شبیه سازی نیروی برش دینامیکی در فرآیند بورینگ در شرایط برشی پایدار و ناپایدار با استفاده از مدل سازی جسم صلب

محمد مهرابی نسب1، بهنام معتکف ایمانی2\*

1- کارشناسی ارشد، مکانیک ساخت و تولید ، دانشگاه فردوسی، مشهد

2- استاد ، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

\*مشهد 9177948974، imani@um.ac.ir

چکیده

در انقلاب صنعتی نسل 4 به دنبال دانش ، مهارت و تکنولوژی مورد نیاز برای پیاده سازی سیستم های هوشمند ساخت و تولید هستیم. در فرآیند های ماشین کاری به دنبال مدل دیجیتالی توسعه یافته ای هستیم که مکانیک ، سینماتیک و دینامیک فرآیند به صورت یکپارچه در یک سیستم هوشمند پردازش شود به طوری که هزینه های تولید ، تشخیص عیوب ، کنترل کیفیت با کمترین دخالت انسان بهینه شود. در این مقاله یک مدل هندسی نوین ارائه شده است که برای اولین بار مفاهیم ارتعاشات را در محیط مدل سازی جسم صلب B-rep پیاده سازی کرده است. درحقیقت یک سیر مطالعاتی از مفهوم مدل سازی به سمت شبیه سازی هندسی انجام شده است، که در آن در هر گام حرکت لبه برشی ابزار، دینامیک ابزار محاسبه و روی سینماتیک مسئله سوار شده است. ثوابت برشی مدل استاتیکی فرآیند توسط روش ساختارگرا محاسبه شده اند. ثوابت دینامیکی ابزار با استفاده از آزمون مودال تجربی استخراج شده است. سپس پارامترهای دینامیکی حوزه زمان مانند نیروی دینامیکی برش و مساحت براده آنی شبیه سازی شدند و با آزمون های تجربی کالیبره شدند. فیزیک واقعی فرآیند توسط ACIS که یک موتور هندسی قدرتمند است به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. نتایج موید این است که مدل ارائه شده قادر به شبیه سازی نیروی دینامیکی برش در شرایط برشی پایدار و ناپایدار است.

**کلی**د‌واژگ**ان**

بورینگ ، مودال ، شبیه سازی هندسی، شبیه سازی دینامیکی

Dynamic Cutting Force Simulation in Stable and Unstable Cutting Condition by Solid Modeling Technique in Boring Process

M. Mehrabi1, B. Moetakef-Imani 2\*

1- Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering Ferdowsi University, Mashhad, Iran

\* Azadi square, P.O. Box: 9177948974, Mashhad, Khorasan Razavi province, Iran, imani@um.ac.ir

Abstract

In the 4th generation industrial revolution, we seek the knowledge, skills, and technology needed to implement intelligent manufacturing systems. In machining processes, we are looking for an advanced digital model that integrates process mechanics, kinematics and dynamics into an integrated intelligent system so that production costs, fault detection, quality control are optimized with minimal human intervention. This paper presents a novel geometrical model that first implements the concepts of vibration in a rigid B-rep modeling environment. In fact, a course of studies has been carried out from the concept of modeling to geometric simulation, with each step moving the tool cutting edge, the tool dynamics are computed and then superimposed on the kinematics.  The structural dynamics of the boring bar and the resultant cutting coefficient of workpiece material are obtained by conducting experimental modal analysis tests and mechanistic identification experiments, respectively. Then the time domain dynamic parameters such as cutting force were simulated and calibrated by experimental tests. The geometric simulation model is developed inside the environment of 3D ACIS modeler, which is a powerful Boundary Representation (B-rep) solid modeling software. The results confirm that the proposed model is capable of simulating the cutting force in stable and unstable cutting conditions.

