



Prediction of Cutting Forces for Flat and Rough End Mill Tools Using B-spline Interpolation of Cutting Edge

Part 2: Prediction of Cutting Forces

B. Moetakef Imani.¹, S.A. Hosseini²

*Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
Corresponding Author E-mail: imani@ferdowsi.um.ac.ir*

Abstract

Nowadays end milling tools are introduced to market with different categories and geometries. The common designs for end mill tools are as follows: flat end mill, ball end mill, taper ball end mill, bull nose end mill, rough end mill with serrated cutting edge in various patterns and so on. Reliable estimation of cutting forces is essential for anticipating cutting power requirements, tool deflections, machined surface deviations and machining stability. Many efforts have been devoted to modeling the mechanics and dynamics of milling operations. The method proposed in this research is used for predicting cutting forces for given cutting conditions, cutter geometry and combination of tool-workpiece materials using B-spline interpolation of cutting edge. B-spline model can effectively predict tangent and normal components of instantaneous cutting forces and their fluctuations for given cutting conditions.

Keywords: End Milling, Rough End Milling, Cutting Force Modeling, B-spline Representation of Cutting Edge

¹ – Associate Professor

² - M.Sc. in Mechanical Engineering



محاسبه نیروهای برشی برای ابزارهای فرز انگشتی و فرز خشن تراش با استفاده از درونیابی لبه برنده توسط منحنی های B-spline

بخش دوم: تخمین نیروهای برشی

بهنام معتکف ایمانی^۱، سید علی حسینی^۲،

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

Corresponding Author E-mail: imani@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

امروزه ابزارهای فرزکاری با هندسه های متنوع و گوناگون برای انجام فرآیندهای مختلف ماشینکاری به بازار عرضه می شوند. از میان ابزارهای متداول فرزکاری ابزارهای فرز انگشتی، فرز نوک کروی، فرز مخروطی نوک کروی، و فرزهای خشن تراش با لبه برنده دندانهای ای از عمومیت بیشتری برخوردارند. تخمین دقیق نیروهای ماشینکاری توسط یک مدل نیرویی در محیط مجازی امکان پیش بینی توان لازم برای ماشینکاری، ارتعاشات ابزار، الگوی سطح ماشینکاری شده و آستانه پایداری دینامیکی سیستم را فراهم می سازد. مدل ارائه شده در این تحقیق با استفاده از منحنی های B-spline برای نمایش لبه برنده، امکان محاسبه دقیق بردار مماس و نرمال بر لبه در هر المان دیفرانسیل از طول ابزار را ممکن می سازد.

واژه های کلیدی: فرزکاری - فرزکاری خشن تراشی - مدل سازی نیروهای برشی - تعریف هندسی لبه برنده با منحنی های B-spline

۱- مقدمه

تاکنون کارهای متعددی در زمینه تخمین نیروهای برشی در فرآیند فرزکاری انجام پذیرفته است که از شاخص ترین آنها می توان به کارهای Tlusty [۱]، Altintas [۲]، Budak [۳ و ۴] و Lazoglu [۵] اشاره نمود. در کارهای فوق نحوه نمایش هندسی لبه برنده، هندسه درگیری ابزار و قطعه کار و تخمین نیروهای برشی به خوبی ارائه شده اند. در این کارها برای روابط حاکم بر ضخامت براده و زاویه درگیری محوری در ابزار فرز معمولی از فرض Merchant [۶] و در فرز خشن تراش از فرمول ارائه شده توسط Merdol و Altintas [۷] استفاده می شود. نقطه ضعف روابط فوق محدود بودن آنها به یک هندسه خاص ابزار می باشد و چنانچه هندسه لبه برنده ابزار تغییر کند باید از رابطه ای متناسب با هندسه جدید استفاده نمود. در این پژوهش برای نمایش هندسه لبه برنده از منحنی های B-spline استفاده می شود. با استفاده از این منحنی ها و با مشتقگیری مستقیم از معادله لبه می توان زاویه درگیری محوری را برای هر هندسه ابزار محاسبه نمود. زاویه درگیری محوری از پارامترهای موثر در محاسبه تصویر مولفه های مماسی، شعاعی و محوری نیروی برشی در راستای محورهای مختصات می باشد.

