



## Dynamic Simulation of Boring Process in B-REP Geometric Modeling Environment

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mehrabi Nasab M.<sup>1</sup> MSc,  
Moetakef Imani B.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Mehrabi Nasab M, Moetakef Imani B. Dynamic Simulation of Boring Process in B-REP Geometric Modeling Environment. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2389-2401.

### ABSTRACT

Prediction of the dynamic behavior of machining operations during the process is the main challenge of machining simulations. Therefore, the investigation of effective parameters in dynamic behavior is of great importance. Machining vibration is one of the most important factors. This article studied the vibration of the process by developing the dynamic model of the boring bar. The high length-to-diameter ratio of the boring tool and its flexibility cause machining vibrations. The amplitude of the tooltip vibrations is a function of the dynamic characteristic of the tool which can lead to the stability or instability of the process. Tool rigidity at low diameter to length ratios is high, and in most cutting conditions the process is stable. The impact test is used to extract the tool's dynamic parameters and dynamic modeling of the process is developed inside the environment of ACIS software which is a powerful Boundary Representation (B-rep) solid modeling engine and it is proposed a novel method for simulating the dynamic equation of boring bar by using a solid modeling technique in a precise geometric environment. The mechanistic approach is used to modeling cutting mechanistic to develop the dynamic force model in the time domain. Also, dynamic time-domain parameters such as force, acceleration, and displacement in the Simulink environment are simulated. The results confirm that the presented geometrical model by considering the tool dynamics is well capable of estimating the force signal and the chip area changes.

**Keywords** Boring; Geometric Simulation; Dynamic; ACIS

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Azadi Square, Mashhad, Khorasan Razavi Province, Iran.  
Postal Code: 9177948974  
Phone: +98 (51) 38805089  
Fax: +98 (51) 38807185  
imani@um.ac.ir

#### Article History

Received: April 19, 2020  
Accepted: July 22, 2020  
ePublished: September 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] STEP-NC feature-oriented high-efficient CNC machining simulation [2] Cut geometry calculation for the semifinish five-axis milling of nonstraight staircase workpieces [3] Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process [4] Virtual process systems for part machining operations [5] An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling [6] A novel method of calculating the engagement length of cutting edge in five-axis machining [7] Prediction of cutting force in five-axis flat-end milling [8] An industrial case study of feature-based in-process workpiece modeling [9] Frame-sliced voxel representation: An accurate and memory-efficient modeling method for workpiece geometry in machining simulation [10] Cutter-workpiece engagement determination for general milling using triangle mesh modeling [11] Virtual workpiece: workpiece representation for material removal process [12] Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation [13] Swept volume generation for the simulation of machining processes [14] Integrated solid modeller based solutions for machining [15] A solid modeller based milling process simulation and planning system [16] Geometric simulation of ball-end milling operations [17] Developing a surface roughness model for end-milling of micro-channel [18] Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces [19] A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three-and five-axis virtual milling [20] Geometric modeling of cutter/workpiece engagements in three-axis milling using polyhedral representations [21] Manufacturing automation [22] Dynamic simulation of boring process in time and frequency domain [23] Machining dynamics

## شبیه‌سازی دینامیکی فرآیند بورینگ در محیط هندسی مبتنی بر B-REP

محمد مهربانی‌نسب MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

بهنام معتکف ایمانی PhD\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

از مهم‌ترین اهداف شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری، پیش‌بینی رفتار دینامیکی فرآیند است. بنابراین بررسی و تحلیل پارامترهای اثرگذار بر روی دینامیک فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است. از عوامل مهم و اثرگذار، ارتعاشات ماشین‌کاری است. در این مقاله شرایط ارتعاشی حاکم بر فرآیند، توسط مدل‌سازی دینامیکی ابزار بورینگ بررسی شده است. نسبت طول به قطر بالای ابزار بورینگ و انعطاف‌پذیری آن سبب ارتعاشات ماشین‌کاری می‌شود. دامنه ارتعاشات نوک ابزار تابعی از مشخصات دینامیکی ابزار است که می‌تواند منجر به پایداری یا ناپایداری فرآیند شود. در نسبت‌های طول به قطر پایین، صلبیت ابزار بالا است و فرآیند در اکثر شرایط برشی در محدوده پایداری قرار دارد. ثوابت دینامیکی ابزار با استفاده از نتایج آزمون ضربه استخراج و مدل‌سازی دینامیکی فرآیند با استفاده از روش مدل‌سازی جسم صلب، در نرم‌افزار ایسیس (ACIS) که ماهیت هندسی مبتنی بر نمایش مرزی (B-rep) دارد، پیاده‌سازی شده است و یک روش نوین برای شبیه‌سازی معادله دینامیکی ابزار با استفاده از روش مدل‌سازی جسم صلب در یک محیط دقیق هندسی ارائه شده است. برای توسعه مدل دینامیکی نیرو در حوزه زمان از ثوابت برشی استخراج شده توسط روش ساختارگرا استفاده شده است. همچنین پارامترهای دینامیکی حوزه زمان از قبیل نیرو، شتاب و جابه‌جایی در محیط سیمولینک شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج موید این است که مدل هندسی ارائه‌شده با در نظر گرفتن دینامیک ابزار به خوبی قادر به تخمین سیگنال نیرو و تغییرات مساحت براده است.

**کلیدواژه‌ها:** بورینگ، شبیه‌سازی هندسی، دینامیک، ایسیس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

\*نویسنده مسئول: imani@um.ac.ir

### مقدمه

در شبیه‌سازی هندسی فرآیندهای ماشین‌کاری به دنبال یک مدل فیزیکی واقعی هستیم که در آن هندسه قطعه‌کار و ابزار هر کدام به صورت، جداگانه تعریف می‌شوند. سپس با لحاظ کردن سینماتیک فرآیند، هندسه تداخل بین ابزار و قطعه‌کار و حجم جاروب‌شده در طی حرکت ابزار در طول مسیر استخراج می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای بولین، حجم تولیدشده در هر لحظه از حجم قطعه‌کار کم می‌شود. با استفاده از هندسه درگیر استخراج‌شده از فرآیند، می‌توان به مدل‌سازی نیروهای برشی، تغییرات مکانی سازه ابزار، ارتعاشات، تعیین آستانه ناپایداری فرآیند و همچنین شبیه‌سازی بافت سطح ماشین‌کاری پرداخته شود [1]. روش‌های محاسبه نیروی برشی را می‌توان به سه دسته

تحلیلی، عددی و ساختارگرا تقسیم‌بندی کرد [2] که روش تحلیلی دارای دقت کمتر و روش عددی زمان‌بر است. روش ساختارگرا به دلیل مزیت‌های نسبی در شرایط ماشین‌کاری مختلف و انواع لبه برشی نسبت به دو روش دیگر ترجیح دارد [3]. در روش ساختارگرا دو متغیر در محاسبه نیروی برشی فرآیند بورینگ ضروری است. این متغیرها ثوابت برشی و ضخامت دینامیکی براده است. ضخامت دینامیکی متأثر از هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار است که تحت اثر ارتعاشات نوک ابزار دست‌خوش تغییر است.

