارد و در عوض لغزش شدید قطعه کار بر روی سطح آزاد ابزار مطرح است. لذا طرح جدید ماشینکاری متعامد مواد مرکب الیافی به صورت زیر بر اساس شکل (۲) ارائه شد که در آن $F_{tr} = 0$ در نظر گرفته شده است:



شکل ۱- نیروهای اصلی ایجاد شده در ماشینکاری متعامد مواد فلزی



شکل ۲- شرح نیروهای مورد پذیرش برای مواد مرکب

$$F_{hf} = f.F_{vf} \qquad (۳)$$

که F_{hf} و F_{vf} به ترتیب مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروی تراش بر واحد عرض بر روی سطح آزاد است. با استفاده از روابط مثلثاتی و شکل (۲)، معادله زیر به دست می‌آید:

$$F_{hr} = \frac{F_h - f.F_v}{1 + f.\tan\alpha} \qquad (٤)$$

البته نیرو در سطح ابزار با افزایش عمق تراش افزایش می‌یابد. از مدل ارائه شده و نتایج حاصل از آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که وقتی جهت تراش با راستای الیاف منطبق باشد، لغزش قابل ملاحظه ای از براده در امتداد سطح ابزار رخ نمی‌دهد، لیکن لغزش قطعه کار بر روی سطح آزاد ابزار قابل توجه است. همچنین در مدل ارائه شده نیروی برش واحد به عمق برش و زاویه آزاد ابزار وابستگی ندارد، در صورتی که با افزایش زاویه براده کاهش می‌یابد و ضریب اصطکاک با عمق تراش و هندسه ابزار حساس نیست. البته نتایج تجربی فقط زمانی طرح نیرو در شکل (۲) را مورد تأیید قرار می‌دهند که راستای الیاف منطبق بر جهت تراش باشد.

۲-۲- مکانیزم ماشینکاری غیر موازی با راستای الیاف

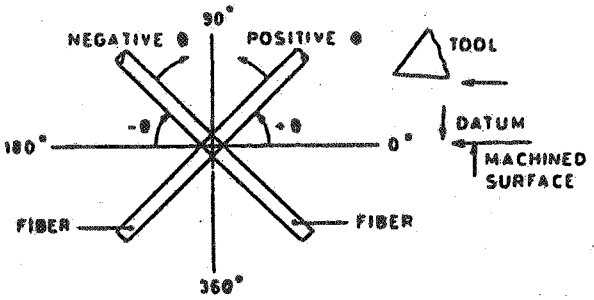
در شرایط واقعی، ماشینکاری فقط در راستای الیاف انجام نمی‌پذیرد و تاثیر سایر راستاها در مکانیزم شکل گیری براده نیز اهمیت دارد، لذا نیاز به بررسی سایر وضعیتها جهت مدلهایی برای مشخص کردن مکانیزم شکل گیری براده و پیش بینی نیروهای تراش وجود دارد تا بتوان به شرایط تراش بهینه و مناسب دست یافت و مشکلاتی مانند بیرون کشیده شدن الیاف، جدایش لایه‌ها، سوختگی ماتریس و ریش ریش شدن الیاف را به حداقل رساند. برای بررسی شکل گیری براده لازم است تا دو متغیر مهم فرایند یعنی جهت ماشینکاری و راستای الیاف تعریف شوند.

۲-۲-۱-جهت ماشینکاری

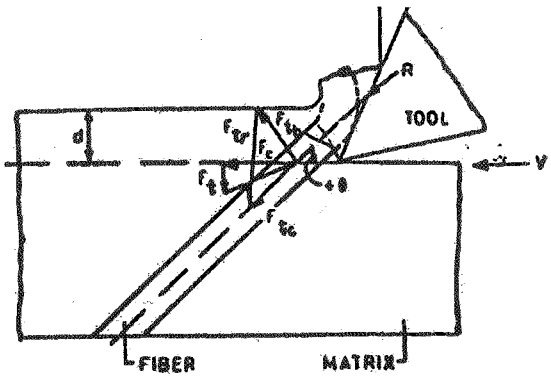
این متغیر به صورت زاویه ای بین بردار سرعت تراش و راستای الیاف، عمود بر لبهٔ برنده ابزار بیان می‌شود.

۲-۲-۲-راستای الیاف

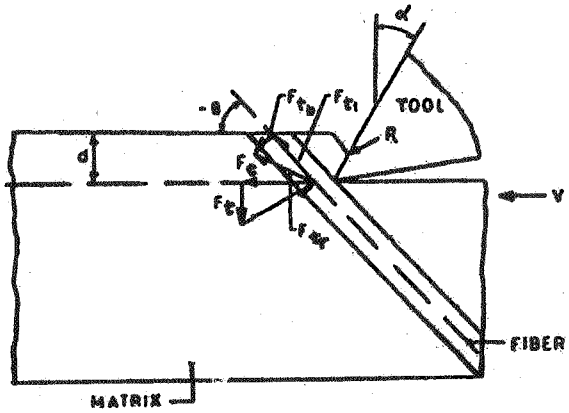
این راستا عبارت است از زاویه سطح ماشینکاری شده و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت اندازه گیری می‌شود. در بعضی از فرایندهای ماشینکاری مانند سوراخکاری، لبه برنده ابزار با الیاف با زوایای مختلف مواجه است که بر روی قابلیت ماشینکاری، ایجاد صافی سطح غیر یکنواخت و حتی توزیع بار بر روی ابزار اثر می‌گذارد. در اکثر مقالات ارائه شده راستای الیاف در وضعیت دو بعدی یا تراش متعامد را می‌توان با در نظر گرفتن جهت ماشینکاری در راستای پادساعتگرد نسبت به سطح ماشینکاری شده مطابق شکل (۳) اندازه گیری کرد. این زاویه از ۰° تا ۱۸۰° است و یا می توان این زاویه را به دو دسته «θ+» برای زوایای ۰° تا ۹۰° و «θ-» برای زوایای ۹۰° تا ۱۸۰° نیز