Keywords

Boring, Modal, Geometric Simulation, Dynamic Simulation

1- مقدمه

برای داخل تراشی سوراخ های عمیق باید از ابزار های بورینگ با نسبت طول به قطر بالا استفاده کرد. ابزار های بورینگ بلند تحت اثر نیروهای برشی دچار تغییر شکل های استاتیکی و دینامیکی می شوند. تغییر شکل های استاتیکی می تواند سبب انحراف از تلرانس مورد نظر سوراخ شود. هم چنین ارتعاشات و تغییر شکل های دینامیکی ناخواسته از طریق تغییر ضخامت براده دینامیکی می تواند موجب ناپایداری فرآیند و در نتیجه کاهش صافی سطح قطعه کار، کاهش عمر ابزار و شکستن لبه برنده ابزار شود. بنابراین برای شبیه سازی فرآیند بورینگ باید از مدلی استفاده شود که هندسه سه بعدی فرآیند و دینامیک سیستم برش را لحاظ کند تا بتوان نیروهای برشی، ارتعاشات دینامیکی ابزار، دقت ابعادی و صافی سطح ماشین کاری شده را با دقت خوبی تخمین بزند و در نهایت حدود شرایط برشی پایدار و ناپایدار را تعیین کند.

آتابای[[1](#_ENREF_1)] نیروهای استاتیکی فرآیند بورینگ و مولفه های استاتیکی فرآیند را مدل سازی کرد.برای مدل سازی استاتیکی نیروهای برشی از ثوابت برشی و لبه ای به طور همزمان استفاده کرد. در فرآیند بورینگ توزیع ضخامت براده در امتداد لبه برشی به صورت غیر خطی با عمق برش شعاعی[[1]](#footnote-1) ، شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی و ارتعاشات دینامیکی ابزار در راستای شعاعی بستگی دارد. برای به دست آوردن هندسه براده به طور دقیق ممکن است لازم باشد تا هندسه برشی به جامانده روی سطح قطعه کار در چند دور متوالی ابزار در لحظات قبل در نظر گرفته شود تا در هر لحظه بتوان هندسه براده را به دقت تعیین کرد. در شبیه سازی در دامنه زمان فرآیند[[2](#_ENREF_2)] با در نظر گرفتن دینامیک ابزار ، تخمین ارتعاشات دینامیکی ابزار و بررسی تاثیر آن بر توزیع ضخامت براده روی لبه برشی سعی شده تا ارتعاشات پایدار و ناپایدار دینامیکی در فرآیند بورینگ شبیه سازی شود. بوداک [[3](#_ENREF_3)] یک مدل تحلیلی برای تحلیل دالان های پایداری با در نظر گیری دینامیک چند بعدی فرآیند تراشکاری بورینگ ارائه داده است که در آن اثر پارامترهای هندسی فرآیند از جمله زوایای برش و شعاع نوک ابزار به همراه دینامیک ابزار و قطعه کار لحاظ شده است و از لحاظ کردن اثر ارتعاشات مماسی بر تغییر ضخامت دینامیکی ابزار صرف نظر شده است و مولفه های ابعادی نیروی برشی با در نظر گرفتن مکانیک برش مایل مدل سازی شده اند. دینامیک ابزار و قطعه کار به کمک تحلیل مودال تجربی در هنگام اتصال به ماشین ابزار اندازه گیری شدند[[4](#_ENREF_4)]. اثر لحاظ کردن شعاع نوک ابزار روی دالان های پایداری در فرآیند داخل تراشی هنگامی که اندازه عمق برش با شعاع نوک ابزار نزدیک است بسیار حائز اهمیت است. بوداک[[5](#_ENREF_5)] به بررسی عملی پایداری در فرآیند بورینگ و تراشکاری پرداخته است. هم چنین اثر شعاع نوک ابزار بر آستانه پایداری مورد بررسی قرار داد. او در بخش اول تحقیق [[3](#_ENREF_3)] برای پیش بینی آستانه پایداری، تاثیر شعاع نوک ابزار بر پایداری فرآیند و بررسی قابلیت مدل برای تخمین پایداری با استفاده از اینسرت های بدون لبه برنده خطی را انجام داد. هم چنین اثر شعاع نوک ابزار در فرآیند بورینگ و ترشکاری برای دو حالت قطعه کار انعطاف پذیر و ابزار انعطاف پذیر بررسی شده است. او در تحقیق دیگری [[6](#_ENREF_6)] اثر لحاظ نکردن شعاع نوک ابزار و زاویه تمایل بر تخمین آستانه پایداری با استفاده از روش تحلیل پایداری یک بعدی و چند بعدی را بررسی کرد. ایمانی و همکارانش [[7](#_ENREF_7)] با استفاده از تئوری B-spline، هندسه لبه برشی ابزار و حرکت سینماتیکی و دینامیکی ابزار در فرآیند داخل تراشی را مدل سازی کردند. آن ها با به کارگیری الگوریتم های هندسی، هندسه دقیق مرزهای تشکیل دهنده سطح مقطع براده، طول تماس لبه برنده و بار براده روی هر نقطه محاسبه کردند و نیروهای برشی با دقت بیشتری در مدل نیرویی دینامیکی مدل شبیه سازی کردند. سورتینو یک رابطه تجربی برای تخمین نسبت طول به قطر بحرانی متناظر با آستانه پایداری ارائه داد [[8](#_ENREF_8)]. آکسون اثر شرایط تکیه گاهی بر خواص دینامیکی ابزار را مورد بررسی قرار داد[[9](#_ENREF_9)]. اهمیت شبیه سازی دینامیکی فرآیند های ماشین کاری از جهت مطالعه پدیده ناپایداری لرزه[[2]](#footnote-2) می باشد. تحقیقات انجام شده پیرامون ناپایداری لرزه در فرآیند بورینگ و تراشکاری را می توان در سه بخش مختلف شناسایی، کنترل و پیش بینی تقسیم بندی کرد. در بخش تشخیص ناپایداری لرزه به بررسی کاربرد سیستم های یک یا چند حسگری قابل نصب روی ماشین ابزار در حین فرآیند ماشین کاری می پردازند. در تحقیقات اخیر صورت گرفته در این حوزه با اضافه کردن مدل دینامیکی عملگر غیر فعال، رفتار دینامیکی ابزار داخل تراش برای تمام نقاط واقع بر طول آن با دقت بسیار خوبی تخمین زده شده است[[10](#_ENREF_10)]. در بخش کنترل ناپایداری لرزه، به بررسی کاربرد میراگرهای غیرفعال و عملگرهای دارای کنترل پسخور برای افزایش سفتی دینامیکی سیستم و در نتیجه کاهش ارتعاشات و افزایش پایداری می پردازند. در مراجع [[11](#_ENREF_11), [12](#_ENREF_12)] به منظور حذف ارتعاشات لرزه از الگوریتم های کنترل تطبیقی استفاده شده به گونه ای که آستانه ناپایداری از 0.2 به 2 میلیمتر بهبود و در نتیجه سفتی دینامیکی ابزار ارتقا پیدا کرده است. در زمینه پیش بینی لرزه، به ارائه الگوریتم های محاسبات عددی یا تحلیلی برای شبیه سازی ناپایداری در حوزه زمان و تخمین آستانه ناپایداری در حوزه فرکانس می پردازند تا بتوان با شبیه سازی فرآیند برش، محدوده شرایط برشی پایدار را تعیین کرد.

