

کنترل ارتعاشات chatter هنگام فرزکاری قطعات قابل انعطاف

بهنام معتکف ایمانی^۱، شادی کشاورزمنش^۲

گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

imani@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده:

یکی از مهمترین پدیده‌ها هنگام فرزکاری قطعات قابل انعطاف مانند پره‌های توربین و کمپرسور، بروز ارتعاشات خودرنگیخته chatter می‌باشد که از موانع اصلی افزایش نرخ تولید، کاهش حجم براده برداری، کاهش دقت ابعادی و استهلاک ابزاربرش می‌باشد. در این تحقیق از روشهای شبیه‌سازی برای فرزکاری قطعات قابل انعطاف استفاده شده و شامل قسمتهای زیر است: (۱) مدل خیز دینامیکی - نیروی regenerative (۲) مدلسازی FEM ابزار-اسپیندل و قطعه کار. یکی از روشهای کنترل ارتعاشات خودرنگیخته استفاده از نمودار پایداری (عمق برش محوری DOC نسبت به سرعت برشی) می‌باشد مشاهده شده است که برای عمق برش شعاعی یا WOC کوچک اهمیت تغییرات WOC بر دامنه نیرو و آستانه chatter بیشتر از DOC می‌باشد. در این تحقیق از روش تنظیم سرعت برشی و انتخاب WOC مناسب سعی شده براده برداری در شرایط بهینه انجام شود.

واژه های کلیدی: فرزکاری - مدلسازی نیروهای ماشینکاری - ماشینکاری قطعات قابل انعطاف

مقدمه

استفاده از فرزانگشتی با نسبت طول به قطر زیاد برای تولید قطعاتی با حفره های بزرگ و دیواره های نازک در صنایع هوافضا کاربرد دارد [۱]. این قطعات دارای شکل هندسی پیچیده ای بوده و معمولاً به علت مینیمم سازی وزن قابلیت انعطاف بالایی دارند. این قطعات قبل از ماشینکاری عمدتاً دارای ضخامتی کمتر از ۵ mm و ارتفاعی بیش از ۳۰ mm می باشند. به عنوان مثال می توان پره های توربوشارژرها، پره های کمپرسورهای گریز از مرکز و پروانه موتورهای جت را ذکر نمود که توسط فرزهای CNC ماشینکاری می شوند. جنس این قطعات معمولاً از آلیاژهای آلومینیم یا آلیاژهای تیتانیم و نیکل می باشند [۲] و مسئله ماشینکاری آنها از این نظر پیچیده است که دامنه و جهت نیروهای فرزکاری به صورت تناوبی تغییر کرده و روی سازه ای که از نظر استاتیکی و دینامیکی قابلیت انعطاف بالایی دارد عمل می کنند [۳]. تغییر مکانهای استاتیکی موجب خطاهای ابعادی میشوند

در حالی که تغییر مکانهای دینامیکی روی صافی سطح قطعه مؤثر می‌باشند [۲].

در روش سنتی ابتدا با پیشروی خیلی کم و تعداد زیادی مراحل پرداخت و نیمه پرداخت قطعه فرزکاری می‌شود این روش به منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییر مکانهای استاتیکی و همچنین جلوگیری از ارتعاشات خودرنگیخته یا chatter در نظر گرفته شده و شرایط تقریبی براده برداری بهینه از روش سعی و خطا و با لزوم رفتن چندین قطعه یا ابزار بدست می‌آیند واضح است که هزینه این فرآیند بالا می‌باشد.

در این تحقیق هم ابزار-اسپیندل و هم قطعه کار قابل انعطاف در نظر گرفته شده اند. در ابتدا انواع مدل‌های فیزیکی موجود از عملیات فرزکاری بیان و فرمولاسیون مدل خیز دینامیکی - نیروی regenerative جهت محاسبات بعدی نوشته می‌شود. سپس نحوه مدلسازی اجزاء محدود ابزار-اسپیندل و قطعه کار توضیح داده شده در نهایت ارتعاشات این مجموعه شبیه سازی خواهد شد و دامنه ارتعاشات به کمک تغییر شرایط براده برداری لزوری

^۱ استادیار گروه مکانیک

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد

نمودار پایداری (WOC در مقابل سرعت برشی) کنترل میشود.