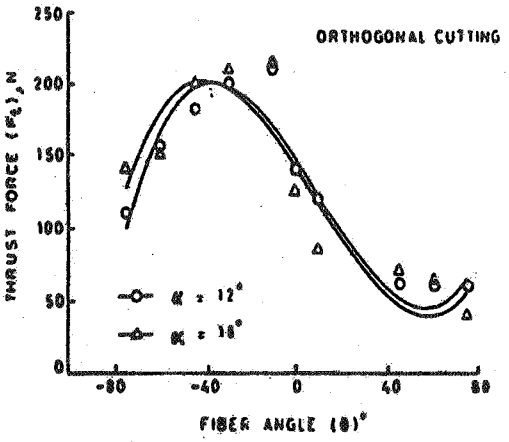
شکل ۳- طرح قرار گرفتن وضعیت الیاف بر مبنای زاویه الیاف در اثنای تراش متعامد



شکل ٤- توصیف طرح مکانیزم ماشینکاری برای θ+ در مواد مرکب الیافی



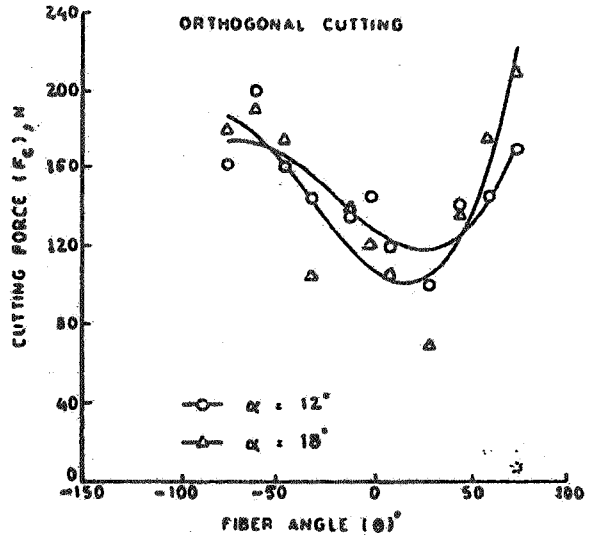
شکل ٥- توصیف طرح مکانیزم ماشینکاری برای θ- در مواد مرکب الیافی



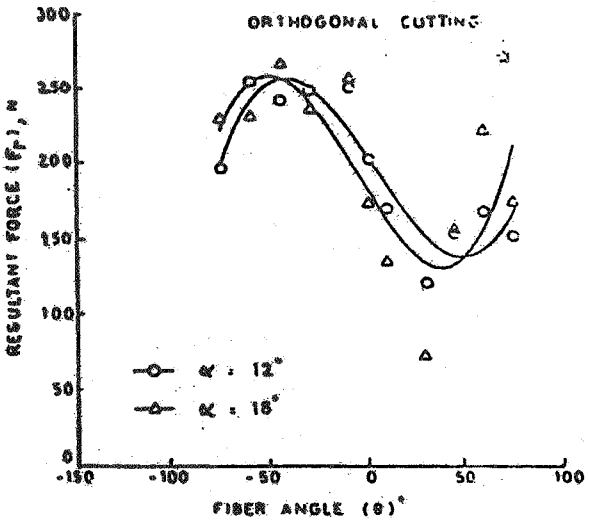
شکل ٦- تغییرات نیروی مقاوم بر حسب زاویه الیاف با زوایای مختلف براده

تقسیم کرد. درحالت «θ+» براده‌ها به ندرت شکل گرفته و الیاف عموما به طرف پایین خم شده و بریده نمی‌شوند، بلکه ترکهای عمیقی در قطعه کار پش رفته و نمونه کار می‌شکنند. در حالت «θ-»، براده در راستای مسیر الیاف به وجود آمده و هیچ ترکی در سطح قطعه کار مشاهده نمی‌شود و سطح تراشیده و تمیزی حاصل می‌شود. به این ترتیب می‌توان پروسهٔ تراش را مطابق با شکلهای (٤) و (٥) به ترتیب برای راستاهای «θ+» و «θ-» شبیه سازی کرد. برای راستای «θ+» سطح براده ابزار سبب می‌شود که الیاف تحت فشار و خمش قرار گرفته و الیاف توسط نیروی تراش به طرف بالا بلند شوند. در این حالت اکثر الیاف با پیشروی لبه برنده شکسته می‌شوند. در حالت «θ-» الیاف در راستای تراش جهت گرفته و با پیشروی ابزار و نیروی تراش تمایل به خمش نشان داده و تحت کشش صدمه دیده و پس از شکستن بیرون می‌آیند [۲].

برای محاسبه نیروهای ماشینکاری با استفاده از نظریه کلاسیک مرچانت [۷و۸] و این حقیقت که زاویه صفحه برش با زاویه الیاف برابر است می‌توان عمل کرد. مطابق با این نظریه، شکل گیری براده به گونه‌ای اتفاق می‌افتد که انرژی لازم برای تراش حداقل شود:



شکل ۷- تغییرات نیروی تراش بر حسب زاویه الیاف با زوایای مختلف براده



شکل ۸- تغییرات نیروی برایند بر حسب زاویه الیاف با زوایای مختلف براده

$$F_c = t_0.A\frac{\cos(\beta-\alpha)}{\sin\theta.\cos(\theta+\beta-\alpha)} \qquad (۵)$$

$$F_t = t_0.A\frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\theta.\cos(\theta+\beta-\alpha)} \qquad (۶)$$

که در معادلات بالا α زاویه براده و β میانگین زاویه اصطکاک است. با توجه به تحقیق [۲] مشاهده می‌شود که نمودار تغییرات نیروی مقاوم در شکل (۶)، نیروی تراش در شکل (۷) و نیروی برایند در شکل (۸) بر حسب زاویه الیاف (θ) دارای تغییرات تناوبی به شکل سینوسی است و این تغییرات نسبت به راستای صفر درجه الیاف، قرینه بوده ولی از مقادیر مطلق مساوی برخوردارند. همان گونه که مشاهده می‌شود مقادیر نیروها در نمونه‌هایی با « $\theta-$ » بیشتر از نمونه های « $\theta+$ » است. نمودار برایند نیروهای ماشینکاری در راستاهای « $\theta-$ » بسیار بیشتر است و حداکثر آن در محدودهٔ راستای -30° تا -60° به دست می‌آید. در شرایط تراش برابر حداقل نیروها برای محدودهٔ راستای الیاف $+30^\circ$ تا $+60^\circ$ رخ می‌دهد. با تغییر زاویه تراش از « $\theta+$ » تا « $\theta-$ » تقریبا افزایشی معادل ۱۰۰٪ در نیروی برایند تراش رخ می‌دهد. درصد افزایش نیروی F_t در مجموع مابین حداقل و حداکثر مقادیر ۴۰۰٪ است و برای نیروی تراش با رفتار کاملا متفاوت نسبت به نیروی مقاوم حدود ۲۰۰٪ است. این نتایج وابستگی شدیدی را بین زاویه الیاف و نیروی تراش نشان می‌دهد.