تحقیقات اخیر انجام‌شده در حوزه استخراج هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار مبتنی بر روش‌های هندسی، بیشتر در فرآیندهای ماشین‌کاری پنج محور بوده است [4-7] که بر مبنای نوع فرآیند، سینماتیک عملیات باربرداری بدون در نظر گرفتن دینامیک فرآیند، مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به اینکه سینماتیک فرآیند و نحوه درگیری بین ابزار و قطعه‌کار قبلاً توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته [8-11] در این تحقیق سعی شده است تا علاوه بر وجه هندسی فرآیند، دینامیک ابزار داخل تراش در شبیه‌سازی لحاظ شود. اهمیت شبیه‌سازی دینامیکی فرآیندهای ماشین‌کاری از جهت مطالعه پدیده ناپایداری لرزه (Chatter) است. ارتعاشات نوک ابزار سبب تغییر عمق برش لحظه‌ای خواهد شد که در نتیجه هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار متناسب آن دست‌خوش تغییر خواهد شد. روش‌های مدل‌سازی گسترده‌ای برای محاسبه هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار به کار گرفته شده است. ادبیات مروری نشان می‌دهد که روش‌های محاسبه هندسه درگیر در سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. این سه دسته شامل روش تحلیلی، روش گسسته و روش بر مبنای مدل‌سازی جسم صلب هستند.

روش مدل‌سازی جسم صلب در شش دهه قبل، زمانی که سیستم‌های کدکم نیاز به مدل‌های شامل ابعاد هندسی داشتند طراحی شد. در حال حاضر مدل‌های رایج در مدل‌سازی جسم صلب، نمایش مرزی (B-rep) و ساخت هندسه صلب (CSG) هستند. نمایش مرزی به معنای استفاده از لبه‌ها، سطوح و راس‌هایی برای توصیف مرزهای شکل اجسام صلب است [12]. نمایش مرزی یک نمایش پیوسته و دقیق از حجم جاروب ابزار متحرک را ارائه می‌دهد [13]. روش ساخت هندسه صلب برای محاسبه هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار در شبیه‌سازی مدل نیرویی استفاده شده است [14, 15]. معتکف/ایمانی و البستاوی، یک روش برای مدل‌سازی هندسی فرآیند فرزکاری ارائه دادند و از تکنیک Sweeping/Skinning برای ایجاد مدل نمایش مرزی دقیق حجم جاروب‌شده ابزار فرز استفاده کردند. در این تحقیق عملیات نیمه‌پرداخت توسط عملیات‌های متوالی بولین بین قطعه‌کار حین فرآیند و حجم جاروب‌شده ابزار در محیط ایسیس شبیه‌سازی شد [16]. در تحقیق دیگری کوراواند و معتکف/ایمانی [17] با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی لبه برشی، حرکت ترکودال ابزار و مفهوم کمینه ضخامت براده به شبیه‌سازی توپوگرافی سطح

که منحنی‌ها یکدیگر را قطع می‌کنند نقاط تعریف می‌شوند. بعد از پیاده‌سازی هندسه فرآیند، مساحت دینامیکی براده در هر شرایطی از برش در حین فرآیند محاسبه شده است. مدل‌سازی با کمک گرفتن از روش انتگرال‌گیری عددی در حوزه زمان در محیط نرم‌افزار صورت گرفته و دینامیک ابزار و فرآیند برش با در نظر گرفتن اثر ارتعاشات شبیه‌سازی شده است. مدل دینامیکی ابزار بورینگ در ابتدا با در نظر گرفتن سه حالت در راستای شعاعی انجام شده است سپس مشخص شد که حالت اول فعال‌تر است. در گام بعدی با استفاده از روش شبیه‌سازی در حوزه زمان معادله حرکت ابزار داخل تراش در جهت شعاعی که بیشترین اثر روی ضخامت براده دینامیکی را دارد توسط انتگرال‌گیری عددی حل شده است و ضخامت دینامیکی براده محاسبه شد. همچنین با داشتن پارامترهای برشی و ثوابت برشی، نیروهای دینامیکی برش محاسبه شده‌اند. معادلات در محیط سیمولینک پیاده‌سازی شده و مدل ریاضی بر مبنای پارامترهای استخراج شده از آزمون مودال تجربی توسعه یافته است. در نهایت مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی هندسی فرآیند با روش دامنه زمان مشخص کارآیی مدل شبیه‌سازی هندسی است.

#### بستر آزمایشگاهی تحقیق

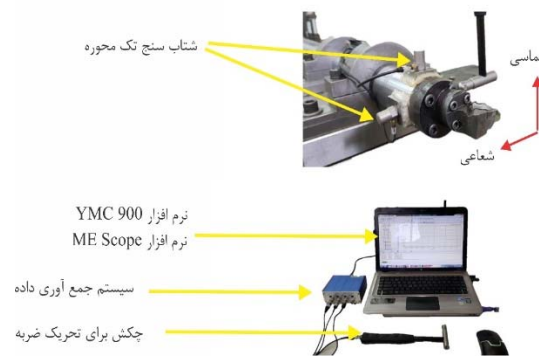
مجموعه ترکیب‌شده ابزار داخل تراش، روی میز ماشین تراش نصب شده است. شتابسنج‌های مورد استفاده در آزمون مودال تجربی روی ابزار در جهت اصلی برشی قرار گرفته‌اند. ابزار داخل تراش در آزمایشگاه طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده است. شکل ۱ مجموعه ترکیبی ابزار بورینگ نصب‌شده و تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری آزمون مودال تجربی را نشان می‌دهد. میله داخل تراش به صورت تیر یک‌سرگیردار است که نیروی برشی فرآیند در انتهای آزاد آن وارد می‌شود. مجموعه ترکیبی شامل پنج قسمت عمده تکیه‌گاه ریخته‌گری شده از جنس چدن GGG40، بوش‌های تکیه‌گاهی از جنس فولاد آلیاژی X210Cr12، بدنه فولادی از جنس s355JR، رابط کاهش قطر مدل 570-60-23-40 و سر برشی قابل تعویض مدل 570-DTFNR (ساخت شرکت سندویک) است. صلبیت ابزار موهون استحکامات و اتصالات مجموعه ترکیبی است. برای اطمینان از صلبیت مجموعه، پنج پیچ اتصال سر برشی و تکیه‌گاه ابزار تا حد امکان باید محکم شوند. این مهم توسط آچار گشتاورسنج انجام می‌شود، طوری که تمام پیچ‌ها تا گشتاور ۵۰ نیوتن‌متر محکم شده‌اند. طول آویز بدنه لوله‌ای شکل ابزار بورینگ برابر ۲۴۰ و قطر خارجی آن ۶۰ و قطر داخلی ۴۰ میلی‌متر است. در انتهای بدنه ابزار رابط کاهش قطر و سر برشی قابل تعویض قرار دارند که تیغچه برشی روی آن واقع شده است. قطعه‌کار از جنس آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۳ است. قطر خارجی قطعه‌کار برابر ۱۲۶ و قطر داخلی آن، پس از آماده‌سازی اولیه برابر ۹۲ میلی‌متر و طول قطعه‌کار ۵۰ سانتی‌متر است. شکل ۲ بستر

