بسمه تعالی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان :

مدل سازی خمش تیغ فرز انگشتی و مقایسه آن با نتایج تئوری و آزمایشات تجربی

استاد راهنما : آقای دکتر محمد رضا رازفر

تهیه کننده : رضا جلیلی صفار (۸۳۱۲۶۱۷۹)

پاییز ۸۵

شماره :
تاریخ :

فرم اطلاعات پایان‌نامه کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : رضا جلیلی صفار **دانشجوروزانه**

شماره دانشجویی : ۸۳۱۲۶۱۷۹ **دانشکده :** مهندسی مکانیک **رشته تحصیلی : ساخت وتولید**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : دکترعبدالرضااوحدی همدانی

عنوان به فارسی : تحلیل تغییر شکل ابزار و خطای ناشی از آن در فرآیند فرزکاری با انگشتی

عنوان به انگلیسی : **Analysis of tool deflection and correlated errors in end milling**

نوع پروژه : کارشناسی ارشد **کاربردی** ■ **بنیادی** □ **توسعه‌ای** □ **نظری**

تاریخ شروع : ۸۳/۷/۹ **تاریخ خاتمه :** ۸۵/۱۱/۳ **تعداد واحد :** ۶

سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

واژه های کلیدی به فارسی : خیز ابزار، شبیه سازی فرآیند فرزکاری با تیغ فرز انگشتی، بهنه سازی پارامترهای ماشینکاری

واژه های کلیدی به انگلیسی : **End Milling, Simulation, Machining Forces, Optimization**

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما : دکترمحمد رضا رازفر

دانشجو : رضا جلیلی صفار **امضا استاد راهنما :** **تاریخ :**

نسخه ۱) معاونت پژوهشی

نسخه ۲) کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تصفیه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به

مادرم

تشکر و قدردانی :

با تشکر و سپاس فراوان از استاد گرانقدر جناب آقای *دکتر محمد رضا رازفر* که با زحمات بی شائبه ایشان و کمک ویاری خداوند توانستم پایان نامه کارشناسی ارشد را به اتمام برسانم.

چکیده:

این طرح ارائه گر مدلی برای پیش بینی مقدار خمش تیغ فرز انگشتی در فرآیند فرز کاری است. در این طرح ابتدا با شبیه سازی فرآیند، فرز کاری با تیغ فرز انگشتی (ابزار) توسط نرم افزار *ABAQUS*، مقادیر نیرو و خمش حاصل از آن در ابزار بدست آورده شده، سپس این مقادیر با مقادیر حاصل از فرمولهای تئوری و نتایج حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه شده است.

در این طرح بعد از رسیدن به توانمندی شبیه سازی فرآیند، با استفاده از فرمولهای تئوری در مورد نیروی وارد به ابزار و خمش الاستیک آن، پارامترهای ماشینکاری برای به حداقل رساندن خمش ابزار توسط الگوریتم ژنتیک، بهینه شده است.در این طرح با شبیه سازی فرآیند مقادیر نیرو و خمش ابزار با تقریب بسیار بالا در مقایسه با فرمولهای تئوری بدست آورده شده است، که با کمک این مدل می توان علاوه بر نیروی وارد بر ابزار و مقدار خمش الاستیک آن پارامترهای دیگری چون ارتعاشات ابزار، سایش ابزار، مقدار حرارت تولید شده در ابزار و . . . را نیز بدست آورد.

شایان ذکر است که شبیه سازی فرآیند فرزکاری با تیغ فرز انگشتی برای اولین بار انجام شده است. امید است که ارائه این طرح آغازی برای تحقیقات بیشتر در این راستا باشد.