۳-بررسی پارامترهای تراش

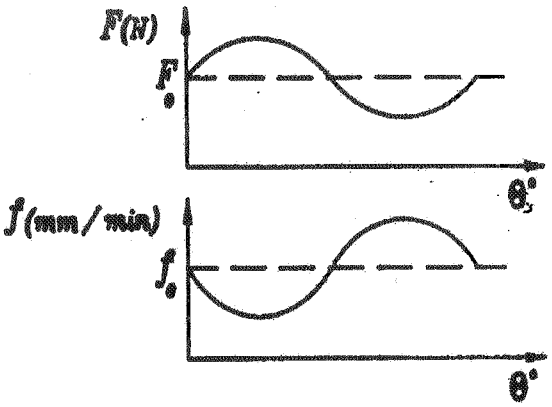
سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار دو پارامتر مؤثر جهت کنترل شرایط ماشینکاری‌اند که برای بهبود وضعیت ماشینکاری، در این کار تحقیقاتی سعی بر آن شده است تا الگویی برای بهینه سازی مقادیر مورد نظر در ماشینکاری مواد مرکب الیافی ارائه شود.

۳-۱-مقدار سرعت پیشروی ابزار

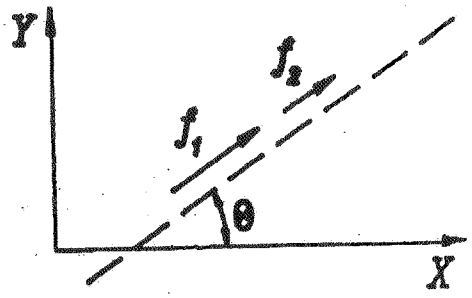
با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل [۲] ملاحظه می‌شود که نیروهای تراش نسبت به زاویه الیاف با راستای تراش، از یک رابطهٔ تناوبی پیروی می‌کنند. بنابراین می‌توان نیروهای تراش را به صورت تابعی از جهت ماشینکاری با راستای الیاف به شکل معادله زیر بیان کرد [۹]:

$$F_\theta = F_0 + K'\sin\theta \qquad (۷)$$

F_θ: نیروی ماشینکاری برای زاویه θ نسبت به راستای الیاف



شکل ۹- رابطه نیروهای تراش و مقدار پیشروی بر حسب راستای الیاف



شکل ۱۰- دو مؤلفه پیشروی با راستای θ نسبت به الیاف و در راستای حرکت به صورت مجزا

F_0: نیروی ماشینکاری به موازات راستای الیاف

K': ضریب ثابت بر مبنای شرایط تراش

θ : زاویه بین جهت ماشینکاری با راستای الیاف

با توجه به رابطهٔ نیروی ماشینکاری و مقدار پیشروی می‌توان طرح سرعت پیشروی بر حسب θ را مطابق شکل (۹) و به شکل معادلهٔ زیر بیان کرد:

$$f_\theta = f_0 - K\sin\theta \qquad (۸)$$

f_θ: مقدار سرعت پیشروی در صفحه، با زاویه θ نسبت به راستای الیاف

f_0: مقدار سرعت پیشروی در صفحه، به موازات راستای الیاف

K: ضریب ثابت بر مبنای شرایط تراش

روابط فوق برای یک لایه مرکب الیافی با الیاف تک جهته به کار می‌روند. در صورتی که الیاف در دو جهت عمود بر هم در یک لایه وجود داشته باشند، مقادیر پیشروی به صورت مجزا در هر راستایی از الیاف به صورت زیر است (در یک لایه مرکب الیافی دو جهته، الیاف بر هم عمودند)

$$f_1 = f_{01} - K_1\sin\theta \qquad (۹)$$

$$f_2 = f_{02} - K_2\cos\theta \qquad (۱۰)$$

f_1, f_2: مقادیر پیشروی در راستای θ برای هر یک از جهات الیاف به صورت مجزا

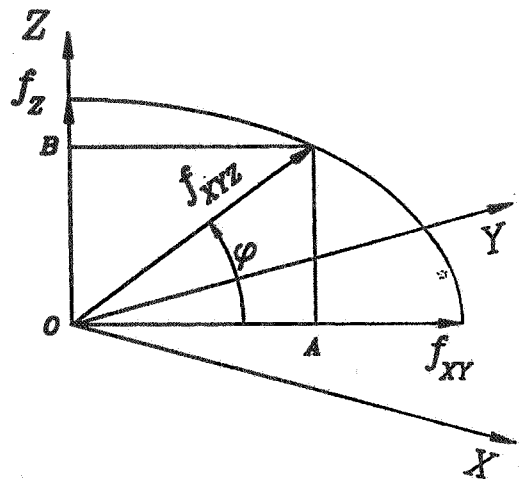
f_{01}, f_{02}: مقادیر پیشروی در راستای الیاف برای هر یک از جهات الیاف به صورت مجزا

K_1, K_2: مقادیر ثابت بر مبنای شرایط تراش برای هر جهت از الیاف

با بررسی ریز ساختاری یک لایه مرکب مشتمل بر الیاف عمود بر هم، می‌توان مقدار پیشروی در صفحه لایه مزبور را به صورت زیر و مطابق شکل (۱۰) محاسبه کرد:

$$f_{xy} = \mathrm{Min}(f_1, f_2) \qquad (۱۱)$$

که f_{xy} پیشروی در صفحه یک لایه مرکب شامل الیاف عمود بر هم است، بدین معنا که مقدار پیشروی برای هر دسته از الیاف در راستای θ محاسبه شده و نهایتا کمترین مقدار بین دو مقدار مزبور به عنوان پیشروی نهایی در صفحه انتخاب می‌شود. در صورتی که حرکت در فضا صورت پذیرد و مقدار حداکثر پیشروی مجاز در راستای Z برابر f_z و مقدار پیشروی در صفحه لایه مرکب f_{xy} باشد، همان گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود با تغییر راستای حرکت در فضا (زاویه ϕ) مقدار پیشروی در فضا (f_{xyz})، بین دو مقدار f_z و f_{xy} تغییر می‌کند. در مواد ایزوتروپ مقادیر f_z و f_{xy} در حالت ایدئال با یکدیگر برابر فرض شده و نتیجتا بردار f_{xyz} نیز با آنها برابر و منحنی شکل (۱۱) ربع دایره خواهد بود. ولی در مواد ارتوتروپ یا مواد مرکب چند لایه ای الیافی با توجه به عدم