میکروکانال‌ها در فرآیند میکروفرزکاری پرداختند. در نهایت برای مقایسه، پروفیل سطح حاصل از شبیه‌سازی ایسیس با نتایج تجربی و مدل رگرسیون مورد مقایسه قرار گرفت. مدل آنها تنها شامل سینماتیک فرآیند بود. لازوگلو و همکاران از روش نمایش مرزی برای محاسبه حجم براده استفاده کردند و از عملگرهای بولین برای کم‌کردن هندسه درگیر ابزار قطعه‌کار استفاده نمودند [18]. مدل مش مثلثی یک مدل نمایش مرزی ساده‌تر دیگری است که توسط محققان برای مدل‌سازی هندسه ماشین‌کاری استفاده شده است [19, 20] که در این روش سطح مدل توسط یک سری المان مثلثی به هم متصل شده تقریب زده می‌شود. در این روش محاسبه تداخل‌ها نیاز به به‌روزرسانی مدل نمایش مرزی دارد که زمان‌بر است که دلیل آن تشخیص مثلث‌های به هم متصل در حین به‌روزرسانی این مدل است. لی و همکاران [11] روش نمایش مرزی را بدون نیاز به به‌روزرسانی پیوسته قطعه‌کار ارتقا دادند و فقط با یک‌بار به‌روزرسانی بعد از هر مسیر ابزار این کار را انجام دادند. روش مدل‌سازی جسم صلب به دلیل اینکه به‌طور دقیق هندسه درگیر را توسط عملیات‌های بولین استخراج می‌کند به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که روش هندسه صلب محدودیت‌هایی به لحاظ زمان محاسباتی دارد که بیشتر در ماشین‌کاری‌های سطوح تندرسی مشخص است، محققان برای رفع مشکل زمان‌بر بودن از روش‌های گسسته مانند Z-Mapping، Z-Buffer و مدل Polyhedral برای تعیین هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار استفاده کردند. Z-Map از پرکاربردترین آنها است که قطعه‌کار توسط تقاطع نقاط بردارهای جهت Z با سطح بالایی مدل نمایش داده می‌شود. به‌طور کل روش گسسته در مقایسه با روش هندسه صلب به علت مشکل شطرنجی شدن دقت کافی را ندارد. اگر چه این مشکل با افزایش وضوح حل می‌شود ولی حل آن زمان‌بر است. برای حل مشکل زمان‌بر بودن محققان از روش‌های تحلیلی مختلفی در فرآیندهای گوناگون استفاده کردند.

#### شرح مساله

شبیه‌سازی دقیق فرآیند ماشین‌کاری نیازمند پیش‌بینی دقیق مساحت براده دینامیکی است که فرآیندی بسیار پیچیده است، چرا که این امر تحت تاثیر موج‌های ارتعاشی باقی‌مانده روی سطح قطعه‌کار در طی چند دوره قبل است. همچنین لحاظ کردن اثر شعاع نوک در ضخامت براده دینامیکی و تعیین مرز تشکیل براده نیازمند محاسبات پیچیده است. مدل‌سازی فرآیند توسط نرم‌افزار Ansys که یک مدل‌ساز هندسی جسم صلب مبتنی بر نمایش مرزی است، صورت گرفته است. نمایش مرزی بر مبنای تئوری به هم‌پیوستن یک مجموعه صفحه و ایجاد یک حجم سه‌بعدی تعریف می‌شود. در محل‌هایی که سطوح حجم به هم می‌رسند، منحنی‌ها تعریف می‌شوند و همچنین به‌طور مشابه در محل‌هایی

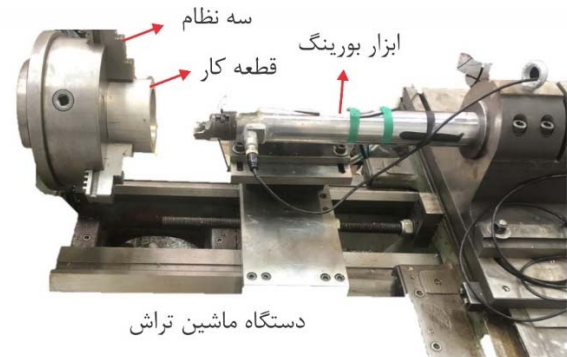
محدوده فرکانسی زیر ۵۰۰۰ کاملاً خطی است. شتاب‌سنج‌ها در فاصله ۲۰ میلی‌متر از نوک ابزار نصب شده‌اند. مشخصات شتاب‌سنج‌ها در جدول ۱ آمده است. برای اعمال ضربه، سمت مقابل محل نصب شتاب‌سنج‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در هر آزمون مودال، سازه ابزار ۱۰ مرتبه تحریک شده است و برای تکرارپذیری نتایج با ثابت‌نگه‌داشتن بستر آزمایشگاهی، آزمون چهار مرتبه تکرار شده است. در نمودار ۱ تابع پاسخ فرکانس ابزار بورینگ برای نسبت طول به قطر ۴ محاسبه و ترسیم شده است. این تابع بیانگر رابطه فرکانسی بین نیروی ورودی و شتاب خروجی سیستم دینامیکی است. همان طور که مشاهده می‌شود حالت ارتعاشی اول دارای بیشترین دامنه است (۵۱ دسی‌بل اختلاف دامنه با حالت دوم) بنابراین برای مدل‌سازی رفتار ارتعاشی سیستم در نسبت طول به قطر ۴، لحاظ کردن حالت اول کفایت می‌کند.



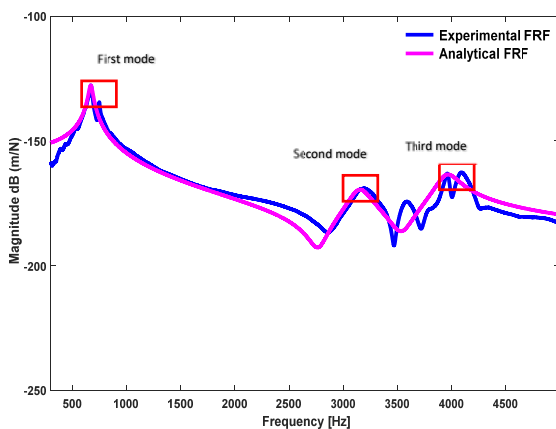
شکل ۱) مجموعه مونتازای ابزار بورینگ به همراه تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد استفاده در آزمون مودال تجربی

جدول ۱) مشخصات شتاب‌سنج‌ها

پارامتر	کانال داده	
	۱	۲
ضریب حساسیت (mV/g)	۹۸/۱	۹۵/۴
دامنه اندازه‌گیری (g)	۵۰	۵۰
شماره سریال	۵۰۳۰۵۳	۵۰۳۰۵۴
فاصله از تکیه‌گاه (mm)	۹۰	۹۰



شکل ۲) ماشین تراش به همراه مجموعه ترکیبی ابزار و قطعه‌کار



نمودار ۱) مقایسه تابع پاسخ اندازه‌گیری‌شده توسط مودال تجربی و تابع پاسخ برازش‌شده توسط مودال تحلیلی

### استخراج پارامترهای مودال و تعیین مدل دینامیکی

به‌منظور استخراج پارامترهای دینامیکی ابزار داخل تراش به‌کمک تئوری تحلیل مودال می‌توان از روش برازش منحنی چند درجه آزادی یا برازش منحنی یک درجه آزادی بهره برد. ساده‌ترین و پرکاربردترین تحلیل مودال یک درجه آزادی، روش انتخاب قله‌ها است. معمولاً در سیستم‌های دینامیکی با میرایی تناسبی کم و دارای حالت‌های ارتعاشی به اندازه کافی دور از هم مناسب است. پاسخ فرکانسی سیستم به‌صورت ترکیب خطی از پاسخ‌های چند سیستم یک درجه آزادی تخمین زده می‌شود. برای تخمین