مدلسازی عملیات فرز کاری

برای تحلیل و تخمین کیفیت عملیات فرزکاری مدل‌های کامل و جلمی مورد نیاز میباشند. مدل‌های مختلفی که پیشنهاد شده و توسعه یافته اند عبارتند از [۵]:

۱) مدل خیز استاتیکی، نیروی صلب می‌تگین

۲) مدل نیروی صلب لحظه ای

۳) مدل خیز استاتیک، نیروی صلب لحظه ای

۴) مدل نیروی لحظه ای با پسخور استاتیکی

۵) مدل خیز دینامیکی-نیروی regenerative

از میان مدل‌های فوق مدل خیز دینامیکی - نیروی regenerative برای شبیه سازی عملیات فرزکاری قطعات قابل انعطاف مناسب میباشد لذا فرمولاسیون این مدل بطور کامل بیان می شود.

این مدل پیچیدگی بالایی داشته و روش مناسب حل آن شبیه سازی در دامنه زمان می باشد. نیروی regenerative به این مفهوم است که نیرو روی هر دندانه نه تنها بستگی به پیشروی بر دندانه و خیز دینامیکی ابزار دارد بلکه شکل سطح تولید شده توسط دندانه های قبلی نیز در مقدار نیرو مؤثر است، (شکل ۱)، بنابراین نیرو روی هر لبه از رابطه زیر بدست می آید [۵ و ۸]:

$$F_{n+1} = k_r b (h + Z_n - Z_0) \quad (1)$$

که در این رابطه n شمارنده مراحل زمانی، Z تغییر مکان جاری ابزار عمود بر سطح برش و Z_0 تغییر مکان ابزار که قبلا تولید شده، b عمق برش، k_r ضریب برشی ویژه و F_{n+1} نیروی برشی مماسی میباشد، h در فرمول ۳ توضیح داده شده است. خیز دینامیکی به این مفهوم است که اینرسی، سختی و استهلاک سیستم (ابزار - اسپیندل و در مقابل آنها قطعه کار) در محاسبه خیز ابزار و نیروها در نظر گرفته شده اند.

مدل دینامیکی ابزار مطابق شکل ۲ به صورت یک سیستم دو درجه آزادی در دو جهت عمود بر هم (x و y) در نظر گرفته شده است و شبیه سازی در دامنه زمان با پله های کوچک انجام میشود. در هر لحظه نیروها روی لبه هایی که با قطعه کار درگیرند محاسبه شده و جمع

برداری میشوند. دستگاه معادلات دیفرانسیل حرکت برای هر یک از جهت ها به صورت زیر نشان داده میشود.

$$M \ddot{x}_n + C \dot{x}_n + Kx_n = F_n \quad (2)$$

از روشهای مختلفی (مانند Wilsin θ Integration, Euler, Newmark) می توان دستگاه فوق را انتگرال گیری نمود [۶ و ۷].

مکان لبه برنده در تماس با قطعه کار ذخیره شده و به عنوان پروفیل سطح تولید شده توسط لبه برنده قبلی در نظر گرفته میشود. در پله زمانی بعدی ابزار یک نمو زاویه ای همراه با نمو پیشروی خواهد داشت. هنگام محاسبه ضخامت براده خیز ابزار و پروفیل سطح تولید شده توسط لبه برنده قبلی در نظر گرفته خواهد شد. همانطوری که در شکل ۲ نشان داده شده است، ضخامت نامی براده عمود بر سطح برش h می باشد که در هر موقعیت زاویه ای ϕ توسط رابطه زیر محاسبه میشود:

$$h = f_i \sin \phi \quad (3)$$

در این رابطه f_i پیشروی به ازای هر دندانه است. تغییر مکان ابزار عمود بر برش با Z_n نشان داده شده است که به تغییر مکانها در جهت های x و y وابسته میباشد.