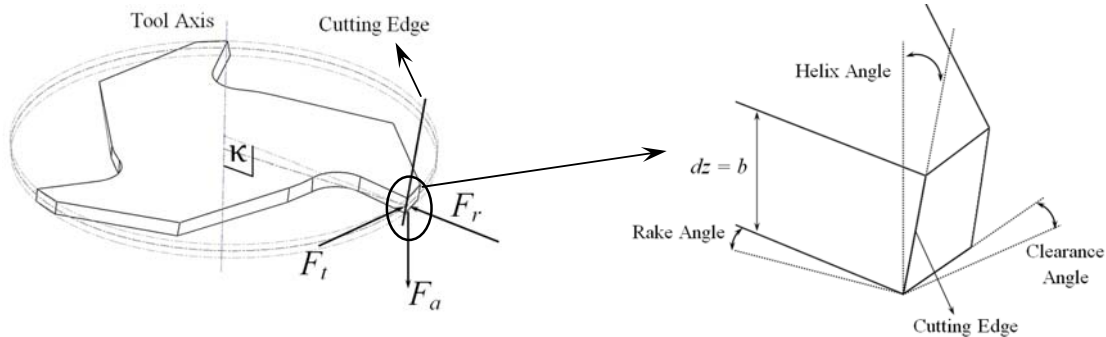
۱- دانشیار مهندسی مکانیک

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

۲- مولفه های نیروی برشی در فرآیند فرزکاری

شکل کلی روابط نیرویی برای مولفه های مماسی، شعاعی و محوری نیروی برش برای فرآیندهای فرزکاری به شکل کلی زیر می باشد:

$$\begin{aligned} F_t &= K_{tc}bh + K_{te}b \\ F_r &= K_{rc}bh + K_{re}b \\ F_a &= K_{ac}bh + K_{ae}b \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱- المان دیفرانسیل لبه فرز انگشتی، نحوه وارد شدن مولفه های مماسی، شعاعی و محوری نیروی برشی به لبه و تعریف زوایای ابزار

در روابط فوق F_t مؤلفه نیرو در جهت مماس بر لبه برنده، F_r مؤلفه نیرو در جهت شعاعی ابزار و F_a مؤلفه نیرو در جهت محور ابزار می باشد. عبارات K_{tc} ، K_{rc} و K_{ac} ثوابت برشی و عبارات K_{te} ، K_{re} و K_{ae} نیز ثوابت لبه ای می باشند که تابعی از جنس قطعه کار، ابزار و شرایط برشی می باشند. پارامتر h همان ضخامت براده می باشد که برای ابزار فرز انگشتی از رابطه (۲) [۶] و برای فرز خشن تراش از رابطه (۳) [۸] به دست می آید. پارامتر b یا همان عرض براده نیز برابر با عرض المان دیفرانسیل محوری ابزار است. پارامتر C میزان پیشروی بر دندان و i_0 نشان دهنده زاویه هلیکس ابزار می باشد.

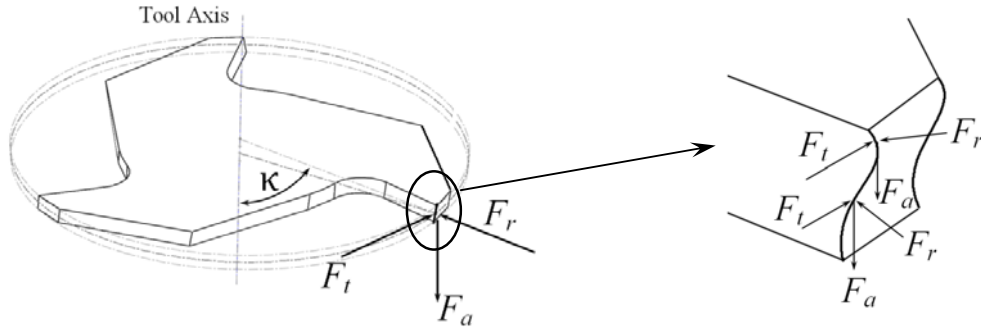
$$h = c \sin(\phi) \quad (2)$$

$$h_n = nc \sin(\phi) - [R_n^s(z)] - \sum_{i=0}^{n-1} h_i \quad \text{if } h_n < 0 \rightarrow h_n = 0 \text{ and } h_0 = 0 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)