شکل ۱۱- مؤلفه‌ها و مقدار بردار پیشروی در فضا

تساوی دو مقدار پیشروی، شکل (۱۱) به ربع بیضی تبدیل می‌شود. مطابق شکل (۱۱) معادله منحنی پیشروی در فضا را برای مواد ارتوتروپ می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$OA^2 / f_{xy}{}^2 + OB^2 / f_z{}^2 = 1 \qquad (۱۲)$$

از سوی دیگر با استفاده از شکل (۱۱) مؤلفه بردار دلخواه f_{xyz} را می‌توان به صورت زیر تجزیه کرد:

$$OA = f_{xyz}.\cos\phi \qquad (۱۳)$$

$$OB = f_{xyz}.\sin\phi \qquad (۱٤)$$

با جایگذاری مؤلفه‌های f_{xyz} در معادله منحنی پیشروی (۱۲) خواهیم داشت [۹]:

$$f_{xyz} = \left[\cos^2\phi / f_{xy}^2 + \sin^2\phi / f_z^2\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (۱۵)$$

نتیجتا با استفاده از معادله (۱۵) می‌توان با مشخص کردن مقادیر f_{xy}، f_z و راستای حرکت، مقدار پیشروی بهینه را در فضا در هر لحظه محاسبه کرد.

۳-۲-مقدار سرعت دورانی ابزار

با توجه به مشخص بودن قطر ابزار و سرعت خطی تراش در هر لایه می‌توان سرعت دورانی ابزار را در هر لحظه با استفاده از معادلهٔ زیر [۹و۱۰] مشخص کرد.

$$s = 1000V / \pi D \qquad (۱٦)$$

s سرعت دورانی ابزار (Rev/min)

V سرعت خطی تراش (mm/min)

D قطر ابزار (mm)

۳-۳- صافی سطح قطعه ماشینکاری شده

با توجه به معادلهٔ به دست آمده برای کنترل صافی سطح در عملیات فرزکاری [۹]:

$$R_a = 0.0642 / D(f / s)^2 \qquad (۱۷)$$

f سرعت پیشروی ابزار بر حسب (mm/min)

D قطر ابزار بر حسب (mm)

s سرعت دورانی ابزار بر حسب (Rev/min)

می‌توان کیفیت صافی سطح قطعه را در هر لحظه در هر نقطه از لایه بر اساس نسبت ثابت f به s کنترل کرد. باید توجه داشت که مقادیر سرعت پیشروی و سرعت دورانی بر طبق مدل حاضر استفاده می‌شوند.

٤- نرم افزار سه بعدی ماشینکاری مواد مرکب الیافی 3D-MCM [۳] و ویژگیهای آن

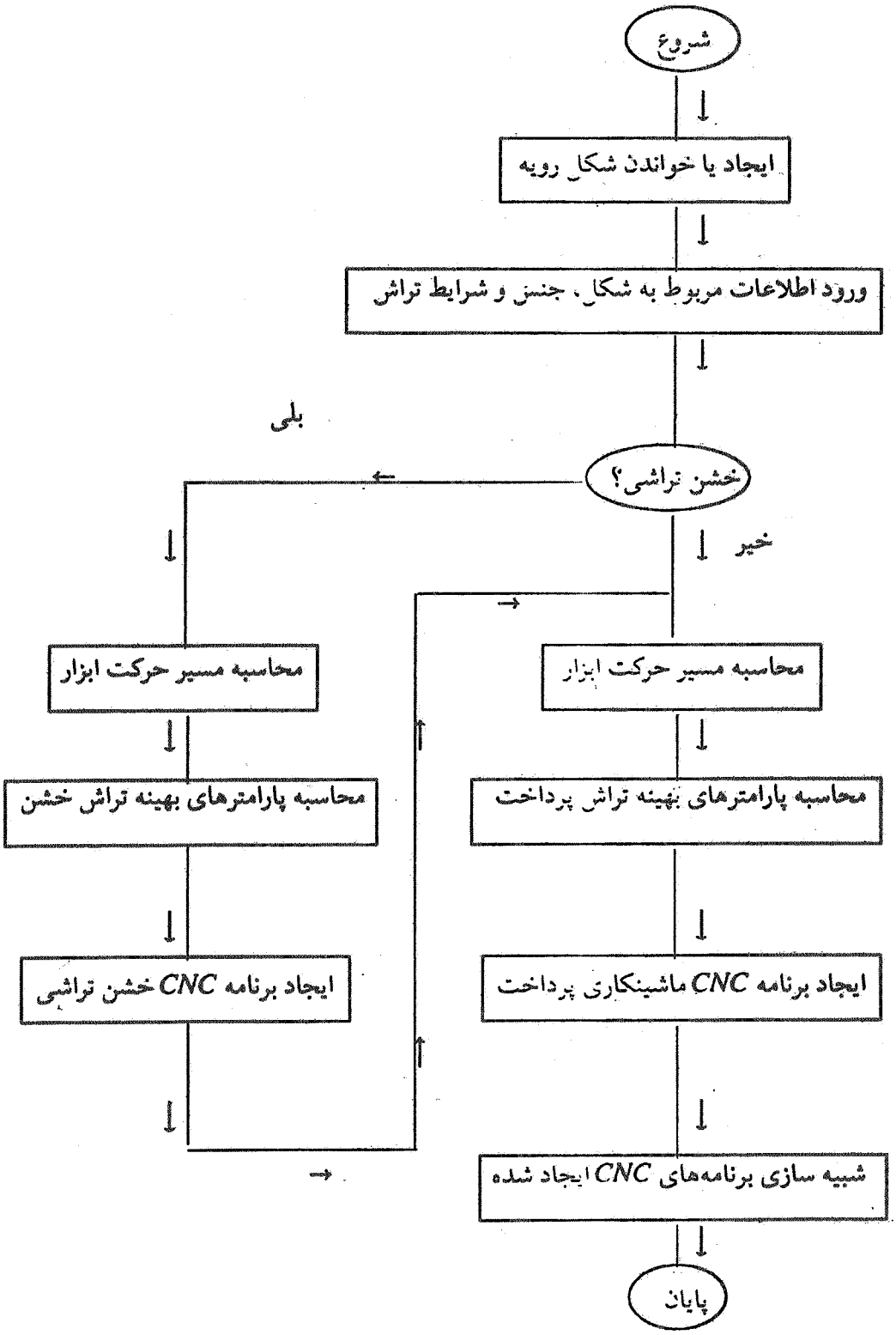
با استفاده از مباحث ذکر شده در بخشهای قبلی، نرم افزاری برای ماشینکاری مواد مرکب چند لایه ای الیافی و هیبریدی تهیه شده که نمودار جریان کار این نرم افزار مطابق شکل (۱۲) به قرار زیر است.