در این مقاله مدل سازی فرآیند توسط نرم افزار ACIS که یک مدل ساز هندسی جسم صلب مبتنی بر B-rep[[3]](#footnote-3) می باشد صورت گرفته است.B-rep بر مبنای تئوری بهم پیوستن یک مجموعه صفحه و ایجاد یک حجم سه بعدی تعریف می شود. در محل هایی که سطوح حجم به هم می رسند، منحنی ها تعریف می شوند و هم چنین به طور مشابه در محل هایی که منحنی ها یکدیگر را قطع می کنند نقاط تعریف می شوند. بعد از پیاده سازی هندسه فرآیند، مساحت دینامیکی براده در هر شرایطی از برش در حین فرآیند محاسبه شده است. مدل سازی با کمک گرفتن از روش انتگرال گیری عددی در حوزه زمان در محیط نرم افزار صورت گرفته و دینامیک ابزار و فرآیند برش با در نظر گرفتن اثر ارتعاشات شبیه سازی شده است. در گام بعدی با استفاده از روش شبیه سازی در حوزه زمان معادله حرکت ابزار داخل تراش در جهت شعاعی که بیش ترین اثر روی ضخامت براده دینامیکی را دارد توسط انتگرال گیری عددی حل شده است، هم چنین با داشتن پارامترهای برشی و ثوابت برشی نیروهای دینامیکی برش محاسبه شده اند. معادلات در محیط سیمولینک پیاده سازی شده و مدل ریاضی بر مبنای پارامترهای استخراج شده از آزمون مودال تجربی توسعه یافته است. برای صحت سنجی، در نهایت قیاس بین نتایج حاصل از شبیه سازی هندسی فرآیند با روش دامنه زمان ( که توسط آزمون های تجربی کالیبره شده است) مبین کارایی مدل شبیه سازی هندسی می باشد.