فهرست

مطلب	شماره صفحه
چکیده	الف
فهرست	ب
فهرست اصطلاحات و علائم	ج
مقدمه	و
پیشینه طرح	ه
اهداف و فرضیات طرح	ی
فصل ۱: ابزار تک لبه و چند لبه	۱
۱-۱. مقدمه	۲
۱-۲. هندسه برشی ابزارهای تک لبه	۲
۱-۳. هندسه برشی ابزارهای چند لبه	۳
فصل ۲: مدل تئوری برای پیش بینی نیروی ماشینکاری	۸
۲-۱: مقدمه	۹
۲-۲- مدل سنتی نیروی برشی	۹
۲-۳: مدل نیروی برشی برای ابزارهای میکرو	۱۳
۲-۴: مقدمات عملی	۲۰
فصل ۳: شبیه سازی فرآیند فرزکاری با ابزار انگشتی(سه بعدی)	۲۲
۳-۱: آخرین پیشرفت ها	۲۳
۳-۲: صورت تحلیلی عددی	۲۴

۳-۳: جنبه های مکانیکی ۲۶

۳-۴: جدایش براده ۲۸

۳-۵: تکنولوژی شبیه سازی شکل گیری براده ۳۰

۳-۶: آنالیز انتقال حرارت در فرآیند فرزکاری ۳۳

فصل ۴: تئوری خمش ابزار انگشتی در فرآیند فرزکاری ۳۷

۴-۱. مقدمه ۳۸

۴-۲. روشهای تخمین مقدار خیز ابزار انگشتی ۳۸

۴-۳. آنالیز خمش در ابزار انگشتی ۳۹

۴-۴. مدل پیشنهادی برای تخمین خمش ابزار انگشتی بصورت تئوری ۴۲

فصل۵: الگوریتم ژنتیک ۴۵

۵-۱. مقدمه ۴۶

۵-۲.الگوریتم ژنتیک چیست؟ ۴۸

۵-۳. ایده اصلی ۵۱

۵-۴. الگوریتم ۵۲

۵-۵. روشهای نمایش ۵۲

۵-۶. روشهای انتخاب ۵۳

۵-۷. روشهای تغییر ۵۴

۵-۸. نقاط قوت الگوریتم ژنتیک ۵۵

۵-۹. محدودیتهای GA ها ۵۶

۵-۱۰. تغییر ازیک نسل به نسل بعدی ۶۰
۵-۱۱. جهش ۶۱
فصل۶: آزمایشات تجربی ۶۲
۶-۱. مقدمه ۶۳
۶-۲. نتایج حاصل از آزمایشات تجربی ۶۳
فصل۷: نتایج ۷۰
۷-۱: مقدمه ۷۱
۷-۲: نتایج حاصل از روابط تئوری ۷۱
۷-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی ۷۵
۷-۴: مقایسه نتایج شبیه سازی و تئوری با آزمایشات تجربی ۷۷
۷-۵: بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۸۳
فصل ۸: بحث و نتیجه گیری ۸۶
منابع و مراجع ۹۴

فهرست اصطلاحات و علائم

Micro-end-milling-operations	MEMO
conventional end-milling operations	CEMO
on-machine measurement	OMM
computer-aided design	CAD
computer-aided Manufacturing	CAM
computer-aided inspection	CAI
cutting line	CL
مختصات در جهت پیشروی	x
مختصات در جهت نرمال	y
مختصات عمود بر صفحه $x-y$	z_c
زمان (s)	t
نیروی برشی مماسی (N)	F_t
نیروی برشی شعاعی (N)	F_r
نیروی برشی در جهت پیشروی (N)	F_x
نیروی برشی در جهت نرمال (N)	F_y
شعاع ابزار (mm)	r
تعداد دندانه ابزار	Z
عدد ترتیبی دندانه ابزار	z
زاویه مارپیچ ابزار (rad)	β
سرعت اسپیندل (rpm)	n
سرعت دایره ای اسپیندل ($1/s$)	ω
سرعت پیشروی (ipm)	f
پیشروی به ازای دندانه ($mm/tooth$)	f_t
عمق برش (mm)	b
عرض برش (mm)	a
زاویه برشی ابزار (rad)	θ
زاویه شروع انتگرال گیری (rad)	θ_s