$$R^s(z) = A \cdot \sin\left(\omega \frac{z}{\cos(i_0)}\right) \quad (4)$$

همانگونه که در رابطه (۲) مشاهده می شود میزان ضخامت براده h در ابزار فرز انگشتی به نرخ پیشروی بر دندان (c) و زاویه درگیری شعاعی $\phi_i(z)$ که به اختصار ϕ نامیده می شود بستگی دارد. زاویه درگیری شعاعی، زاویه بین نقطه شروع درگیری و نقطه ای است که موقعیت کنونی المان دیفرانسیل محوری ابزار را نشان می دهد. در ابزار فرز خشن تراش میزان ضخامت براده علاوه پارامترهای فوق به شعاع ابزار در ارتفاع Z و مجموع ضخامت براده های برداشته شده در دوره های قبلی ابزار بستگی دارد. دلیل پیچیدگی محاسبه ضخامت براده در فرز خشن تراش، پیچیدگی هندسی لبه برنده آن می باشد. شکل (۲) نمایی از لبه برنده ابزار فرز خشن تراش و نحوه وارد شدن المان های نیرو به آن را نشان می دهد.



شکل ۲- نیروهای مماسی، شعاعی و محوری روی یک المان از لبه برنده ابزار فرز خشن تراش با سه لبه برنده

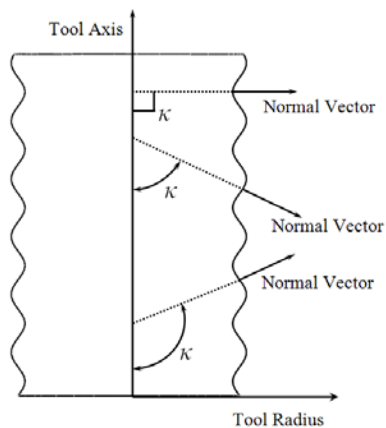
با توجه به شکل های (۱) و (۲) تصویر مولفه های نیرو در جهت x ، y و z به صورت زیر قابل بیان است:

$$df_{x,j}(\phi_j(z)) = -df_{t,j} \cos(\phi_j(z)) - df_{r,j} \sin(\phi_j(z)) \sin(\kappa) - df_{a,j} \sin(\phi_j(z)) \cos(\kappa)$$

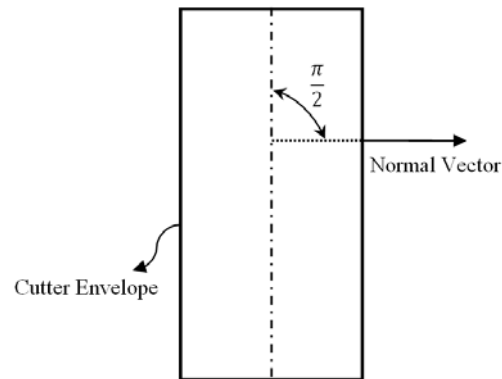
$$df_{y,j}(\phi_j(z)) = +df_{t,j} \sin(\phi_j(z)) - df_{r,j} \cos(\phi_j(z)) \sin(\kappa) - df_{a,j} \cos(\phi_j(z)) \cos(\kappa) \quad (5)$$

$$df_{z,j}(\phi_j(z)) = -df_{r,j} \cos(\kappa) - df_{a,j} \sin(\kappa)$$

نیروی کل روی ابزار مخروطی حاصل جمع برداری نیرو روی تک تک لبه ها می باشد. با جایگذاری $df_{t,j}$ ، $df_{r,j}$ ، $df_{a,j}$ در رابطه (۵) و انتگرال گیری روی لبه، کل نیروی وارده به ابزار حین فرآیند ماشینکاری محاسبه می شود. پارامتر هندسی دیگری که در محاسبه تصویر المانهای نیرو نقش دارد زاویه درگیری محوری (κ) می باشد. زاویه بین بردار نرمال بر پوش لبه در هر نقطه با محور ابزار زاویه درگیری محوری (κ) را معین می کند. پوش لبه مکان هندسی نقاط لبه در یک دوران کامل ابزار می باشد. شکل (۳) پوش لبه برنده برای یک لبه از ابزار فرز انگشتی و شکل (۴) پوش لبه برای یک لبه از ابزار فرز خشن تراش را نشان می دهد.