2- بستر آزمایشگاهی

در شکل (1) مجموعه مونتاژی ابزار بورینگ نصب شده بر روی میز متحرک ماشین‌ابزار نمایش داده شده است. این مجموعه شامل 5 بخش اصلی 1) تکیه‌گاه فولادی به منظور نگه داشتن قلم بورینگ بر روی دستگاه ماشین ابزار 2)بوش های تکیه گاهی 3) قلم بورینگ از جنسS355JR 3) رابط کاهش قطر مدل 570-60 23-40 و 5) سر برشی قابل تعویض مدل 570-DTFNR (ساخت شرکت سندویک[[4]](#footnote-4)) است.

ابزار داخل‌تراش بصورت تیر یکسر‌گیردار است که نیروی برشی در انتهای آزاد آن وارد می‌شود. در انتهای آزاد بدنه ابزار، رابط کاهش قطر و سر برشی قابل تعویض قرار دارند که اینسرت برشی ابزار برروی آن نصب گردیده است.





شکل 1 مجموعه مونتاژی ابزار داخل‌تراش و دینامومتر نصب شده برروی دستگاه ماشین ابزار

1-2- **تجهیزات آزمون مودال تجربی**

برای تحریک سازه ابزار داخل‌تراش از یک چکش مجهز به حسگر نیرو استفاده گردیده است. مطابق شکل 2 دو شتاب‌سنج تک محوره بصورت در فاصله 90 میلی‌متری در دو راستای برشی، همزمان پاسخ ابزار داخل‌تراش به تحریک ضربه را ثبت می‌نمایند. از یک سخت‌افزار اکتساب داده چهار کاناله YMC9004 برای جمع‌آوری و ذخیره داده‌ها استفاده شده است. برای ثبت سیگنال‌های نیرو و شتاب در آزمون مودال، نرخ داده‌برداری سیستم اکتساب داده برابر 100 کیلوهرتز انتخاب شده است. تمامی شتاب‌سنج ها از نوع TL-122A100 ساخت شرکت تن‌لی[[5]](#footnote-5) بوده و قابلیت اندازه‌گیری سیگنال شتاب با دامنه بیشینه 50g را دارند. چکش مودال مدل IH-02 ساخت شرکت تن‌لی بوده و قابلیت تحریک سازه را با بیشینه دامنه 2000 نیوتن دارد. تحریک ضربه در سمت مقابل هریک از شتاب‌سنج‌ها انجام گرفته است. در هر آزمون مودال، سازه ابزار بطور میانگین 10 مرتبه توسط ضربه چکش تحریک، و برای اطمینان از تکرارپذیری، در شرایط یکسان هر آزمون چهار مرتبه تکرار شده است.



شکل 2 مجموعه تجهیزات آزمون مودال تجربی در آزمون ضربه ابزار

2-2- **تجهیزات جمع آوری دادهای نیرو**

به منظور اندازه‌گیری نیروهای حاصل از ماشینکاری از دینامومتر[[6]](#footnote-6) مدل 9255b ساخت شرکت کیستلر[[7]](#footnote-7) که قابلیت اندازه‌گیری دقیق نیرو در سه راستای متعامد را دارا می‌باشد، استفاده شده‌ است. سیگنال خروجی دینامومتر توسط یک آمپی‌فایر مدل A5070 ساخت شرکت کیستلر تقویت شده و پس از انتقال به کارت دریافت داده مدل PCI1710HG ساخت شرکت ادونتک[[8]](#footnote-8)، در کامپیوتر ذخیره می‌گردد. مجموعه اجزای اندازه‌گیری نیرو در شکل (3) نمایش داده شده اند. نیروهای اندازه‌گیری شده در سه راستای اصلی برش کاری می‌باشند. راستای سرعت‌برشی ماشینکاری در راستای Z، راستای عمق‌برش هم‌راستا با محور X و راستای پیشروی در جهت محور Y دینامومتر می‌باشند. دینامومتر بر روی دستگاه ماشین ابزار نصب شده و قلم ابزار داخل‌تراش به وسیله تکیه گاه فولادی بر روی صفحه دینامومتر بسته شده است.