$$Z_n = X_n \sin \phi + Y_n \cos \phi \quad (4)$$

این مدل علاوه بر مدلسازی نیروی regenerative میتواند ارتعاشات chatter و ارتعاشات اجباری در ارتباط با عملیات فرزکاری را به خوبی شبیه سازی کند [۵]. همچنین این مدل قادر خواهد بود بار گذارهای غیرخطی را که در عملیات فرزکاری پدید می آید در روی مدل اعمال کند. به عنوان مثال در صورتی که دامنه ارتعاشات ابزار به حدی بزرگ شود که تماس لبه با قطعه کار قطع شود مدل با یک مقایسه قادر خواهد بود بجای نیروی منفی نیروی صفر را جایگزین نماید. این مسئله در ارتباط با ارتعاشات ماشین های ابزار پدیده Basic-Nonlinearity نامیده میشود [۸]. مدلسازی خیز دینامیکی-نیروی regenerative در محیط نرم افزار MATLAB V5.3 برنامه نویسی شده است.

مدلسازی اجزاء محدود ابزار - اسپیندل

قطعه کار

ساختار سیستم برشی شامل اسپیندل، یاتاقان های حمایت کننده و ابزار فرز انگشتی مانند شکل ۴ مدل شده است.

ساختار فوق با استفاده از المان تیر (Beam Element) دارای سه درجه آزادی در هر گره تقسیم بندی شده و ماتریسهای جرم و استهلاک و سختی برای یک المان بدست آمده و در نهایت ماتریسهای جامع برای کل ساختار با استفاده از جعبه ابزار CALFEM [۴] محاسبه شده اند.

در پروسه فرزندکاری پره های ملخ موتورهای جت و قطعات نظیر آن میتوان قطعه کار را به صورت یک صفحه یکسر گیردار (شکل ۵) مدل سازی کرد. قطعه کار به تعدادی المان صفحه ای (Plate Element) با چهار گره و سه درجه آزادی در هر گره تقسیم بندی شده و ماتریسهای جامع محاسبه شده اند.

مدل دینامیکی سیستم ابزار اسپیندل عبارت است از:

$$[M_b]\{x\} + [C_b]\{x\} + [K_b]\{x\} = \{F_t\} \quad (5)$$

و مدل دینامیکی ساختار قطعه کار به صورت زیر میباشد:

$$[M_p]\{x\} + [C_p]\{x\} + [K_p]\{x\} = \{-F_t\} \quad (6)$$

$\{F_t\}$ نشان دهنده بردار نیروی برش بر روی ابزار (در مکان براده برداری) و $\{-F_t\}$ عکس العمل این نیرو میباشد که بر روی قطعه کار منظور شده است. واضح است که ابعاد ماتریسهای جرم $[M]$ ، سختی $[K]$ و استهلاک $[C]$ وابسته به درجات آزادی، المان بندی و شرایط مرزی سیستم میباشد.

در این روش در هر مرحله زمانی ابتدا مؤلفه های x و y نیروی برش از روش خیز دینامیکی - نیروی regenerative روی لبه های درگیر ابزار و قطعه کار محاسبه میشود، پس از آن بار گرهی معادل برای هر یک از دو سیستم ابزار اسپیندل و قطعه کار بدست آمده، روی درجه آزادی متناظر اعمال میگردد، سپس جابجایی ها بر اساس آن محاسبه شده برای مرحله بعد استفاده میشوند.

معیار بروز ارتعاشات خود برانگیخته Chatter

یک مسئله مهم در مورد ارتعاشات خود برانگیخته، بکارگرفتن روشی است که به عبور از ناحیه پایدار و ورود به ناحیه ناپایدار حساس بوده در حالیکه نسبت به ارتعاشات در حین ماشینکاری و همچنین ارتعاشات گذرا بی تفاوت باشد.

یک معیار تجربی برای بروز ارتعاشات chatter و ناپایداری سیستم این است که حداکثر نیروی برش روی هر دندانه با ضریب ده درصد رو به افزایش میباشد.