θ_e	زاویه پایان انتگرال گیری (rad)
h	ضخامت براده (mm)
λ	زاویه پیشروی (rad)
α	زاویه درگیری (rad)
φ	زاویه برشی قطعه کار (rad)
ψ	زاویه برنده ابزار (rad)
F_u	نیروی واحد (N)
p	ضریب تناسب
K_m	ضریب ماده (N/cm^2)
r_o	طول لنگی (mm)
γ	زاویه لنگی (rad)

مقدمه:

درستی تلرانس در سطح ماشینکاری شده اولین پارامتر مهم در فرآیند فرزکاری است. یکی از عواملی که باعث خطا در سطح ماشینکاری می شود، خمش الاستیک تیغ فرز انگشتی در فرآیند فرزکاری است. در نتیجه احتیاج برای خنثی کردن خمش تیغ فرز انگشتی (ابزار) طلایه شده است، زیرا در آینده طراحی قالبهایی نیاز است که کوچک وکوچک تر می شوند و پیوسته دقتشان افزایش می یابد. در مواقعی که ابزار کوچک می شود این خمش شدید تر می شود، با در نظر گرفتن جبران خمش ابزار می توان شکل قالب ها را تضمین کرد.

برای پیش بینی خمش ابزار و حذف آن نیاز به دانستن ویژگیهای استاتیک و دینامیکی سیستم دارد. برای بدست آوردن این خصوصیات نیاز به انجام تست های تجربی دارد، که بدون وجود تجهیزات پر هزینه امکان پذیر نمی باشد. مهمترین موضوع در آنالیز استاتیکی و دینامیکی خمش تیغ فرز انگشتی نیروها هستند. مدلهای تئوری مختلفی که برای پیش بینی مقدار نیروی وارد شده به ابزار وجود دارد، تنها یک مدل تئوری نیستند. بدین معنی که برای پیش بینی نیرو آزمایشات تجربی نیز لازم است.

در آزمایشات تجربی ابتدا ضریب ثابت نیروی مخصوص قطعه کار (K_m) بدست آورده می شود، سپس با استفاده از مدل تئوری نیرو های وارد به ابزار پیش بینی می شود. در نتیجه در آنالیز تئوری خطای آزمایشات تجربی همیشه دخیل است و بدون انجام این آزمایشات پیش بینی نیرو امکان پذیر نمی باشد.

اشکال دیگری که می توان بر مدل تئوری گرفت این است که در آن شیار های روی سطح ابزار در نظر گرفته نمی شود و این برای محاسبهٔ مقدار خیز ابزار در مدل تیر یک سر گیر دار بسیار مو ثراست و باعث ایجاد خطایی دیگر می شود. اما در این طرح با شبیه سازی فرایند فرزکاری با تیغ فرز انگشتی، توسط نرم افزار ***ABAQUSE***، نیروهای ماشینکاری و مقدار خمش تیغ فرز انکشتی با تقریب خوبی پیش بینی شده است.

انجام چنین تحلیلی جز با شناخت و درکی اساسی از هندسهٔ ابزار های برش تک و چند لبه، روابط بین نیروهای برش با متغییرهای برش و نحوهٔ تعامل آنها با هندسهٔ ابزار امکان پذیر نمی باشد. به همین دلیل نخست، هندسه ابزارهای برش در حالت عمومی مورد تحلیل قرار گرفته است و در ادامه مدل تئوری و شبیه سازی مورد استفاده برای پیش بینی نیروهای برشی و خمش ابزار ارائه می شود و این نتایج با آزمایشات تجربی نشان دهندهٔ برتری روش شبیه سازی دارد. در نهایت توسط الگوریتم ژنتیک، پارامترهای ماشینکاری برای مینیمم کردن خمش ابزار بهینه شده است.

پیشینهٔ طرح :

Martellotti در سال ۱۹۴۱ در مورد سینماتیک فرزکاری با انگشتی تحقیقـاتی را انجـام داده اسـت. Macneil , Tlusty در مورد تغییرات نیرو در فرزکاری با انگشتی در حین شرایط برش حالـت پایـا و گذرا مطالعاتی را انجام دادند .