شکل3 مجموعه تجهیزات آزمون اندازه‌گیری نیروی برشی

**3- مدل دینامیکی ابزار بورینگ**

تعیین پارامتر های دینامیک سیستم از جمله سفتی، جرم و میرایی از جهت تحلیل دینامیکی فرآیند مورد اهمیت است. اولین مرحله برای شبیه سازی فرآیند تعیین پارامترهای ارتعاشی ذکر شده می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق از آزمون مودال تجربی استفاده گردیده است. مطابق با توضیحات بخش (2-1) تحریک به وسیله چکش مودال بر ابزار داخل‌تراش انجام گرفته و با استفاده از داده‌های نیرو اندازه‌گیری شده توسط چکش و همچنین داده‌های شتاب اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج های نصب شده بر روی ابزار، تابع تبدیل سیستم ارتعاشی ابزار به کمک نرم‌افزار MEscope محاسبه می‌گردد. با توجه به نمودار پاسخ سیستم (شکل(4و5)) دامنه مود اول بسیار بیشتر از از دامنه‌ی مود دوم ارتعاشی می‌باشد و در نتیجه مد اول تاثیر و اهمیت بیشتری در تعیین رفتار ارتعاشی سیستم دارد. بدین ترتیب در این پژوهش از اثرات مودهای بالاتر چشم‌پوشی شده و سیستم ارتعاشی بصورت یک سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفت شده است. مقادیر پارامترهای ارتعاشی حاصل از روش انتخاب قله‌ها[[9]](#footnote-9) در جدول(1) بیان گردیده است.

**جدول 1** پارامترهای ارتعاشی استخراج شده با استفاده از روش انتخاب قله ها

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| فرکانس طبیعی مود غالب Hz | میرایی | سفتی فنر N/m | جرم kg | L/D |
|  |  |  |  |  |
| 650 | 0.0578 | 0.43×108 | 3.1 | 4 |
| 90 | 0.0079 | 0.05×108 | 3.6 | 8 |