٤-۱-ایجاد و یا دریافت شکل سطح (رویه)

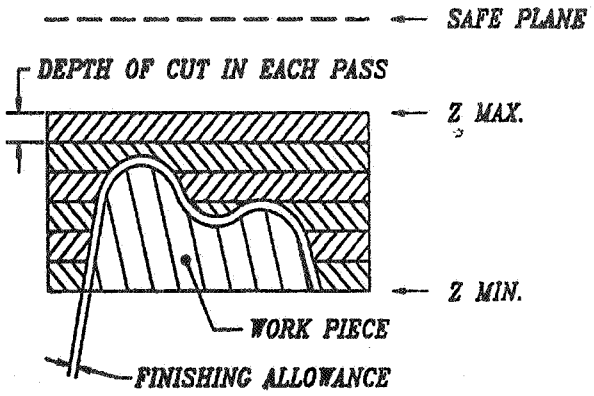
شکل سطح مورد نظر به سه طریق در این برنامه قابل تحلیل است که عبارت‌اند از:

الف)ورود معادله رویه مورد نظر به شکل " $Z = F(x,y)$ " که در آن اگر $F(x,y)$ مشتق پذیر باشد شکل از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود.

ب)فایل مش بندی شده سطح به شکل "DXF" و یا "SCR". این مش بندی‌ها الزاما می‌باید با المانهای مربعی صورت پذیرد و با هر درجه از تقسیم‌بندی و پیچیدگی امکانپذیر است.



شکل ۱۲- روند کار نرم‌افزار



شکل ۱۳ - بعضی از پارامترهای تراش

ج)فایل لیست نقاط سطح تحت عنوان "Digitise" با پسوند PNT که در آن هر خط از فایل شامل مؤلفه‌های یک نقطه از شکل است.

٤-۲-ورود اطلاعات مربوط به شکل، جنس و شرایط تراش

این اطلاعات شامل ابعاد ماده خام و المانهای مورد نظر ماشینکاری برای دستیابی به کیفیت سطح بالا، عمق هر مرحله در عملیات خشن تراشی، میزان بار برای مرحله پرداخت، سطوح شروع و خاتمه ماشینکاری، سطح ایمنی برای عملیاتی نظیر تعویض ابزار، قطر ابزار، سرعت دورانی ابزار، تعداد لایه های موجود در قطعه کار و ضخامت هر لایه، سرعت خطی تراش و جهات الیاف در هر لایه، میزان پیشروی و ثوابت مربوط به هر لایه است. شکل (۱۳) بعضی از پارامترهای تراش را نشان می‌دهد.

٤-۳-محاسبه مسیر حرکت ابزار

در این بخش مسیر حرکت مرکز ابزار سر کروی، بر مبنای شکل سطح و قطر ابزار به دو صورت خشن تراشی و ماشینکاری پرداخت محاسبه می‌شوند و به صورت فایل با پسوند "DXF" یا "SCR" بایگانی می‌شوند. این مسیرها به گونه‌ای محاسبه می‌شوند تا فاصله مرکز ابزار تا سطح شکل مطلوب همیشه ثابت و برابر با شعاع ابزار باقی بماند. در مرحلهٔ خشن تراشی میزان ماده باقی مانده برای مرحلهٔ پرداخت در نظر گرفته شده و عمق تراش در هر مرحله مطابق با شکل (۱۳) رعایت می‌شود.

این فایلها در برنامه‌هایی نظیر ACAD مناسب‌اند.

با توجه به معادلهٔ نقطه‌ای از رویه و مختصات آن، مؤلفه‌های مماس بر سطح رویه در امتداد x و y محاسبه می‌شوند. زوایای این دو بردار با صفحه xy به دست آمده و سپس بردار واحد عمود بر دو بردار فوق در نقطه مزبور تعیین می‌شود. سپس از حاصل ضرب بردار واحد عمود بر سطح رویه و مقدار شعاع ابزار، بردار مطلوب واصل بین مرکز ابزار و سطح رویه به صورت زیر به دست می‌آید [۹]:

$$\overline{N} = \frac{-R.\tan\theta_x.\bar{i} - R.\tan\theta_y.\bar{j} + R}{\sqrt{\tan^2\theta_x + \tan^2\theta_y + 1}} \qquad (۱۸)$$

که R شعاع ابزار سر کروی است. در نتیجه برای محاسبه مختصات قرارگیری مرکز ابزار کافی است تا جمع جبری مؤلفه‌های بردار N با مختصات نقطه‌ای از رویه در هر لحظه صورت پذیرد.

٤-٤-محاسبه پارامترهای بهینه و ایجاد فایلهای ماشینکاری

در این مرحله بر مبنای فایلهای مسیر حرکت ابزار که در بخش قبل ایجاد شده‌اند، میزان پیشروی f_{xyz} و سرعت دورانی ابزار s برای هر المان ماشینکاری شونده بر مبنای خصوصیات لایه مورد نظر، محاسبه شده و در فایل برنامه ماشینکاری در دو حالت خشن تراشی و پرداخت لحاظ می‌شوند. با استفاده از مکانیزم‌های بهینه سازی سرعت پیشروی در این نرم افزار، زمان ماشینکاری قطعه به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، یعنی دیگر لازم نیست تا سرعت پیشروی بر مبنای کمترین سرعت پیشروی در قطعه چند لایه تنظیم شود. همچنین با استفاده از قطر ابزار و سرعت خطی تراش، سرعت دورانی ابزار در هر خط از مسیر حرکت توسط نرم افزار تعیین و در برنامهٔ ماشینکاری ثبت می‌شود. از این رو نیروی وارد بر ابزار و عمر ابزار کنترل می‌شود و ماشینکاری در وضعیت بهینه صورت می‌پذیرد، زیرا سرعت تراش ابزار برای هر جنس مقدار ثابتی نگه داشته می شود. در نتیجه با توجه به اینکه مقادیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی برای هر جنس در هر لایه ثابت نگه داشته می شوند، مقدار صافی سطح مربوط به فرزکاری که از

معادله (۱۷) بدست می‌آید، در تمام عملیات ماشینکاری برای یک جنس ثابت خواهد بود. بدین ترتیب می‌توان صافی سطح را بر مبنای یک سطح ماشینکاری شده مناسب تنظیم کرد.