### تجهیزات آزمون مودال

روش‌های تحلیل مودال در دو دسته حوزه فرکانس و حوزه زمان جای می‌گیرند که آزمون مودال تجربی رایج‌ترین روش شناسایی در حوزه فرکانس است. در این آزمون معمول‌ترین روش تحریک سازه، استفاده از چکش است که به‌وسیله آن، طیف گسترده‌ای از فرکانس‌های سیستم تحریک می‌شوند و در نهایت تابع پاسخ فرکانس سیستم از نسبت تبدیل فوریه سیگنال خروجی (جابه‌جایی، سرعت یا شتاب) به تبدیل فوریه سریع سیگنال نیروی ورودی محاسبه خواهد شد. دو شتاب‌سنج تک‌محوره به‌صورت همزمان پاسخ ابزار بورینگ را با توجه به تحریک ضربه ثبت می‌کنند. سخت‌افزار اکتساب داده چهارکاناله مدل YMC9004 و نرم‌افزار YMC9800 برای جمع‌آوری و ذخیره داده‌ها استفاده شده است. سیگنال‌های نیرو و شتاب در آزمون مودال با توجه به نرخ داده‌برداری سیستم اکتساب داده که ۱۰۰ کیلو هرتز است، ثبت می‌شوند. چکش مورد استفاده جهت تحریک از نوع IH-02 ساخت شرکت تن‌لی است که حداکثر دامنه نیرو تحریک ۲۰۰۰ نیوتن را دارا است. در محدوده زیر ۵۰۰۰ هرتز، پاسخ فرکانسی شتاب‌سنج‌ها کاملاً خطی بوده و میزان غیرخطی بودن رفتار دینامیکی چکش در تمام بازه‌ها کمتر از یک درصد است و پاسخ فرکانسی شتاب‌سنج‌ها در



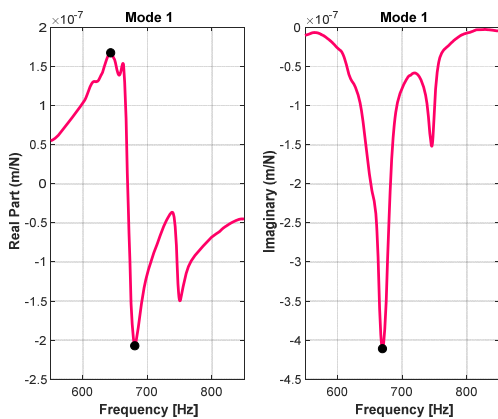
تابع پاسخ فرکانس مدل سه درجه آزادی میله داخل تراش استخراج می‌شوند. برای محاسبه مقادیر بردارهای ویژه برای هر حالت (مقادیر ماتریس مودال) به صورت گرافیکی می‌توان از تابع پاسخ مستقیم و مقاطع اندازه‌گیری شده از سیستم مطابق روابط ۴ استخراج کرد. قسمت موهومی برای شناسایی بردارهای ویژه کفایت می‌کند [21].

$$\frac{\operatorname{Im}\left(\frac{X_1}{F_3}\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{X_3}{F_3}\right)}\bigg|_{\omega_{n1}} = p_1$$

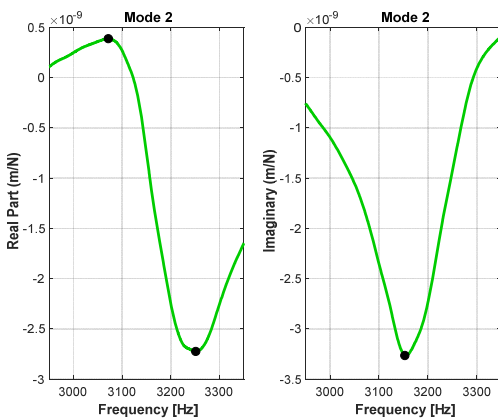
$$\frac{\operatorname{Im}\left(\frac{X_2}{F_3}\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{X_3}{F_3}\right)}\bigg|_{\omega_{n2}} = p_2 \quad (4)$$

$$\frac{\operatorname{Im}\left(\frac{X_3}{F_3}\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{X_3}{F_3}\right)}\bigg|_{\omega_{n3}} = p_3$$

به همین ترتیب مقادیر متناظر با قله دوم و سوم محاسبه می‌شوند. با فرض اینکه میرایی سازه از نوع تناسبی است برای تعیین پارامترهای مودال که به صورت ماتریس‌های  $3 \times 3$  هستند، برای هر حالت ارتعاشی، مقادیر عددی سه فرکانس و یک مقدار کمینه از قسمت حقیقی و موهومی تابع تبدیل فرکانس استخراج می‌شود. قسمت موهومی و حقیقی هر مود ارتعاشی در نمودارهای ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.



نمودار (۲) تابع برازش شده روی حالت اول



نمودار (۳) تابع برازش شده روی حالت دوم

پارامترهای مودال باید برازش مودال انجام شود که در اینجا از روش برداشت قله برای این کار استفاده شده است. در پهنای باند اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانس سه حالت وجود دارد بنابراین روش برداشت قله برای هر کدام از حالت‌ها به طور جداگانه اعمال می‌شود. سه قله و نه فرکانس در ترسیم پاسخ فرکانس شناسایی می‌شود. همراه با هر قله سه فرکانس در نظر گرفته می‌شود که یک فرکانس متناظر با کمترین مقدار قله در قسمت موهومی (فرکانس طبیعی) و دو فرکانس دیگر متناظر با فرکانس قله در قسمت حقیقی تابع تبدیل است. سه فرکانس اول و قله اول بیانگر حالت فرکانس پایین است و به ترتیب قله دوم و سوم نشان‌دهنده فرکانس طبیعی حالت‌های دوم و سوم هستند. ضریب میرایی برای هر حالت به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود [21].

$$\xi_{q1} = \frac{\omega_3 - \omega_2}{2\omega_{n1}} \quad \xi_{q2} = \frac{\omega_5 - \omega_4}{2\omega_{n2}} \quad \xi_{q3} = \frac{\omega_7 - \omega_6}{2\omega_{n3}} \quad (1)$$

مقدار کمترین قله بخش موهومی متناظر است با  $\frac{-1}{2k\xi_{q1}}$  و با استفاده از آن، مقدار متناظر با سفتی مودال محاسبه می‌شود. همچنین مقادیر جرم مودال و ضریب میرایی مودال از روابط ۲ محاسبه خواهند شد [21].

$$\omega_{n1}^2 = \frac{k_{q1}}{m_{q1}} \quad c_{q1} = 2\xi_{q1}\sqrt{m_{q1}k_{q1}} \quad (2)$$

به همین ترتیب مقادیر متناظر با قله دوم و سوم محاسبه می‌شوند. هنگامی که ماتریس‌های مودال توسط روش برداشت قله مشخص شد، مرحله بعدی در مشخص کردن مدل این است که با استفاده از تابع تبدیل فرکانس‌های مستقیم و متعامد اندازه‌گیری شده، شکل حالت‌ها مشخص و ماتریس مودال ایجاد شود. تابع تبدیل فرکانس مستقیم اندازه‌گیری شده را می‌توان با برازش سه حالت تقریب زد. این بدان معنا است که مدل، سه درجه آزادی دارد. برای پیدا کردن پارامترهای مودال تابع تبدیل فرکانس مستقیم اندازه‌گیری شده هر حالت را به طور جداگانه در نظر می‌گیریم. زمانی که در فضای مودال معادله‌ها را برای تعیین مدل مودال سیستم سه درجه آزادی از یکدیگر جدا می‌کنیم، برای برگشت به فضای فیزیکی دو گام جمع کردن تابع پاسخ‌های فرکانس در فضای مودال برای به دست آوردن تابع تبدیل فرکانس مستقیم و جمع کردن تابع پاسخ‌های فرکانس در فضای مودال که توسط بردارهای ویژه مقیاس‌بندی شدند برای به دست آوردن تابع تبدیل متعامد، انجام می‌شود.