در یک روش تجربی دیگر، شتاب ارتعاشات تولید شده توسط یک شتاب سنسج پیزوالکتریک در راستای محور ابزار - اسپیندل ثبت و به صورت زیر تخمین زده میشود:

$$a_y(t) = A \sin(\omega_p t + \theta) + n(t) \quad (7)$$

ترم اول مربوط به نیروی ناشی از عبور دندانه میباشد در حالیکه ترم دوم مربوط به اغتشاش بوده و در حالت ناپایدار غالب است. این دو ترم را براحتی میتوان با استفاده از فیلتر از هم جدا کرد. این دو فرکانس بستگی به فرکانس عبور دندانه و ساختار دینامیکی ابزار - اسپیندل و ماشین دارد.

از نسبت وارپنس ترم اول رابطه فوق به وارپنس ترم دوم $R = (\sigma_{sig})^2 / (\sigma_{noise})^2$ میتوان بعنوان شاخص بروز ارتعاشات خود برانگیخته کمک گرفت. هنگامیکه $R \gg 1$ ترم سینوسی غالب بوده و معنای آن این است که شرایط پایدار است. در مقابل اگر $R < 1$ ترم اغتشاشی غالب میباشد و ارتعاشات chatter بروز کرده است [۹]. برای نیرو نیز مانند شتاب وضعیت مشابهی برقرار است. در قسمت (a) از شکل ۶، بخش استاتیکی نیروی کل شبیه سازی شده و ارتعاشات حالت پایدار ناشی از عملیات فرزکاری (که نسبت به ارتعاشات chatter از اهمیت کمتری برخوردار هستند) بوضوح دیده میشوند. در قسمت (b) از این شکل، ارتعاشات chatter بروز کرده و همانطوریکه مشاهده میشود دامنه تغییرات نیرو نسبت به حالت (a) بسیار زیاد است. با استفاده از فیلتر باتروث در محیط نرم افزار MATLAB بخش استاتیکی نیرو (با فرکانس عبور دندانه) از ارتعاشات chatter جدا شده و با استفاده از تابع fft مؤلفه های فرکانسی نیروی برشی بدست آمده است که در قسمت (c) از شکل ۶ رسم شده اند.

کنترل ارتعاشات مجموعه ابزار- اسپیندل و قطعه کار

شرایط براده برداری و پارامترهای شبیه سازی در جدول زیر آورده شده اند، فرزکاری در حالت Up-Milling انجام می شود.

جدول ۱- پارامترهای ثابت برشکاری

پارامترهای برش	
ضریب برشی ویژه [3]	۱۱۸۵ Mpa
نمو زاویه ای	۰/۱ deg
پیشروی بر دندان	۰/۱ mm
تعداد دندانها	۴
زاویه مارپیچ ابزار	۳۰ deg
doc	۱۰ mm
جرم حجمی قطعه کار	۲۶۹۰ Kg/m ³
جرم حجمی ابزار - اسپیندل	۷۸۰۰ Kg/m ³

یکی از روشهای کنترل ارتعاشات خود برانگیخته استفاده از نمودار پایداری (عمق برش محوری DOC نسبت به سرعت برشی) میباشد. برای WOC کوچک، افزایش کمی در مقدار DOC تاثیر چندانی در طول درگیری لبه برش و نهایتاً مقدار نیرو نخواهد داشت. اما اندکی افزایش در مقدار WOC تاثیر بیشتری داشته و در برانگیختن ارتعاشات Chatter دارای اهمیت میباشد. لذا برای WOC کوچک میتوان با استفاده از نمودار پایداری WOC نسبت به سرعت برشی شرایط بهینه عملیات فرز کاری را پیش-بینی نمود.

در ادامه این تحقیق مواردی از قبیل کم کردن مؤلفه های نیروی برش با زیاد کردن زاویه هلیکس، گنجاندن حالات سه بعدی نیروهای شخم و سایش ابزار و مدلسازی صافی سطح قطعه کار بررسی خواهند شد.