٤-٥-شبیه سازی مسیر حرکت ابزار

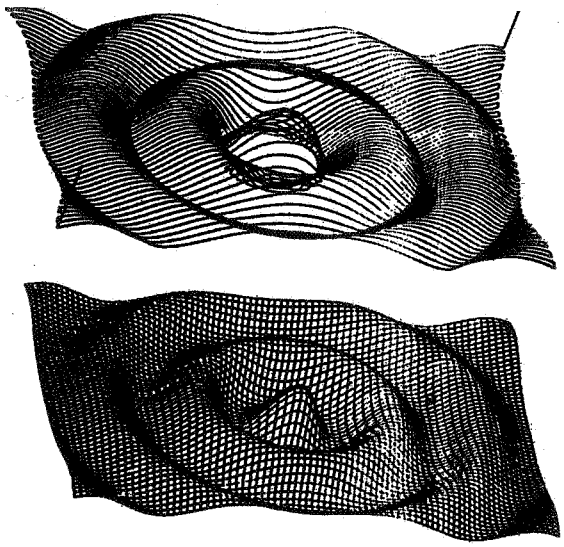
در این بخش می‌توان شکل سطح و مسیر حرکت ابزار را به دو صورت خشن تراشی و ماشینکاری پرداخت مشاهده کرد. شکلهای (١٤) و (١٥) نمونه‌هایی از رویه ایجاد شده را به همراه مسیر حرکت ابزار مربوطه در حالت ماشینکاری پرداخت نشان می‌دهد. از ویژگیهای نرم افزار فوق امکانات شبیه سازی مسیر حرکت ابزار است که می‌توان موارد تست و تصحیح برنامه‌های ماشینکاری را خارج از ماشین ابزار و بر روی رایانه به صورت Offline انجام داد و در زمان استفاده از ماشین ابزار صرفه جویی کرد.

٤-٦-ارتباط با سایر نرم افزارها

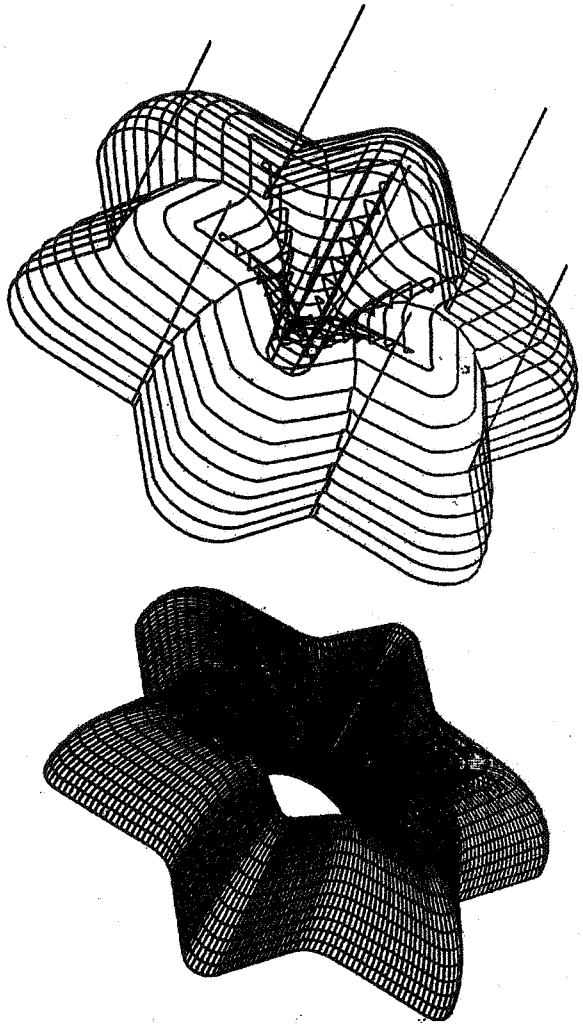
فایلهای خروجی برنامه فوق به دو شکل فایلهای با پسوند DXF یا SCR انتخاب شدند. هر دو دسته فایلها خصوصا SCR از شیوه نمایش مناسبی برخوردار بوده و امکانات نرم افزار ACAD را به خدمت می‌گیرند. فایلهای DXF نیز سازگاری خوبی با اکثر نرم افزارها دارد و می‌توان از شکلهای تولید شده توسط نرم افزار فوق در برنامه‌هایی نظیر NISA و ALGOR استفاده کرد.

٤-٧-بهینه سازی مقدار پیشروی در مواد ایزوتروپ

با وجودی که در مواد ایزوتروپ فرض بر ثابت بودن مقدار پیشروی در تمام جهات است، ولی می‌توان با توجه به برابر نبودن این مقدار برای حرکت در راستای محور و عمود بر محور ابزار از معادله بهینه سازی پیشروی (١٥) استفاده کرد و مقدار پیشروی بهینه برای مواد ایزوتروپ را به دست آورد.