در اینجا با تابع تبدیل فرکانس مستقیم فضای فیزیکی اندازه‌گیری شده شروع می‌کنیم  $\left(\frac{X_1}{F_1}\right)$ . تابع پاسخ‌های فرکانس در فضای مودال  $\left(\frac{Q_1}{R_1}, \frac{Q_2}{R_2}, \frac{Q_3}{R_3}\right)$  با استفاده از روش برداشت قله تعیین می‌شوند. برازش سه حالت تابع تبدیل فرکانس مستقیم در فضای فیزیکی به سادگی از مجموع پاسخ‌های مودال مطابق رابطه ۳ به دست می‌آید [21].

$$\frac{X}{F} = \frac{Q_1}{R_1} + \frac{Q_2}{R_2} + \frac{Q_3}{R_3} \quad (3)$$

در روش برداشت قله هر کدام از جمله‌های  $\frac{Q_1}{R_1}$  و  $\frac{Q_2}{R_2}$  و  $\frac{Q_3}{R_3}$  به صورت جداگانه برازش می‌شوند و پارامترهای مودال حاصل از

$$\begin{aligned}
 [M] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \\
 [K] &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \\
 [C] &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (7)$$

ماتریس مودال همواره یک ماتریس مربعی است. با نرمال‌سازی نسبت به مختصات سوم، رابطه ۸ نتیجه شده است.

$$p[\psi_1 \quad \psi_2 \quad \psi_3] = \begin{bmatrix} p_1 & p_3 & p_5 \\ p_2 & p_4 & p_6 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

مقادیر مجهول را می‌توان از نسبت مقدار قله در قسمت موهومی تابع تبدیل فرکانس متقاطع به مقدار قله در قسمت موهومی تابع تبدیل فرکانس مستقیم به‌دست آورد. ماتریس مودال به‌صورت رابطه ۹ نوشته شده است [21]. ستون اول بیانگر مقادیر قله حاصل از قسمت موهومی تابع تبدیل فرکانس مستقیم است. ستون دوم و سوم به‌ترتیب بیانگر مقادیر قله حاصل از قسمت موهومی تابع تبدیل فرکانس متقاطع در فواصل ۲۹۰ و ۳۹۰ میلی‌متری تکیه‌گاه هستند. با جایگذاری مقادیر در رابطه ۹، رابطه ۱۰ حاصل می‌شود.

$$[p] = \begin{bmatrix} DOF1(1.1) & DOF2(1.1) & DOF3(1.3) \\ DOF1(1.2) & DOF2(1.2) & DOF3(1.3) \\ DOF1(1.3) & DOF3(1.3) & DOF3(1.3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[p] = 10^{-6} \begin{bmatrix} -0.4109 & -0.0033 & -0.0066 \\ -0.2468 & -0.0072 & -0.0073 \\ -0.1444 & -0.0062 & -0.0035 \end{bmatrix} \quad (10)$$

بردار ویژه اول  $\psi_1$  متناظر با ارتعاشات در فرکانس طبیعی اول و به‌ترتیب  $\psi_2$  و  $\psi_3$  بردار ویژه‌های متناظر با ارتعاشات در فرکانس‌های طبیعی دوم و سوم هستند. تابع تبدیل فرکانس هر حالت در دامنه فرکانس در فضای مودال به‌ترتیب برای فرکانس‌های طبیعی اول، دوم و سوم به‌دست می‌آوریم (روابط ۱۱):

$$\begin{aligned}
 \frac{Q_1}{R_1} &= \frac{1}{4.3445 \times 10^7} \left[ \frac{(1-r_1^2) - i(2 \times 0.028 \times r_1)}{((1-r_1^2)^2 + (2 \times 0.028 \times r_1)^2)} \right] \\
 \frac{Q_2}{R_2} &= \frac{1}{5.3807 \times 10^9} \left[ \frac{(1-r_2^2) - i(2 \times 0.0285 \times r_2)}{((1-r_2^2)^2 + (2 \times 0.0285 \times r_2)^2)} \right] \\
 \frac{Q_3}{R_3} &= \frac{1}{3.1852 \times 10^9} \left[ \frac{(1-r_3^2) - i(2 \times 0.0238 \times r_3)}{((1-r_3^2)^2 + (2 \times 0.0238 \times r_3)^2)} \right] \\
 r_1 &= \frac{\omega}{669.5} \quad r_2 = \frac{\omega}{3153} \quad r_3 = \frac{\omega}{3957.5}
 \end{aligned} \quad (11)$$

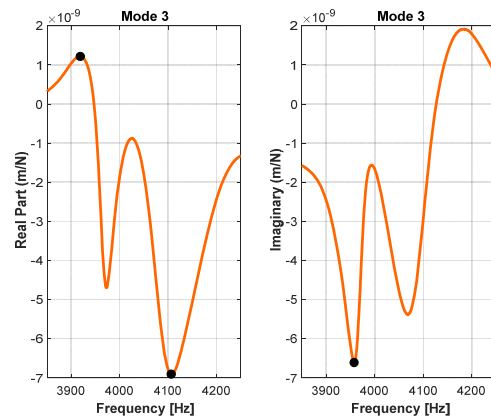
از برازش سه تابع تبدیل فرکانس در فضای مودال سه حالت، تابع تبدیل فرکانس سیستم در فضای فیزیکی در دامنه فرکانس به‌دست خواهد آمد (روابط ۱۲) [21]. بنابراین:

$$\begin{aligned}
 \frac{X_3}{F_3} &= \frac{Q_1}{R_1} + \frac{Q_2}{R_2} + \frac{Q_3}{R_3} \\
 \frac{X_1}{F_3} &= p_1 \frac{Q_1}{R_1} + p_3 \frac{Q_2}{R_2} + p_5 \frac{Q_3}{R_3} \\
 \frac{X_2}{F_3} &= p_2 \frac{Q_1}{R_1} + p_4 \frac{Q_2}{R_2} + p_6 \frac{Q_3}{R_3}
 \end{aligned} \quad (12)$$

برای به‌دست‌آوردن پاسخ‌ها در فضای فیزیکی در حوزه فرکانس از تبدیل معکوس به فضای فیزیکی استفاده شده است (روابط ۱۳ و ۱۴) [21].

$$\{\bar{X}\} = [p]\{\bar{Q}\} = \begin{bmatrix} p_1 & p_3 & p_5 \\ p_2 & p_4 & p_6 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 X_1 &= p_1 Q_1 + p_3 Q_2 + p_5 Q_3 \\
 X_2 &= p_2 Q_1 + p_4 Q_2 + p_6 Q_3 \\
 X_3 &= Q_1 + Q_2 + Q_3
 \end{aligned} \quad (14)$$