**شکل3** تابع پاسخ فرکانس اندازه گیری شده مودال تجربی و مودال تحلیلی در نسبت طول به قطر4



**شکل 2** تابع پاسخ فرکانس اندازه گیری شده مودال تجربی و مودال تحلیلی در نسبت طول به قطر8

**4- شبیه سازی در محیط هندسی**

محيط (3D ACIS® Modeler ) ACIS، يکي از برجسته‌ترین محیط‌های مدل‌سازی سه بعدی کامپيوتري می‌باشد. ACIS يک مدل‌ساز هندسي بر پايه B-rep است. B-rep یکی از روشهای بسیار متداول در مدلسازی می باشد. این روش می تواند طیف وسیعی از سطوح ریاضی مانند NURBS[[10]](#footnote-10) را پوشش دهد. فرآيند داخل تراشی در محيط نرم افزار ACIS، برنامه نويسي و به صورت سه بعدي شبيه سازي می‌شود. در ادامه تمام پارامترهای مربوط به سینماتیک و دینامیک فرآیند تعریف می شوند. پارامترهای سینماتیکی شامل پیشروی به ازای هر دور، عمق برشی، شعاع لبه نوک ابزار، ابعاد قطعه کار، سرعت اسپیندل، مسیر ابزار و پارامترهای دینامیکی شامل سفتی استاتیکی، فرکانس طبیعی و ضریب میرایی مربوط به ابزار داخل تراش می باشند. مهم ترین قسمت در مدل سازی های دینامیکی فرآیند ماشین کاری، محاسبه دقیق مساحت براده دینامیکی در هر لحظه از فرآیند است. در شرایط استاتیکی مساحت براده از ضرب ضخامت در پهنای آن به دست می آید. در شرایط ارتعاش دینامیکی ابزار و با فرض ارتعاشات در جهت شعاعی و عمود بر لبه برشی، محاسبه سطح مقطع براده کار پیچیده ای است چرا که ضخامت براده به صورت لحظه ای در حال تغییر است و نیازمند بررسی موقعیت ارتعاشی در چند دور قبل می باشد. در این مقاله برای محاسبه سطح مقطع واقعی و دقیق سعی شده است سینماتیک فرآیند به همراه روابط ارتعاشی حاکم بر ابزار داخل تراش در جهت شعاعی در محیط نرم افزار ACIS پیاده سازی شود. قطعه کار استوانه ای به قطر اولیه mm 120و تیغچه به صورت یک سه گوش با زاویه 60 درجه با درنظر گرفتن شعاع نوک 0.4 میلی متر مدل سازی شده است. سیستم ارتعاشی ابزار داخل تراش همان گونه که در آزمایش تجربی مودال بررسی شده است دارای یک درجه آزادی در راستای شعاعی است و در دو راستای دیگر صلب در نظر گرفته شده است. با توجه با نقاط کنترلی تعریف شده روی مسیر ابزار، موقعیت ابزار در گام بعدی با در نظر گرفتن میزان انحراف از مسیر حاصل از ارتعاشات شعاعی محاسبه می شود و در ادامه مقدار تداخل ابزار با قطعه کار استخراج و به کمک نرم افزار محاسبه می گردد. بعد از به دست آوردن سطح مقطع دینامیکی و با داشتن ثابت برشی در جهت مورد نظر، نیروی دینامیکی جهت شعاعی از طریق رابطه(1) قابل محاسبه است. پس از محاسبه نیروها در جهت مورد نظر در هر گام زاویه ای، ارتعاشات لحظه ای سیستم در جهت متناطر با نیرو به کمک روابط(2) ارائه شده توسط تلاستی، به دست می آیند. با انتگرال گیری از مقدار شتاب به ترتیب سرعت و میزان جابه جایی محاسبه می شوند. با سوار شدن ارتعاشات به دست آمده در هر گام روی مسیر سینماتیکی ابزار موقعیت لحظه ای لبه برنده قابل محاسبه است. گام زاویه ای مناسب به منظور انتگرال گیری دقیق عددی، با مقایسه مقادیر مختلف، یک درجه انتخاب شده است.

(1)

(2)

**5- نتایج**

یکی از اساسی ترین نیازها در تحلیل و شبیه‌سازی فرآیندهای ماشینکاری مدلسازی و تخمین نیروهای برشی می‌باشد. در مدلسازی نیروها اثرات ارتعاشات ناخواسته لرزه تاثیر بسزایی در تعیین مقدار نیروهای برشی دارند. بصورت استاندارد، مدلسازی‌های نیرویی و تخمین ثوابت برشی به روش ساختارگرا در حالت بیشینه پایداری در حضورکمترین ارتعاش ابزار انجام می‌گیرد. در پژوهش ابتدا شبیه سازی پاسخ زمانی فرآیند در حالت پایدار صورت می گیرد و بعد از صحه گذاری آن شرایط برشی ناپایدار مورد بررسی قرار می گیرد. شبیه‌سازی پاسخ زمانی سیستم به‌منظور تعیین پارامترهای متناسب با زمان از قبیل شتاب، سرعت و موقعیت در هر لحظه از حرکت ابزار و همچنین محاسبه‌ی نیروهای ماشینکاری انجام می‌گیرد. برای صحه‌گذاری شبیه‌سازی های انجام شده در حوزه زمان و فرکانس از مقایسه خروجی‌های شتاب و نیرو حاصل و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر‌های شتاب نصب شده برروی ابزار و دینامومتر استفاده شده است. به منظور مقایسه مقادیر خروجی شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده شتاب و نیرو توسط شتاب‌سنج ها و دینامومتر، برای یک حالت ماشینکاری ثابت (عمق‌برش 2 میلیمتر، نرخ پیشروی 0.16 میلیمتر بر دور و سرعت اسپیندل 500 دور بر دقیقه) از سیگنال شتاب و نیرو در هر دو حالت FFT گرفته شده و مقادیر آنها در حوزه‌ی فرکانس با یکدیگر مورد مطابقت قرار داده شده است.