شکل ١٤- نمونه‌ای از یک رویه پیچیده با استفاده از معادله $Z = f(X, Y)$ و مسیرهای ماشینکاری آن



شکل ١٥- رویه و مسیر حرکت ابزار برای قطعه ایجاد شده با استفاده از ترکیب سطوح

جدول ۱ - خصوصیات مواد جزء در ساخت قطعات کامپوزیتی

ماده	دانسیته g/cm^3	استحکام کششی Mpa	مدول کشسان GPa
چوب	۰/۵	۷٤	۱۰
الیاف شیشه E	۲/۵۵	۲٤۰۰	۷۲/٤
اپوکسی	۱/۳۰	۹۰	۳

۵-آزمایشات

۵-۱-سیستم ماده

برای بررسی عملکرد برنامه، تعدادی نمونه‌های مواد مرکب هیبریدی از اتصال صفحات مواد مرکب چند لایه ای الیافی "GRP[4]" با نمد الیاف شیشه خرد شده (CSM[5]) و الیاف شیشه بافته شده دو جهته (WR[6]) و ماتریس اپوکسی با لایه‌های چوب (چوب نیز یک نوع ماده مرکب پلیمری الیافی پیچیده است) در راستای الیاف مشخص، ساخته شده است. ضخامت لایه GRP برابر ۵mm و متشکل از ۵ لایه با چیدمان (WR/CSM/WR/CSM/WR) می‌باشد و ضخامت لایه چوب ۱۰mm در نظر گرفته شده است. خصوصیات الیاف و ماتریس و چوب در ساخت نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. رزین اپوکسی از نوع آرالدیت CY230 از شرکت CIBA هندوستان است. سخت کننده از نوع HY951 از شرکت CIBA هندوستان بوده و به مقدار ۸ درصد از کل وزن رزین است و در دمای معمولی اتاق به روش خوابانیدن دستی با الیاف ترکیب شده و سپس لایه چوب بر روی آن قرار گرفته و در دمای معمولی اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) عملیات پخت انجام شده است. سپس بعد از گذشت ٤ روز نمونه‌ها آزمایش و ماشینکاری شده‌اند. لایه های چوب در دو وضعیت به GRP چسبیده اند. بعضی نمونه‌ها از یک لایه چوب و یک لایه GRP و بعضی نمونه‌های دیگر از دو لایه چوب که یک لایه GRP در وسط آن قرار گرفته، تشکیل شده‌اند. راستای الیاف چوب در امتدادهای متفاوتی نسبت به راستای الیاف شیشه قرار گرفته تا شرایط مختلف ماشینکاری ارزیابی شود. کسر حجمی الیاف در ماده مرکب GRP از طریق آزمایش استاندارد ASTM D792 برای یافتن دانسیته کامپوزیت و آزمایش استاندارد ASTM D3171 برای از بین بردن ماتریس و به دست آوردن وزن الیاف قابل محاسبه است. میانگین کسر حجمی الیاف شیشه ۲۰ درصد به دست آمده است.

۵-۲-تجهیزات

قطعات مواد مرکب هیبریدی تهیه شده مطابق بالا توسط ماشینهای فرز CNC با مشخصات زیر ماشینکاری شدند:

الف)فرز CNC از نوع DECKEL-FP4NC با ۲/۵ محور کنترل

ب)فرز CNC از نوع DECKEL-FP4NC با ٤ محور کنترل

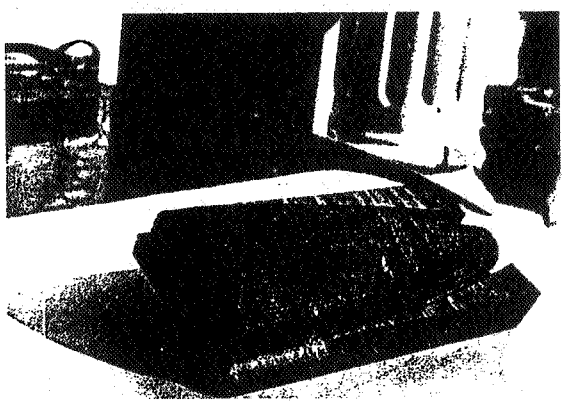
پ)فرز CNC از نوع MAHO-800 با ٤ محور کنترل

۵-۳-ابزارهای به کار رفته

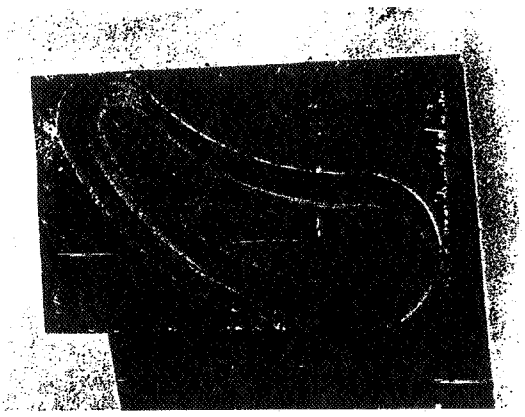
برای ماشینکاری قطعات مورد نظر از تیغه‌های فرز سر کروی با قطرهای ٦ و ۱۲ میلیمتر از جنس فولاد تندبر (HSS[7]) استفاده شده است.

٦-شرح آزمایش

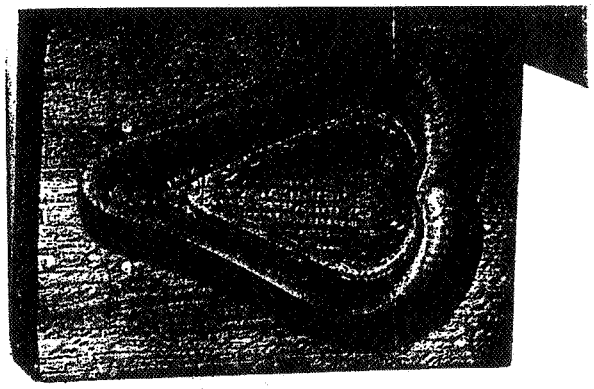
ماشینکاری قطعات با دو برنامه خشن تراشی و سپس ماشینکاری پرداخت بر روی مواد صورت پذیرفته و قطعات یک بار بدون استفاده از عملیات بهینه سازی و بار دیگر با استفاده از عملیات بهینه سازی عوامل تراش ماشینکاری شدند. ضمنا کلیه عملیات ماشینکاری بدون استفاده از مایع خنک کننده انجام پذیرفته است. لازم به توضیح است که برای اجرای برنامه بر روی ماشین فرز نوع الف در قسمت تجهیزات از یک برنامه برای تبدیل ۳ محور به ۲/۵ محور استفاده شده است. در هر مرحله خشن تراشی عمق تراش ۱۰ میلیمتر و در مرحله