در یک سری مقاله از Kline , Devor و همکارانش، مدل مکانیکی برای پیش‌بینی نیروها در فرزکاری با انگشتی نشان داده شده است . Yellowley یک مدل نیرویی را توسعه داد کـه نیروهـا را در سـطح براده و سطح آزاد لبه‌های برنده تفکیک کرده بود .

Altintas و همکارانش یک الگوریتم لحظه ای (real-time) را جهت آشکارسـازی گسـیختگی ابـزار در عملیات فرزکاری ایجاد کردند .

Sutherland , Devor یک روش بهبودیافته را جهت پیش‌بینی نیـروی بـرش و خطـای سـطحی در سیستم فرزکاری با انگشتی انعطاف‌پذیر توسعه دادند .

Armergo , Deshpand در مورد تاثیر لنگی ابزار در فرایند ماشین‌کاری تحقیقاتی را انجام دادنـد و یک مدل کامپیوتری پیش‌بینی نیرو ، برای فرایند فرزکاری بـا انگشـتی سـرتخت (flat end) توسـعه دادند .

همانطور که در بالا دیـده مـی‌شـود کارهـای زیـادی در مـورد فراینـد end miling صـورت گرفتـه و کمترکاری در مورد ball end miling صورت گرفته است .

Altintas , Yucesan , Fuh , Tai مطالعاتی را در مورد انگشتی‌های سر کروی داشته‌اند .

اهداف و فرضیات طرح :

با توجه به اهمیت روز افزون درستی تلرانس در فرآیندهای فرزکاری با تیغ فرز انگشتی، هدف از انجام این پروژه، پیش بینی خمش ابزار در فرآیند فرزکاری با تیغ فرز انگشتی بر اثر نیروهای برش توسط شبیه سازی فرآیند است. تا در نهایت با بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری توسط الگوریتم ژنتیک بتوان به شرایطی رسید که در آن مقدار خمش ابزار مینیمم است. در این پروژه برای اینکه صحت مدل سازی بیان شود، نتایج حاصل از آن با آزمایشات تجربی و روابط تئوری مقایسه شده است.

در این طرح مانند هر تحقیق دیگر از برخی فرضیات برای مدلسازی فرآیند استفاده شده است که این فرضیات عبارتند از :

۱- فرض صلبیت سازه های ماشین ابزار
۲- فرض عدم خارج از مرکز بودن ابزار برش
۳- فرض مدل تیر یک سر گیر دار برای ابزار برش
۴- فرض همگنی قطعه کار
۵- فرض شارش بدون عیب براده از فضای ماشینکاری
۶- عدم وجود ارتعاشات واداشته

از این فرضیات در مدل سازی فرآیند استفاده شده است که فرضیات فوق بطور ضمنی یا صریح در بدست آوردن مدل اعمال شده اند و مشخصاً اعمال این ساده سازی ها خطاهایی در پی خواهد داشت که این خطاها در مقایسهٔ بین نتایج تجربی با شبیه سازی نمود پیدا می کنند.

فصل اول

ابزار تک لبه و چند لبه

۱-۱ مقدمه:

تحقیق روی ابزار های برش و فرآیند های ماشینکاری، بایستی منجر به بهبود کارآیی فرآیند ماشینکاری، طرح سازه ای ماشین ابزار، موتورها، قید و بندهای موجود در فرآیند ماشینکاری و سیستم سرمایشی ماشین ابزار گردد، که نتیجه مستقیم آن افزایش حجم و کیفیت تولید است.
تحلیل و بررسی قوانین حاکم بر عملیات برش توسط ابزارهای فرز کاری بدون شناخت هندسه ابزار، تعیین روابط هندسی حاکم بر ساختار ابزار، درک اساسی قوانین و نظریه های مکانیکی، شناخت مواد ابزار و قطعه کار، ممکن نیست. نظر به اهمیت هندسه ابزارهای برش و روابط هندسی حاکم بر این ابزارها، تجزیه و تحلیل دقیق هندسه ابزارهای تک و چند لبه، امری بسیار بدیهی می نماید. مرسوم است که ابزارهای چند لبه فرزکاری را به صورت تعمیمی از ابزارهای تک لبه تراش مورد تحلیل قرارداده شود. در فصل پیش رو، *هندسه ابزار های تک لبه و چند لبه* بصورت جامع و کامل بررسی شده است.