مراجع

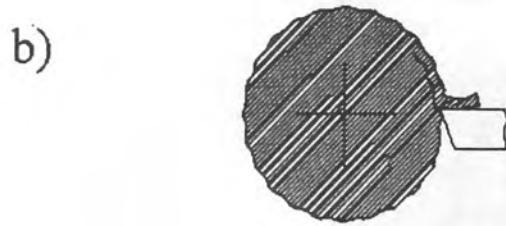
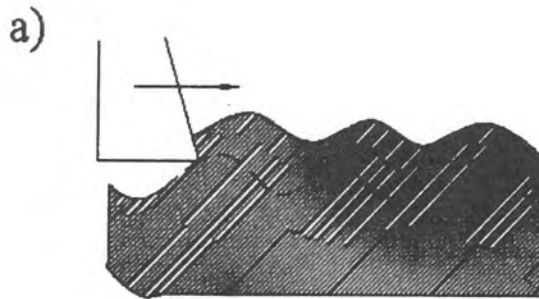
- [1] J. Tlustý, S. Smith, W.R. Winfoughz Mill in High Speed Milling", Annals of the CIRP, Vol 45/1, 1996
- [2] F. Abrari, A.D. Spence, M.A. Elbestawi, " Tool-Workpiece Interaction during Milling of Flexible Parts", 1st Int. Symposium on "Multi-Body Dynamics: Monitoring and Simulation Techniques", March 25-27 1997, Uni. Of Bradford, UK
- [3] Y. Altintas, D. Montgomery, E. Budak, "Dynamic Peripheral Milling of Flexible Structures", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol 114/137. 1992, pp 137-145
- [4] "CALFEM", A Finite Element Toolbox to MATLAB", V3.3, LUND University, Sweden, 1998
- [5] S. Smith, J. Tlustý "Modeling and Simulation of the Milling Process", ASME WAM, PED Vol33, 1988, pp17-26
- [6] D. J. Dawe, 1984, "Matrix and Finite Element Displacement Analysis of Structures" Clarendon Press, Oxford, UK
- [7] Bathe, Klaus-Jurgen, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", 1982
- [8] J. Tlustý, F. Ismail, 1981, "Basic Non-linearity in Machining Chatter" CIRP Annuals, Vol30(1), pp 299-304
- [9] J. S. Bendat, A.G. Piersol, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analyses" 1980.

نمودار تغییرات WOC بحرانی نسبت به سرعت اسپیندل در شکل ۷ آورده شده است. منحنی، مرز پایداری سیستم را نشان میدهد (Stability Lobes). قسمت بالای منحنی محدوده بروز ارتعاشات ناپایدار Chatter است. همانطوریکه در شکل مشاهده میشود برای سرعتهای بالا تر از ۱۲۵۰ rpm عملیات فرزکاری برای WOC کمتر از ۰/۹ mm همواره پایدار است (نقاط A و D). اما شرایط برای نقاط A و D کاملاً یکسان نیست. اگر فرزکاری در نقطه A انجام شود، افزایش سرعت اسپیندل (نقطه D) تاثیری در پایداری عملیات فرز کاری ندارد، اما اندکی افزایش در مقدار WOC منجر به عبور از مرز پایداری و ایجاد ارتعاشات Chatter خواهد شد.

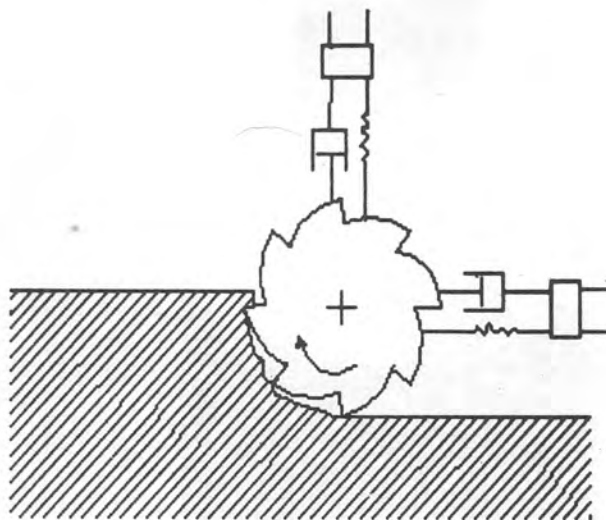
اگر فرز کاری در نقطه B صورت گیرد، ارتعاشات ناخواسته Chatter بروز خواهد کرد و شرایط ناپایدار است. با توجه به شکل میتوان با افزایش سرعت اسپیندل از مرز گذشته و وارد محدوده پایدار عملیات فرز کاری شد (نقطه C).