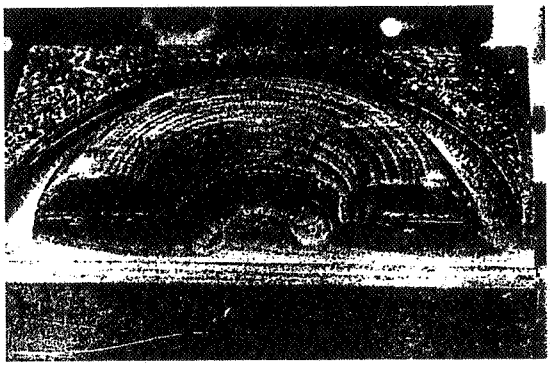
شکل ۱۶- تصویر قطعه ماشینکاری شده توسط نرم افزار با استفاده از ترسیمات هندسی



شکل ۱۷- تصویر قطعه ماشینکاری شده توسط نرم افزار با استفاده از لیست نقاط سطح



شکل ۱۸- تصویر قطعه ماشینکاری شده توسط نرم افزار با استفاده از ترکیب سطوح



شکل ۱۹- تصویر قطعه ماشینکاری شده توسط نرم افزار با استفاده از ترکیب سطوح

پرداخت عمق نهایی تراش ۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

۷-نتایج

بر اساس مشاهدات انجام شده بر روی قطعات در هنگام ماشینکاری و بعد از عملیات و همچنین مقاسیه پارامترها در حین آزمایشات مختلف نتایج زیر به دست آمده است:

در تحقیقات حاضر روشی برای مدلسازی بهینه ماشینکاری مواد مرکب لایه ای بر اساس سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار ایجاد شده که موفقیت آمیزتر از مدلهای ارائه شده قدیمی است. بر اساس مدل جدید، نرم افزار مخصوصی تهیه شده که شرایط ماشینکاری برای مواد غیر ایزوتروپ را بهبود می‌بخشد. در مواد مرکب هیبریدی با توجه به اینکه هر لایه از خصوصیات و مکانیزم براده برداری متفاوتی برخوردار است، با استفاده از تعریف یک مکانیزم بهینه سازی سرعت پیشروی، در تحقیقات حاضر، مشاهده شد که زمان ماشینکاری یک قطعه به مقدار قابل توجهی نسبت به ماشینکاری با پیشروی ثابت، کاهش یافته است.

کاهش زمان ماشینکاری توسط مکانیزم بهینه سازی پیشروی به سه عامل بستگی دارد:

الف) اختلاف سرعت پیشروی در مواد به کار رفته در یک قطعه

ب)اختلاف سرعت پیشروی در حالت عمودی و افقی در هر لایه

ج)میزان تغییرات عمق در حین عملیات ماشینکاری

میزان کاهش زمان در قطعات ماشینکاری شده تا ٤٥ درصد نسبت به حالت ماشینکاری با پیشروی ثابت برخوردار است.

با استفاده از کنترل سرعت خطی تراش در هر لایه و با توجه به رابطه صافی سطح در عملیات فرز کاری، و تغییرات لحظه ای سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار، مشاهده شد که قطعه کار از صافی سطح یکنواختی در هر لایه برخوردار است. با توجه به شکل پیچیدهٔ سطوح ماشینکاری شده در رویه‌هایی نظیر شکلهای (١٤) یا (١٥)، یکنواخت بودن صافی سطح در همه جا بر روی رویه دارای اهمیت زیادی است.

از مشکلات عمده ماشینکاری مواد مرکب ماتریس پلیمری، عموما سوختگی ماتریس، ریش ریش شدگی الیاف و بیرون آمدن الیاف از ماتریس و همچنین متورق شدن لایه ها را می‌توان ذکر کرد که در نمونه‌های ماشینکاری شده هیچ‌کدام از نواقص فوق رخ نداد. شکلهای (١٦) تا (١٩) تصاویر نمونه‌هایی از سطوح ماشینکاری شده توسط نرم افزار مورد بحث را نشان می‌دهد.

با وجودیکه فلزات در عملیات ماشینکاری به صورت مواد ایزوتروپ فرض می‌شوند، لیکن می‌توان به علت تفاوت سرعت پیشروی در حالت عمود بر محور ابزار و در راستای محور ابزار، از معادله (١٥) برای بهینه سازی سرعت پیشروی در فرز کاری سه بعدی فلزات نیز بهره گرفت که زمان ماشینکاری را به طور مناسب کاهش می‌دهد.

واژه‌نامه

1. fiber reinforced composites
2. hybrid composites
3. dimensional machining of composite materials
4. glass reinforced polymer
5. chopped strand mat
6. woven roving
7. high speed steel

مراجع

1. Konig, W., Wulf, Ch., Grass, P., and Wilerschied, H., "Machining of Fibre Reinforced Plastic "Annals. of CIRP, Vol. 34, No. 2. pp 537-548, 1985
2. Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., and Komanduri, R., "On the Machining of Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates;' Int. J. of Machine Tools Manufacturing, Vol. 35, No. 5, pp 701-716, 1995
3. Wallbank, J., Pashby, I.R., and Kim, Y.H., "A Comparison Between the Chip Forming Behavior and the Surface Integrity in Reinforced and Non-Reinforced Polymeric Materials," Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, ASM, Chicago, Illinois, pp 205-211, 1992
4. Koplev, A., Lystrup, Aa., and Vorn, T., "The Cutting Process, Chips and Cutting Forces in Machining CFRP, J. of Composites, Vol. 14, No. 4, pp 371-376, 1983
5. Caprino, G., Santo, L., Nele, L., "On the Origin of Cutting Forces in Machining Unidirectional Composite Material, "Engineering system Design and Analysis, PD-Vol. 75, ASME, Vol. 3, pp 83- 89, 1996
6. Arola, D., Ramulu, M., and Wang, D.H., "Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite/ Epoxy Compositd, "J. of Composites, Part A, Vol. 27A, No. 2, pp 121-133, 1995
7. Shaw, M.C., Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, London, 1984
8. Komanduri, R., "Machining and Grinding- A Historical Review of Classical Paper," ASM , Applied Mechanics Review, Vol. 46, No. 3, pp 80-132, 1993.
9. خرمی، آ.، "بررسی پارامترهای مؤثر بر ماشینکاری مواد مرکب الیافی با ماتریس پلیمری و تهیه نرم افزار برنامه‌نویسی ماشینکاری سه بعدی این مواد به کمک رایانه،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بهمن ١٣٧٧.
10. Boothroyd, G., Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, McGraw Hill, 1981.