۱-۲ هندسه ابزارهای برشی تک لبه

شناخت و تحلیل ابزاررهای تک لبه، اساس تحلیل ابزارهای چند لبه می باشد، همچنانکه یک ماشین تراش تک موتوره اساس تحلیل سایر ماشین ابزارهاست، ابزار های تک لبه نیز اساس تحلیل های مهندسی در مورد ابزارهای چند لبه است. در شکل(۱-۱)، ساختار عمومی یک ابزار تک لبه به همراه زوایای مهم دخیل در فرآیند ماشینکاری نشان داده شده است. اثرات زوایای عملیاتی در فرآیند تراش مشابه اثر زوایای متناظر در ابزارهای چند لبه فرزکاری، سوراخ کاری و . . . می باشد. برخی از مفاهیم و تعاریف که در شکل نشان داده شده، به قرار زیر است :

- *لبه برنده*

لبه ای از سطح جلوی قلم است که بمنظور انجام عمل برش در نظر گرفته شده است.

- *نوک قلم*

قسمت نسبتا کوچک از لبه برنده است که محل برخورد لبۀ برنده اصلی و فرعی می باشد.

- *زوایه جانبی براده*

شیب سطح جلوی قلم است که در تراش متعامد نسبت به امتداد عمود بر سطح تراشیده شده سنجیده می شود این زاویه یکی از متغییرهای مهم در تراش می باشد.

- *زاویه آزاد*

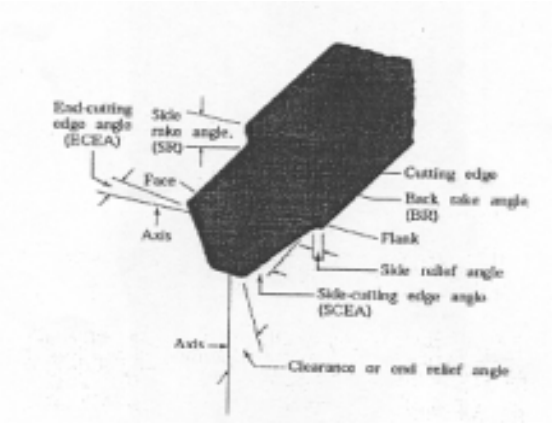
زاویه بین سطح آزاد و تراشیده شده روی قطعه کار بوده و تاثیر مستقیم روی فرسودگی قلم دارد.

- *زاویه برش*

زاویه بین سطح براده و سطح برش است.

- *زاویه براده لبهٔ برنده اصلی*

زاویای است بین لبه برنده اصلی و خط عبوری از نوک قلم به موازات صفحه پایه و در صفحه ای گذرنده از لبه برنده اصلی و عمود برصفحه پایه.



شکل(۱-۱): نمایش زوایای مهم کارکردی در یک ابزار تک لبه

۱-۳ ابزارهای برشی چند لبه

۱-۳-۱ ابزارهای برش در فرزکاری

عموماً ابزارهای برش در فرزکاری از نقطه نظر قابل تعویض پذیری لبه های برنده ابزار به *ابـزار هـای انگشتی و ابزار های اینسرتی* طبقه بندی می شوند. عموماً ابزار انگشتی به ابزاری اطلاق می شود، که در آن بار برداری از طریق حرکت دورانی و انتقالی ابزار نسبت به قطعه کار اتفاق می افتد.
ابزارهای انگشتی را می توان براساس تعداد شیارهای موجود در ابزار یا اساس هندسه قسمت ماشـینکار ابزار طبقه بندی کرد. انتخاب مناسب ترین ابزار فرزکاری در یک عملیات ویژه بـه هندسـه بـرش، مـاده تحت برش، تعداد قطعات و نوع ماشین بستگی دارد و برای تعیین تعداد دندانه های ابزار انگشتی، قانون عمومی وجود نداشته و تنها از دو *قانون سر انگشتی* زیر می توان بهره برد :

۱. نباید تعداد دندانه ها به حدی زیاد باشد که فضای بین براده ها را محدود کرده و موجـب عـدم شارش مناسب براده گردد.
۲. فضای مخصوص شارش براده باید بدون گوشه های تیز باشد، تـا بـراده موجـود در فضـای بـین دندانه ای در حین ماشینکاری موجب مسدود شدن محل شارش براده نگردد.