**شکل3** تابع پاسخ سیگنال خروجی شتاب حاصل از شبیه سازی در شرایط برشی پایدار



**شکل4** تابع پاسخ سیگنال خروجی شتاب حاصل از آزمون برشی در شرایط برشی پایدار

همانطور که در شکل های (3) و (4) مشاهده می‌شود فرآیند پایدار است. اختلاف کم بین سیگنال شتاب حاصل از آزمون برشی با سیگنال شبیه‌سازی میتواند به علت تاثیر مودهای بالاتر ارتعاشی و یا اثرات غیر خطی بودن فرایند مانند اثر دمپینگ فرآیند باشد. اما باید در نظر داشت که میزان تاثیر گذاری مودهای ارتعاشی در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار میگیرد. همانطور که مشاهده می‌شود دامنه مود اول در پاسخ فرکانسی سری فوریه بسیار بیشتر از مودهای بالاتر می‌باشد و مطابقت آن با پاسخ سری فوریه سیگنال شبیه‌سازی که درآن مود اول ارتعاشی به عنوان مود غالب سیستم درنظر گرفته شده کاملا مشهود است. بنابراین مدل ارائه شده برای حالت پایدار با تقریب بسیار خوبی قادر به پیش بینی دینامیک فرآیند می باشد.



**شکل4** تابع پاسخ سیگنال خروجی شتاب حاصل از شبیه سازی در شرایط برشی ناپایدار



**شکل5** تابع پاسخ سیگنال خروجی شتاب حاصل از آزمون برشی در شرایط برشی ناپایدار

در شکل های (4) و (5) شبیه سازی فرآیند در حالت ناپایدار صورت گرفته است. همان طور که مشاهده می شود فرآیند بعد از 4 ثانیه وارد محدوده ناپایداری با مقدار نیروی دینامیکی 700 نیوتن شده است و در آزمون های برشی بعد از زمان مشابه بعد از شروع درگیری محدوده ناپایداری با نیروی 700 نیوتن شروع می شود. برای مطالعه دقیق تر سعی شده است پاسخ سری فوریه دو سیگنال شبیه سازی و تجربی در شکل (6) و (7) با یکدیگر مقایسه شوند.

همان طور که مشاهده می شود سیگنال های مود اول در محدوده 260 هرتز می باشد که نزدیک فرکانس طبیعی اول ابزار می باشد که توسط آزمون مودال برای ابزار استخراج شد. که نشان می دهد ارتعاشات فرآیند در محدوده نزدیک فرکانس اول ابزار رخ می دهد. اختلاف های ناچیز بین دو سیگنال به دلیل غیر خطی بودن فرآیند در شرایط برشی ناپایدار می باشد و مدل معرفی شده فرآیند را خطی مدل کرده است با وجود ساده سازی های انجام شده نتایج قابل قبولی از مدل به دست آمده است به طوریکه در شرایط برشی ناپایدار بدون در نظر گرفتن اثرات غیر خطی مانند اثر دمپینگ فرآیند، فرسایش ابزار، پرش ابزار و خطاهای احتمالی در اندازه گیری مدل قادر به تخمین نیروی دینامیکی برش در فرکانس های مورد نظر می باشد.