نمودار ۴) تابع برازش شده روی حالت سوم

با توجه به روابط ۱ و ۲ پارامترهای مودال سیستم (جرم، سفتی و میرایی) از تابع تبدیل فرکانس مستقیم استخراج می‌شوند (روابط ۵). مقادیر قطری ماتریس‌ها نشان‌دهنده پارامترهای هر یک از درجات آزادی برازش‌شده به تابع تبدیل استخراج‌شده از آزمون مودال هستند.

$$\begin{aligned}
 Mq &= \begin{bmatrix} 2.45 & 0 & 0 \\ 0 & 13.70 & 0 \\ 0 & 0 & 17.77 \end{bmatrix} \\
 Kq &= \begin{bmatrix} 43444805.77 & 0 & 0 \\ 0 & 5380688022.85 & 0 \\ 0 & 0 & 10987474498.93 \end{bmatrix} \\
 Cq &= \begin{bmatrix} 578.47 & 0 & 0 \\ 0 & 15462.31 & 0 \\ 0 & 0 & 6085.16 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (5)$$

پارامترهای سیستم ارتعاشی، با استفاده از پارامترهای مودال فرکانس‌های طبیعی و ضریب میرایی قابل شناسایی هستند که در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲) پارامترهای سیستم ارتعاشی استخراج‌شده از آزمون مودال تجربی برای ابزار داخل تراش

حالت ارتعاشی	نسبت میرایی	فرکانس طبیعی (Hz)
اول	۰/۰۲۸	۶۶۹/۵
دوم	۰/۰۲۸۵	۳۱۵۳
سوم	۰/۰۲۳۸	۳۹۵۷/۵

### معادله حرکت سیستم

ماشین ابزار معمولاً چندین درجه آزادی در جهات مختلف دارد. ارتعاشات بین ابزار برشی و سطح قطعه‌کار ایجادشده همیشه یک موضوع مهم در شبیه‌سازی‌های ماشین‌کاری بوده است چرا که سطح نهایی، ضخامت براده بریده‌شده و نیروهای ماشین‌کاری را تحت الشعاع قرار می‌دهد. شکل ۳ سیستم جرم و فنر سه درجه آزادی فرض‌شده برای ابزار داخل تراش را نشان می‌دهد. معادله حرکت برای سیستم فوق در شکل ماتریس به‌صورت رابطه ۶ خواهد بود [21].

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (6)$$

که ماتریس‌های جرم، سفتی و میرایی به‌ترتیب به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شوند [21].

ثوابت برشی از دو روش قابل محاسبه است. در روش اول ثوابت به‌صورت تابعی از پارامترهای برش متعامد شامل تنش برشی قطعه‌کار، زاویه برش، ضریب اصطکاک و زوایای هندسی لبه برنده تعیین می‌شوند. روش ساختارگرا راه‌حل دوم محاسبه این ثوابت هستند که با استفاده از برازش منحنی روی داده‌های نیروهای حاصل از آزمون برش تجربی تخمین زده می‌شوند. از ثوابت برشی که توسط روش ساختارگرا به‌دست آمدند، استفاده می‌شود که در جدول ۴ آورده شده‌اند [22].

جدول ۳) شرایط برشی آزمایشات

شماره آزمایش	پارامتر
۱	عمق برش (mm)
۱	سرعت چرخنده (rpm)
۰/۲	نرخ پیش‌روی (mm/r)
۰/۴	شعاع نوک (mm)

جدول ۴) ثوابت برشی استخراج‌شده از آزمون برشی بر روی قطعه‌کار جنس آلومینیوم

ثابت برشی (N/M <sup>2</sup> )	راستای نیرویی
۲۱۵/۲۶	عمق برشی
۴۰۸/۲۵	پیش‌روی
۸۴۶/۶۸	سرعت برشی

### شبه‌سازی در حوزه زمان

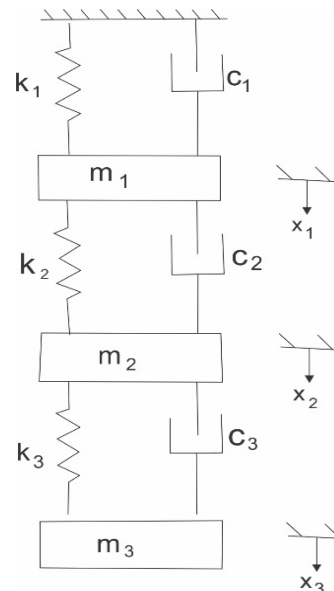
در این روش معادله حرکت ابزار بورینگ توسط انتگرال‌گیری عددی حل می‌شود و این امکان فراهم است که الف) ضخامت براده لحظه‌ای از طریق ارتعاشات در دوران فعلی و دوران قبلی محاسبه شود. ب) همچنین نیروی برش دینامیکی در لحظه جاری با داشتن پارامترهای برش، ضخامت براده دینامیکی و ثابت برشی محاسبه شود. ج) در نهایت با اعمال روش انتگرال‌گیری عددی بر روی معادله حرکت سیستم ارتعاشی جابه‌جایی نوک ابزار در جهت مورد نظر به‌دست آید. ارتعاشات ابزار سبب ایجاد شدن یک سطح موج‌دار روی قطعه‌کار می‌شود. عبور دوم ابزار از روی این سطح سبب تقابل ارتعاشات ابزار با سطح موج‌دار می‌شود. بنابراین ضخامت براده در هر لحظه بسته به تغییر شکل ابزار از مکان ایده‌آل خود به سبب ارتعاشات و سطح موج‌دار قطعه‌کار در دور قبل تغییر خواهد کرد. از نقطه نظر مدل‌سازی، این بازایش موج به‌صورت یک جمله تاخیر زمانی در معادله ضخامت براده ظاهر خواهد شد. ضخامت براده لحظه‌ای وابسته به زمان از طریق رابطه ۱۵ تعیین می‌شود [23].

$$h(t) = h_m + x(t - \tau) - x(t) \quad (15)$$

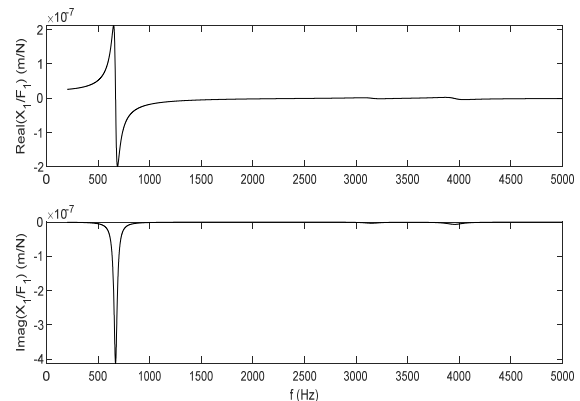
بعد از محاسبه ضخامت براده، نیرو در گام زمانی جاری توسط عرض براده انتخاب شده و ثابت نیرو برشی در جهت مورد نظر محاسبه خواهد شد. عبارت مساحت براده دینامیکی نیز از حاصل ضرب ضخامت دینامیکی در عرض براده قابل محاسبه است [23].