۲-۳-۱ گوناگونی ابزارهای انگشتی

ابزارهای انگشتی متداول از دیدگاه تعداد شیار های موجود در ابزار به گروه های زیر قابل طبقه بندی هستند:

۱- ابزار دو شیاره

این ابزار دارای بیشترین فضای ممکن برای جهت دفع براده و مناسب برای خشن تراشی می باشد.

۲- ابزار سه شیاره

این ابزار بیشتر برای خشن تراشی شیار مناسب می باشد، ولی در صورتی که برای شیار صافی سطح بالا نیاز باشد کاربرد چندانی ندارد.

۳- ابزار چهار شیاره

ابزاری بی نظیر در ماشینکاری شیارها با صافی سطح بالا بوده و اغلب در شیار تراشی می توان از این ابزار بهره برد.

۴- ابزار چندین شیاره

نظر به کاهش نیروی اعمالی بر تک تک دندانه های ابزار با افزایش تعداد شیارها، بسته به شرایط حاکم، می توان از ابزار با تعداد شیار بیشتر نیز بهره برد.

۳-۳-۱ هندسه ابزار های برش انگشتی

۱-۳-۳-۱ زوایای کارکردی پر اهمیت در ابزارهای انگشتی

در کاربردهای روز افزون ابزارهای برشی، الزامات تولید، شرایطی را حاکم می کند که مهندس ابزار ساز تحت آن شرایط مجبور است، هندسه یا ماده براده و یا شرایط ماشینکاری را تغییر دهد تا کارآیی ماشینکاری افزایش یابد. بنابراین، مهندسین و ابزار سازان نیازمند دانشی وسیع در مورد ابزار ها و مخصوصاً هندسه ابزار ها هستند. تاکید روی هندسه ابزار برش مخصوصاً در ماشینکاری قطعات با هندسه پیچیده حائز اهمیت می باشد. زیرا، در شرایطی که ماده ابزار درست انتخاب شده باشد، امکان تولید قطعات سالم وجود دارد، ولی در شرایطی که ماده ابزار نادرست انتخاب شده باشد، تولید قطعه درست محتمل نمی باشد.

۲-۳-۳-۱ شناخت تعاریف و کارکرد زوایا در ابزارهای برشی

معمولاً هندسه برش ابزارهای چند لبه، واژگان، قراردادها و استانداردهای موجود، موجب سردرگمی مهندس ابزار ساز می شود. برهمین اساس شناخت زوایا و تعاریف موجود الزامی به نظر می رسد. زوایا و متغییرهای مهم یک ابزار انگشتی استوانه سر تخت در شکل های (۲-۱)، (۳-۱) و (۴-۱) نشان داده شده است. که شامل زوایای مهم و زوایای متناظر آنها در ابزار های تک لبه می باشد. در زیر تعاریف این زوایا ارائه گردیده است.

- *زاویه براده شعاعی*[۱]

این زاویه معادل زاویه براده جانبی در ابزارهای تک لبه بوده و دارای اثری اساسی روی توان، نیروهای ماشینکاری و عمر ابزار می باشد.

- *زاویه براده محوری*[۲]

متناظر با زاویه براده پشتی در ابزار های تک لبه بوده و کنترل کننده جهت شارش براده است و یکی از عوامل تعیین کننده مقاومت لبه برش ابزار می باشد.

- *زاویه گوشه*[۳]

معادل با زاویه لبه برش جانبی در ابزارهای برش تک لبه بوده و کاهنده ضخامت براده و شوک های مکانیکی اعمال شده بر ابزار برش می باشد.