همچنین از شکل دیده میشود که با افزایش سرعت اسپیندل رفته رفته به وسعت ناحیه پایدار افزوده میگردد.

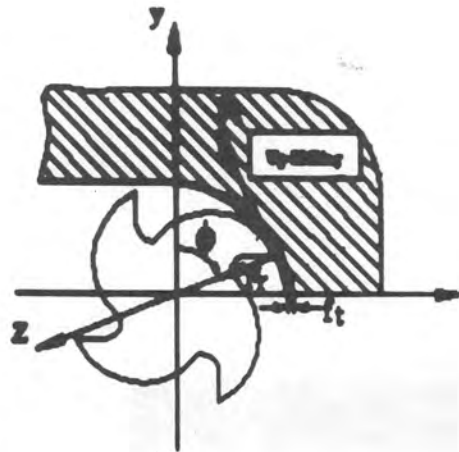
جمع بندی



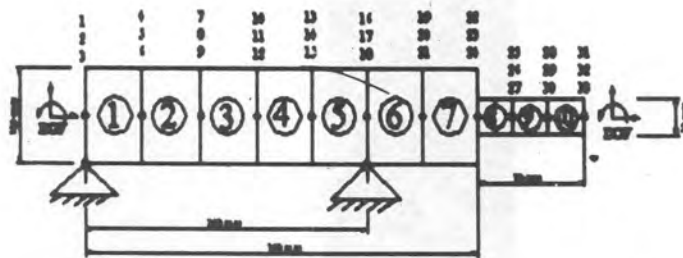
شکل ۱- regeneration از امواج روی سطح



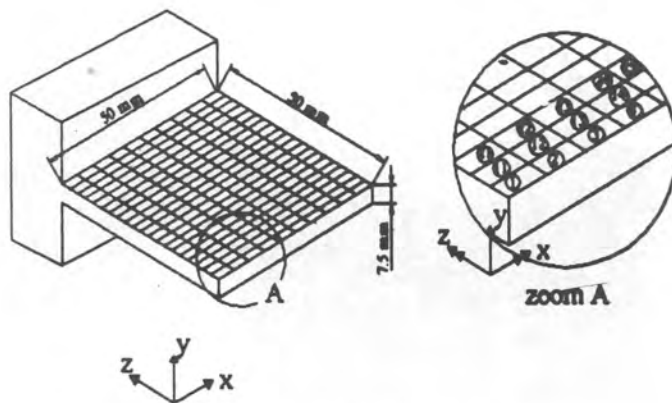
شکل ۲- مدل شبیه سازی شده در دامنه زمان



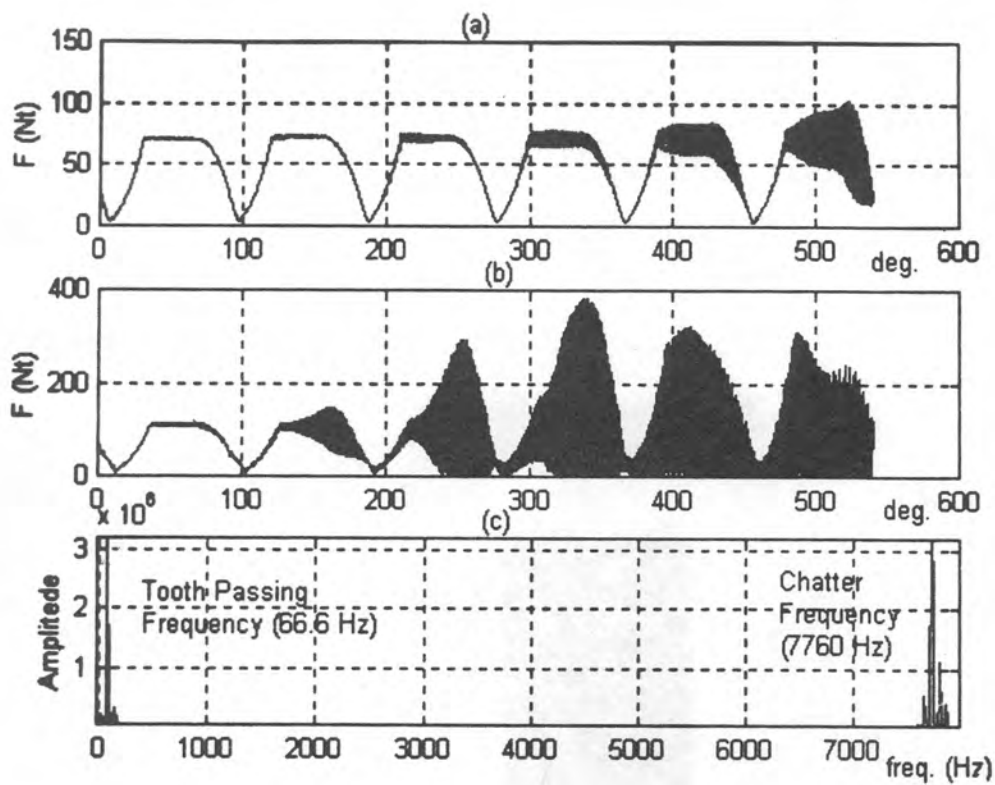