شکل ۴- پوش لبه برنده برای ابزار فرز خشن تراش [۹]



شکل ۳- پوش لبه برنده برای ابزار فرز انگشتی [۹]

همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود زاویه درگیری محوری (κ) در ابزار فرز انگشتی در طول محور ابزار ثابت و برابر با $\pi/2$ می باشد. به همین دلیل مقدار $\sin(\kappa)$ در روابط (۵) برابر با یک و مقدار $\cos(\kappa)$ در این روابط برابر با صفر می شود به همین دلیل تصویر مولفه های نیرو در فرز انگشتی با آسانی تعیین می شود. در ابزار فرز خشن تراش همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می شود بدلیل پروفیل دندانه دار لبه برنده، زاویه درگیری محوری از مقدار ثابتی برخوردار نیست و در طول لبه



پیوسته تغییر می کند. به همین دلیل برای محاسبه زاویه درگیری محوری در ابزار فرز خشن تراش به رابطه ای نیاز است که بتواند کلیه تغییرات هندسی لبه برنده و اثر آنها بر زاویه درگیری محوری را مدلسازی کند. رابطه تغییرات (κ) بر حسب z توسط Merdol و Altintas [۷] در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد شده است.

$$\kappa(z) = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{d}{dz} R(z)}{\sqrt{\left[\frac{d}{dz} R(z)\right]^2 + [R(z)]^2 k_\mu^2 + 1}} \right] \quad (۶)$$

رابطه فوق قابلیت محاسبه زاویه درگیری محوری برای ابزار فرز خشن تراش استوانه ای را دارا می باشد ولی برای دیگر ابزارهای خشن تراش از قبیل ابزارهای خشن تراش مخروطی و خشن تراش مخروطی نوک کروی صادق نمی باشد. از طرفی رابطه فوق باید در هر لحظه از دوران ابزار و برای هر المان دیفرانسیل لبه بطور جداگانه محاسبه گردد که این خود زمان محاسبات را به طرز چشمگیری افزایش می دهد. استفاده از منحنی های B-spline این امکان را ایجاد می کند که بتوان بدون استفاده از روابط پیچیده هندسی و با مشتقگیری مستقیم از معادله لبه، بردارهای مماس و قائم بر پوش لبه و زاویه درگیری محوری را محاسبه نمود. مزیت دیگر این روش قابلیت پیاده سازی آن برای ابزارهای مختلف فرز معمولی و خشن تراش با هر هندسه دلخواه می باشد.

۳- مشتق گیری از توابع B-spline

هدف اصلی استفاده از منحنی های B-spline استفاده از خواص برجسته آنها در هنگام مدل سازی اشکال هندسی و منحنی های مختلف می باشد. یکی از این خواص امکان مشتقگیری مستقیم از معادله B-spline لبه برنده، یافتن بردار مماس و نرمال بر آن می باشد. یک منحنی B-spline با معادله (۱) که در قسمت اول این تحقیق آمده است تعریف می شود. مشتق هر کدام از توابع پایه این منحنی B-spline را می توان به شکل زیر بیان نمود [۱۰ و ۱۱]:

$$\frac{d}{du} N_{i,p}(u) = N'_{i,p}(u) = \frac{p}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) - \frac{p}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (۷)$$

با قرار دادن رابطه (۷) در رابطه (۱) از بخش اول این پژوهش مشتق یک منحنی B-spline به شکل زیر حاصل می شود:

$$\frac{d}{du} C(u) = C'(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i+1,p-1}(u) Q_i \quad (۸)$$

که در رابطه فوق

$$Q_i = \frac{p}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} (p_{i+1} - p_i) \quad (۹)$$

بنابراین مشتق یک منحنی B-spline از درجه p یک منحنی B-spline از درجه $p-1$ و بردار گرهی آن همان بردار گرهی منحنی اولیه می باشد ولی نقاط کنترل آن از مجموعه P_i به مجموعه Q_i تغییر کرده است. بنابراین با استفاده از این قابلیت منحنی های B-spline برای هر هندسه دلخواه لبه ابتدا با استفاده از الگوریتم درونیایی B-spline، لبه برنده با منحنی های B-spline نمایش داده می شود. سپس در هر نقطه از لبه برنده با مشتقگیری از آن بردار مماس و از روی آن بردار قائم بر پوش لبه تعیین می گردد. زاویه بردار قائم بر پوش لبه در آن نقطه با محور ابزار معرف زاویه درگیری محوری (κ) می باشد.