**شکل6** پاسخ سری فوریه سیگنال نیرو حاصل از شبیه سازی در شرایط برشی ناپایدار



**شکل7** پاسخ سری فوریه سیگنال نیرو حاصل از آزمون برشی در شرایط برشی ناپایدار

6- جمع بندی

همان طور که نتایج نشان داد مدل هندسی با در نظر گرفتن فیزیک واقعی فرآیند با تقریب بسیار خوبی قادر به شبیه سازی نیروی دینامیکی برش است. به عبارت دیگر در شرایط برشی پایدارتطابق بسیاری خوبی بین پاسخ مدل هندسی ارائه شده و پاسخ مدل دامنه زمان نرم افزار متلب وجود دارد تخمین نیرو دینامیکی برش در شرایطی که ارتعاشات زیاد می شود به راحتی امکان پذیر نیست و اثر شعاع نوک در حضور ارتعاشات ناپایدار چشمگیر است و وجود این خطا باعث عدم صحت شبیه سازی می شود. بنابراین در ادامه از ACIS می توان جهت محاسبه سطح مقطع براده در شرایط برشی ناپایدار استفاده کرد. از آن جا که ارتباط بین ارتعاشات ابزار در شرایط برشی مختلف و سطح ایجاد شده در مطالعه چگونگی اثرگذاری مکانیزم ناپایداری لرزه روی سطح قطعه کار از موضوعات مهم بوده است از این روش میتوان جهت مطالعه و مدل سازی بافت سطح و بررسی نحوه شکل گیری کانال های لرزه و تاثیر شعاع نوک روی سطح استفاده نمود. هم چنین مدل قابلیت توسعه یافتن به مدل چند درجه آزادی به منظور مطالعه اثرات مودهای بالاتر ارتعاشی و تاثیر آن روی شبیه سازی سطح را داراست. ویژگی‌های ممتاز اين محيط می‌تواند در شبيه سازي و مطالعه کيفيت سطح توليدي مورد استفاده قرار گيرد به گونه ای که فرآيند با در نظر گرفتن رفتار ارتعاشی ابزار در محيط نرم افزار ACIS، برنامه نويسي و به صورت سه بعدي شبيه سازي می‌شود. در نتیجه ACIS ابزار قدرتمندی جهت مدل سازی عملیات ماشین کاری می باشد.

7- مراجع

1. Atabey, F., I. Lazoglu, and Y. Altintas, *Mechanics of boring processes—part I.* International journal of machine tools and manufacture, 2003. **43**(5): p. 463-476.

2. Lazoglu, I., F. Atabey, and Y. Altintas, *Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling.* International journal of machine tools and manufacture, 2002. **42**(14): p. 1567-1576.

3. Ozlu, E. and E. Budak, *Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations—part I: model development.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007. **129**(4): p. 726-732.

4. Ozlu, E. and E. Budak, *Comparison of one-dimensional and multi-dimensional models in stability analysis of turning operations.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(12-13): p. 1875-1883.

5. Ozlu, E. and E. Budak, *Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations—part II: experimental verification.* Journal of manufacturing science and engineering, 2007. **129**(4): p. 733-739.

6. Budak, E. and E. Ozlu, *Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations: a multi-dimensional approach.* CIRP annals, 2007. **56**(1): p. 401-404.

7. Moetakef-Imani, B. and N. Yussefian, *Dynamic simulation of boring process.* International Journal of Machine tools and manufacture, 2009. **49**(14): p. 1096-1103.

8. Sortino, M., G. Totis, and F. Prosperi, *Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012. **61**: p. 58-70.

9. Åkesson, H., T. Smirnova, and L. Håkansson, *Analysis of dynamic properties of boring bars concerning different clamping conditions.* Mechanical systems and signal processing, 2009. **23**(8): p. 2629-2647.

10. Fallah, M. and B. Moetakef-Imani, *Updating boring bar's dynamic model using particle swarm optimization.* مهندسی مکانیک مدرس, 2016. **16**(12): p. 479-489.

11. Fallah, M. and B. Moetakef-Imani, *Adaptive inverse control of chatter vibrations in internal turning operations.* Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. **129**: p. 91-111.

12. Fallah, M. and B. Moetakef-Imani, *Design, analysis, and implementation of a new adaptive chatter control system in internal turning.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019: p. 1-23.

1. Radial depth of cut [↑](#footnote-ref-1)
2. 2 Chatter [↑](#footnote-ref-2)
3. 3 Boundary Representation [↑](#footnote-ref-3)
4. 4 Sandvik [↑](#footnote-ref-4)
5. 1 Tenlee [↑](#footnote-ref-5)
6. 2 Dynamometer [↑](#footnote-ref-6)
7. 3 Kistler [↑](#footnote-ref-7)
8. 4 Advantech [↑](#footnote-ref-8)
9. 5 Peak-Picking [↑](#footnote-ref-9)
10. 1[Non-uniform rational B-spline](https://en.wikipedia.org/wiki/Non-uniform_rational_B-spline) [↑](#footnote-ref-10)