ترسیم حاصل از روش ماتریس معکوس در نمودار ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت اول ارتعاشات بیشترین اثر را روی تابع تبدیل سیستم دارد. بنابراین با تحریک ابزار داخل تراش مستعدترین حالت جهت ناپایداری کردن دینامیک ابزار، حالت اول است. بنابراین توجه به این نکته ضروری است که دینامیک ابزار توسط مود اصلی ارتعاشی بیان می‌شود.



شکل ۳) سیستم جرم و فنر سه درجه آزادی به همراه نیروی هارمونیک اعمال‌شده به مختصات‌های x1 و x2 و x3



نمودار ۵) منحنی قسمت حقیقی و موهومی تابع پاسخ فرکانس فیزیکی

### آزمایشات تراش

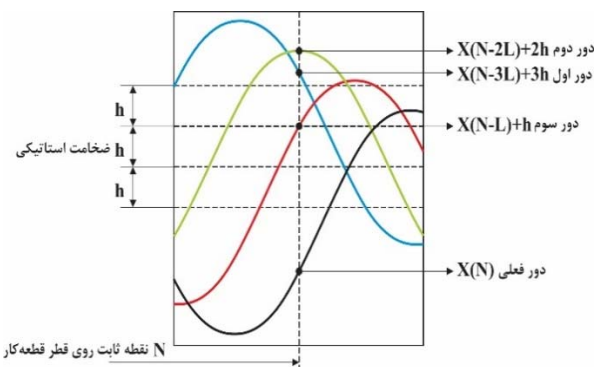
آزمایشات بر روی ماشین تراش تبریز مدل TN50B انجام شده است. جنس قطعه‌کار مورد آزمایش آلومینیوم Al 6063T6 و جنس ابزار برشی فولادی است. مدل‌سازی عملیات در پنج دور در دو حالت شرایط برشی پایدار با دو عمق برشی متفاوت انجام شده است. در جدول ۳ پارامترهای انجام آزمایش نشان داده شده است. آزمایشات پنج‌بار تکرار شده است.

بازتولید موج‌ها به صورت شماتیک نمایش داده شد. با توجه به توضیحات داده شده و همچنین رابطه ۱۷ باید دزنظر گرفت که ضخامت براده دائماً در حال تغییر است. به این منظور از الگوریتمی برای محاسبه ضخامت براده دینامیکی استفاده شده است که در آن از موقعیت نوک ابزار در سه دور قبل براده برداری بهره گرفته شده است. یک نقطه ثابت بر روی قطر داخلی قطعه کار دزنظر گرفته شده و موقعیت ابزار در هر دور بر روی این نقطه استخراج می‌شود. بیشترین عمق براده برداری ابزار برابر با پایین‌ترین موقعیت ابزار در دوره‌های متوالی است. در نتیجه از رابطه ۲۱ می‌توان ضخامت براده دینامیکی و در نتیجه نیروهای حاصل از ماشین‌کاری را محاسبه نمود. در شکل ۵ نقطه ثابت روی قطر قطعه کار با N نمایش داده شده است. L تعداد نمونه‌های زمانی برای یک دور در شبیه‌سازی و  $X_{min}$  پایین‌ترین موقعیت ابزار در دوره‌های متوالی است.

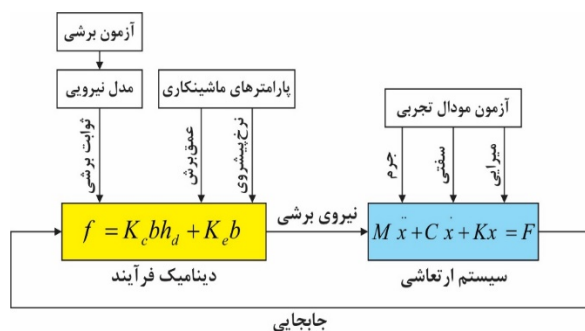
$$\begin{cases} X_{min} = X(N-L) + h \\ h_d = X(N) - X_{min} \end{cases} \quad (21)$$

$$f = K_c b h_d + K_e b$$

پس از محاسبه مقدار نیروی برشی، معادله ارتعاشی ابزار طبق رابطه ۱۸ به صورت مقداردهی عددی بازگشتی محاسبه می‌شود. خروجی این شبیه‌سازی پارامترهای زمانی سیستم ارتعاشی است. شماتیک الگوریتم این شبیه‌سازی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۵) محاسبه مقدار ضخامت براده دینامیکی با استفاده از موقعیت نوک ابزار در دوره‌های متوالی



شکل ۶) شماتیک الگوریتم محاسبه پاسخ زمانی فرآیند با استفاده از نرم افزار متلب

$$h(t) = h_m + x(t - \tau) - x(t) \quad (16)$$

$$A = bh(t) \quad (17)$$

با توجه به نیروی محاسبه شده در جهت مورد نظر توسط روابط ۱۶ و ۱۷، شتاب، سرعت و در نهایت جابه‌جایی متناظر این جهت در گام زمانی جاری با استفاده از روابط ۱۸ به دست می‌آیند:

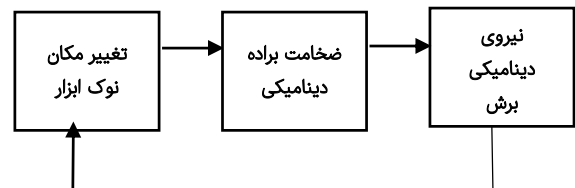
$$\ddot{x}_1 = \ddot{x} + \ddot{x}_1 dt \quad \dot{x}_1 = \dot{x} + \dot{x}_1 dt \quad x_1 = x + \dot{x}_1 dt \quad \ddot{x} = \frac{f_x - c\dot{x} - kx}{m} \quad (18)$$

انتخاب dt به منظور انتگرال‌گیری عددی برای تعیین ارتعاشات نوک ابزار بسیار مهم است. اگر عددی بزرگ گرفته شود باعث به دست آمدن جواب اشتباه خواهد شد. به صورت یک قاعده کلی dt یک دهم دوره تناوب بزرگ‌ترین فرکانس طبیعی سیستم دینامیکی فرض شده است [23]. در اینجا با توجه به اینکه تنها حالت اول به عنوان موثرترین حالت در تعیین دینامیک ابزار انتخاب شده است، فرکانس طبیعی ابزار طبق آزمون مودال ۶۷۴ هرتز است. دوره تناوب فرکانس طبیعی از رابطه ۱۹ محاسبه شده است، بنابراین برای محاسبه dt طبق رابطه ۲۰ مقدار آن  $e^{-4} \times 2/51$  ثانیه لحاظ شده است.

$$\tau = \frac{1}{674} \quad (19)$$

$$dt = \frac{\tau}{10} \quad (20)$$

روش شبیه‌سازی در حوزه زمان که در صدد بیان حلقه ایجاد ارتعاشات بازآزایی است، در محیط سیمولینک متلب قابل پیاده‌سازی است (شکل ۴).