- *زاویه براده واقعی*[۴]

متناظر با زاویه ای به همین نام در ابزار برش تک لبه می باشد. زاویه براده واقعی مهمترین زاویه در فرآیند فرزکاری و براده برداری بوده و هر چه مقدار این زاویه در حالتی که مثبت است، بزرگتر باشد، نیروی لازم جهت ماشینکاری نیز کمتر بوده و حرارت کمتری نیز در حین ماشینکاری ایجاد خواهد شد. صلبیت ماشین، جنس ابزار و شرایط ماشینکاری تعیین کننده مثبت و یا منفی بودن مقدار این زاویه می باشد.

---

۱. Radial Rake Angle.
۲. Axial Rake Angle .
۳. Corner or Chamfer Angle.
۴. True Rake Angle .

- *زاویه تمایل*[۵]

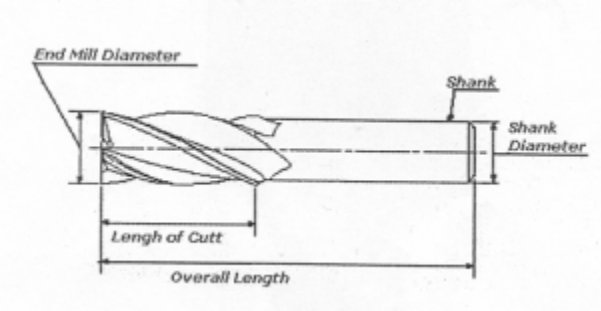
در ابزار انگشتی و ابزار تراش یکسان است. این زاویه دارای اثراتی اساسی در جهت جریان براده است. زاویه تمایل منفی براده را بسمت محور مرکزی ابزار و زاویه تمایل مثبت بسمت خارج از محور مرکزی ابزار هدایت می کند.

- *زاویه تقعر*[۶]

این زاویه با زاویه لبه برش انتهایی در ابزار تک لبه معادل بوده و امکان ایجاد فضای خالی بین ابزار در حین ماشینکاری و سطح ماشینکاری شده را فرا هم می آورد. این زاویه باید در قسمت پخ خورده و یا شعاع دار ابزار برش ایجاد گردد. هر چقدر این زاویه کوچک تر باشد، موجب افزایش مقاومت لبه برش شده، در عین حال موجب افزایش حرارت تولید شده در عملیات می شود.

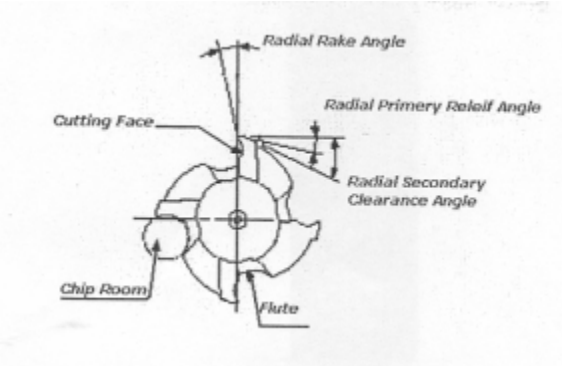
- *زاویه آزاد یا لقی*[۷]

این زاویه در هر دو نوع ابزار برش تک لبه و چند لبه یکسان است. زاویه آزاد اصلی، درست در پشت لبه برش قرار داشته و اندازه آن به نوع ماده تحت ماشینکاری بستگی دارد. این زاویه از سایش ابزار روی قطعه کار جلوگیری نموده و روی عمر ابزار نیز موثر است. زاویه آزاد ثانویه روی دندانه ابزار قرار دارد، این زاویه باید به حد کافی بزرگ باشد تا براده آزادانه شارش نماید. البته، این زاویه نباید به حدی بزرگ باشد که موجب تضعیف لبه برش شود.



شکل(۲-۱): شمای کلی یک ابزار چند لبه سرتخت

۵ .Inclination Angle
۶ .Concavity Angle
۷ .Clearance Angle



شکل(۳-۱): نمایش زوایای مهم کارکردی در یک ابزار چند لبه سرتخت