۴- بستر آزمایش

برای تایید صحت و دقت هر مدل نیرویی لازم است نتایج آن با نتایج آزمایشاتی که بر روی ماشین ابزار انجام گرفته است مقایسه شود. به همین منظور و برای اثبات قابلیت های مدل ارائه شده یک سری آزمایش با استفاده از ابزارهای فرز انگشتی و



خشن تراش بر روی قطعه کاری از جنس آلومینیوم 6061 انجام شده است. در ادامه اجزاء و شرایط برشی استفاده شده در آزمایشات شرح داده شده اند.



شکل ۵ - ابزار فرز خشن تراش مورد استفاده در آزمایش [۹]



شکل ۴ - ابزار فرز انگشتی مورد استفاده در آزمایش [۹]

جدول ۱- مشخصات ابزارهای مورد استفاده در تست [۹]

طول موج لبه	دامنه نوسان لبه	جنس	زاویه هلیکس	قطر	تعداد لبه	نوع ابزار فرز
-----	-----	HSS	30 درجه	12 میلیمتر	2	فرز انگشتی
2.46 میلیمتر	0.2 میلیمتر	Hard Metal	40 درجه	8 میلیمتر	3	فرز خشن تراش

جدول ۲- شرایط برشی مورد استفاده در تست [۹]

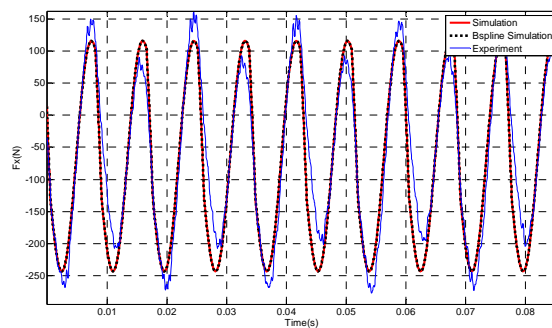
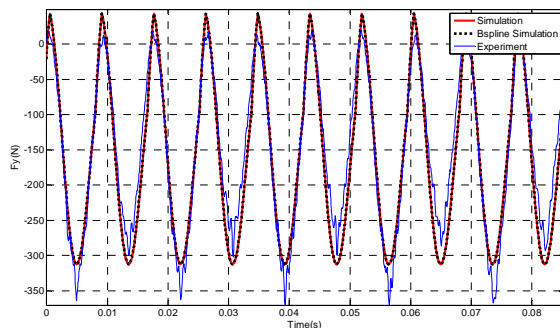
c (mm/tooth)	دور اسپیندل (rpm)	ϕ_{st}	ϕ_{ex}	عمق بار محوری (mm)	نوع ابزار فرز
0.1- 0.15- 0.2	7000-3500	0	180	4	فرز انگشتی
0.05- 0.1- 0.15	2000	0	90	4	فرز خشن تراش

جدول ۳- ثوابت برشی [۹]

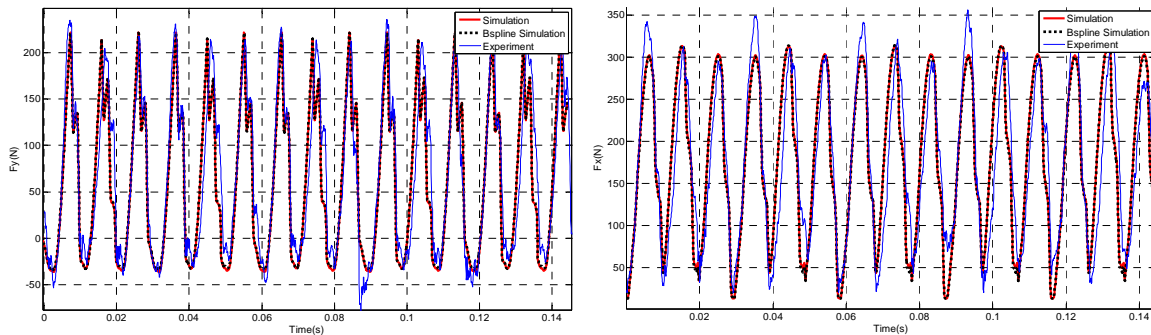
Tool	Speed	$K_{tc}(N/mm^2)$	$K_{rc}(N/mm^2)$	$K_{ac}(N/mm^2)$	$K_{te}(N/mm)$	$K_{re}(N/mm)$	$K_{ae}(N/mm)$
Flat End Mill	7000(rpm)	499.959	114.15	29.179	19.25	10.99	3.93
Flat End Mill	3500(rpm)	552.573	186.88	43.639	19.63	14.137	7.068
Rough End Mil	2000(rpm)	754.175	520.020	100.709	7.169	10.179	0.918

۵- نتایج آزمایش ها

شکل های زیر حاوی مقایسه نتایج آزمایش فرز کاری (Experiment) با نتایج حاصل از مدل نیرویی ارائه شده توسط Merdol و [Y] Altintas (Simulation) و مدل نیرویی B-spline (B-spline Simulation) ارائه شده در این کار پژوهشی می باشند. همانگونه که مشاهده می شود نتایج مدل نیرویی B-spline از تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشات برخوردارند.