شکل ۳- ضخامت براده نامی و نیروهای برشی



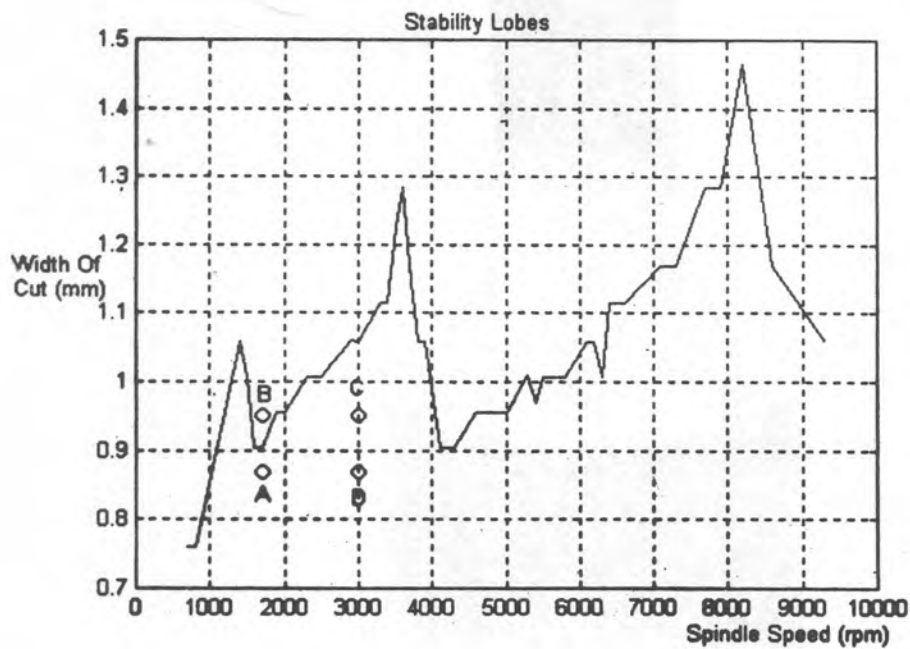
شکل ۴- مدل اجزاء محدود ابزار-اسپیندل



شکل ۵- مدل اجزاء محدود قطعه کار



شکل ۶- (a) نیروی برشی کل شبیه سازی شده، حالت پایدار $R=6.65$ (b) نیروی برشی کل شبیه سازی شده، حالت ناپایدار chatter $R=0.73$ (c) مولفه های فرکانسی نیروی برشی



شکل ۷- نمودار پایداری، عمق برش شعاعی در برابر سرعت ابزار- اسپیندل