شکل ۶- مولفه F_x (راست) و F_y (چپ) نیروی برشی برای ابزار فرز انگشتی با قطر 12 میلیمتر ، دور اسپیندل 3500 rpm ، عمق بار محوری 4 میلیمتر ، زاویه شروع 0 درجه ، زاویه خروج 180 درجه و نرخ پیشروی 0.1 میلیمتر بر دندانه [۹]



شکل ۷- مولفه F_x (راست) و F_y (چپ) نیروی برشی برای ابزار فرز خشن تراش با قطر 8 میلیمتر، دور اسپیندل 2000 rpm، عمق بار محوری 4 میلیمتر، زاویه شروع 0 درجه، زاویه خروج 90 درجه و نرخ پیشروی 0.1 میلیمتر بر دندانه [۹]

۶- نتیجه گیری

در بخش اول این پژوهش روش های مدل سازی لبه برنده برای ابزارهای فرز مورد بحث و بررسی قرار گرفت. روش جدیدی که در این کار پژوهشی مورد استفاده قرار می گیرد بر پایه مدل سازی لبه برنده ابزارهای فرز با منحنی های B-spline بنا نهاده شده است. مزیت این منحنی ها در آن است که به هندسه وابسته نیستند و می توان کلیه عملگرهای ریاضی را مستقیماً بر روی آنها اعمال نمود. در بخش دوم این پژوهش به نحوه استفاده از این منحنی ها در محاسبه نیروهای فرزکاری و ارائه یک مدل نیرویی پرداخته شده است. این مدل نیرویی قادر است با استفاده از منحنی های B-spline، لبه برنده در هر ابزار فرز با هندسه دلخواه را مدل سازی کرده، با محاسبه مستقیم زاویه درگیری محوری از روی معادله B-spline لبه تصویر مولفه های نیرو در راستای محورهای مختصات و در نهایت نیروی کل وارده بر ابزار حین فرآیند فرزکاری را پیش بینی نماید.

مراجع

- 1- Tlustý, J., Manufacturing processes and equipment, Prentice-Hall, 2000.
 - 2- Budak E.A, Altintas, Y., and Armarego E.J.A., 1996, Prediction of milling force coefficient from orthogonal cutting data, Trans. ASME, 118, 216-224
 - 3- Budak E.A., Analytical model for high performance milling: Part 1: cutting forces, structural deformation and tolerance integrity, Int. J. Mach. Tools Manuf., 46, pp. 1478–1488, 2006.
 - 4- Budak E.A, Altintas, Y., and Armarego E.J.A., 1996, Prediction of milling force coefficient from orthogonal cutting data, Trans. ASME, 118, 216-224
 - 5- Lazoglu, I, Sculpture surface machining: a generalized model of ball end milling force system, Int. J. Mach. Tools Manuf., 43, pp. 453–462, 2003.
 - 6- Merchant, M.E., Mechanics of the metal cutting process, J. Appl. Phys. 16 (5) (1945) 267-275.
 - 7- Merdol, S.D., Altintas, Y., Mechanics and dynamics of serrated cylindrical and tapered end mill, Transaction of the ASME, Journal of manufacturing science and engineering, May 2004, Vol. 126.
 - 8- Moetafak Imani, B., El-Mounayri, H., Hosseini, S.A., Analytical Chip Load Prediction for Rough End Mill, Proceeding of Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME 2005), 2007, Iran.
- حسینی، سید علی، مدل سازی استاتیکی و دینامیکی فرآیند فرزکاری خشن تراشی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.
- 10- Piegł, L., and Tiller, W., The NURBS Book, New York, Springer-Verlag, 1997, ISBN: 3-540-61545-8.
 - 11- Shene, C.K., Introduction to computing with geometry, Text book, Michigan Technological University.