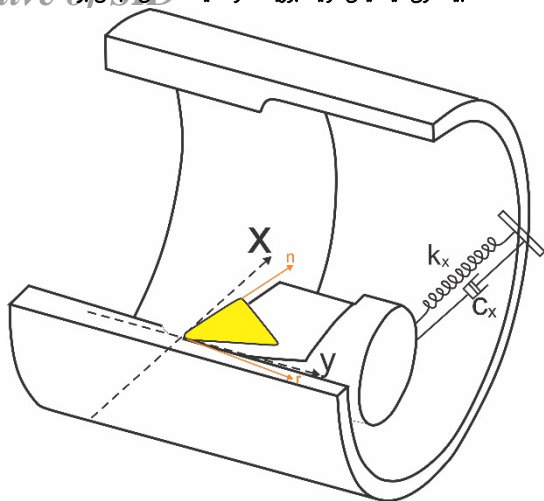


شکل ۴) حلقه ایجاد ارتعاشات بازآزایی

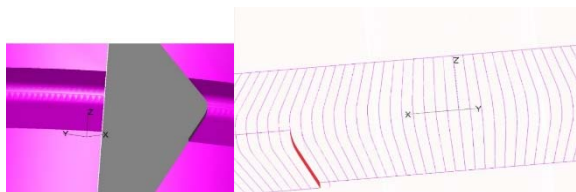
### محاسبه پاسخ‌های زمانی در محیط سیمولینک

شبیه‌سازی پاسخ زمانی سیستم به منظور تعیین پارامترهای متناسب با زمان از قبیل شتاب، سرعت و موقعیت در هر لحظه از حرکت ابزار و همچنین محاسبه نیروهای ماشین‌کاری انجام می‌گیرد. رابطه ۶، معادله ارتعاشی ابزار به صورت یک سیستم ارتعاشی یک درجه آزادی را نشان می‌دهد. پارامترهای جرم، سفتی فنر و میرایی با استفاده از آزمون مودال تجربی توسط روابط ۱ و ۲ محاسبه شده‌اند. محاسبه نیروی برشی حاصل از براده برداری F نیازمند دزنظرگرفتن پدیده بازآزایش و محاسبه ضخامت براده دینامیکی است. ابزار درگیر در قطعه کار همواره در حال تحریک خارجی توسط نیروهای برشی است، این امر تاثیر خود را به صورت تولید یک سطح موج‌دار بر روی سطح قطعه کار به جای می‌گذارد. پدیده بازآزایش موج‌ها حاصل از حرکت ابزار بر روی سطح موجی شکل به وجود آمده از دور قبل براده برداری است. در شکل ۵ پدیده





شکل ۷) سیستم ارتعاشی یک درجه آزادی ابزار داخل تراش



شکل ۸) نمای تداخل ابزار و قطعه‌کار و سطح مقطع براده در هر لحظه

## نتایج

در این قسمت با انجام شبیه‌سازی منطبق با پارامترهای بیان شده در جدول ۲ تغییرات مساحت و سیگنال نیرو در نسبت طول به قطر ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. برای مقایسه بهتر سعی شده است که میانگین مقادیر سیگنال‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. همان طور که در جدول‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود مقدار استاتیکی مساحت براده ۲ و  $3/6$  میلی‌متر مربع به ترتیب برای آزمایش اول و دوم هستند که در طول چند دور شبیه‌سازی حول این عدد تغییرات دینامیکی یکسانی از خود نشان می‌دهند. همچنین مقادیر نیروی استاتیکی تقریباً ۱۹۳ و ۳۴۸ نیوتن هستند و در طول دوره‌های شبیه‌سازی با تغییرات دینامیکی همراه است. در نمودارهای ۶ تا ۹ مقایسه‌ای بین سیگنال‌های شبیه‌سازی در سه دوران چرخنده انجام گرفته است.

جدول ۵) نتایج شبیه‌سازی سیمولینیک

شماره آزمایش	نیروی شعاعی (N)	مساحت براده (mm <sup>2</sup> )
۱	۱۴۱/۱۹۳	$1/9973e-07$
۲	۳۴۷/۵۶	$3/5973e-07$

جدول ۶) نتایج شبیه‌سازی ACIS

شماره آزمایش	نیروی شعاعی (N)	مساحت براده (mm <sup>2</sup> )
۱	۱۹۳/۸۸	$2/011e-07$
۲	۳۴۸/۵۲۴	$3/6373e-07$

## مدل‌سازی هندسی فرآیند

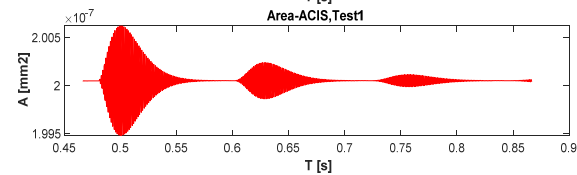
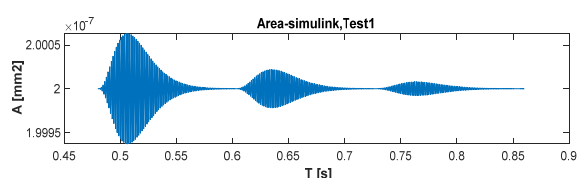
محیط سه‌بعدی ایسیس، یکی از برجسته‌ترین و متداول‌ترین محیط‌های مدل‌سازی سه‌بعدی کامپیوتری است. این روش می‌تواند طیف وسیعی از سطوح ریاضی مانند نریز (NURBS) را پوشش دهد. فرآیند داخل‌تراشی در محیط نرم‌افزار ایسیس، برنامه‌نویسی و به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه تمام پارامترهای مربوط به سینماتیک و دینامیک فرآیند تعریف می‌شوند. پارامترهای سینماتیکی شامل پیش‌روی به‌ازای هر دور، عمق برشی، شعاع لبه نوک ابزار، ابعاد قطعه‌کار، سرعت چرخنده، مسیر ابزار و پارامترهای دینامیکی شامل سفتی استاتیکی، فرکانس طبیعی و ضریب میرایی مربوط به ابزار داخل تراش هستند. مهم‌ترین قسمت در مدل‌سازی‌های دینامیکی فرآیند ماشین‌کاری، محاسبه دقیق مساحت براده دینامیکی در هر لحظه از فرآیند است. در شرایط استاتیکی مساحت براده از ضرب ضخامت در پهنای آن به‌دست می‌آید. در شرایط ارتعاش دینامیکی ابزار و با فرض ارتعاشات در جهت شعاعی و عمود بر لبه برشی، محاسبه سطح مقطع براده کار پیچیده‌ای است چرا که ضخامت براده به‌صورت لحظه‌ای در حال تغییر و نیازمند بررسی موقعیت ارتعاشی در چند دور قبل است. 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 نرم‌افزار ایسیس پیاده‌سازی شود. قطعه‌کار استوانه‌ای به قطر اولیه ۱۲۰ میلی‌متر و تیغچه به‌صورت سه‌گوش با زاویه ۶۰ درجه با در نظر گرفتن شعاع نوک  $0.4$  میلی‌متر مدل‌سازی 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 که در شکل ۷ نشان داده 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 می‌شود و در ادامه مقدار تداخل ابزار با قطعه‌کار استخراج و به‌کمک نرم‌افزار محاسبه می‌شود که در شکل ۸ نمایش داده شده است. بعد از به‌دست‌آوردن سطح مقطع دینامیکی و با داشتن ثابت برشی در جهت مورد نظر، نیروی دینامیکی جهت شعاعی از طریق رابطه ۱۶ قابل محاسبه است. پس از محاسبه نیروها در جهت مورد نظر در هر گام زاویه‌ای، ارتعاشات لحظه‌ای سیستم در جهت متناظر با نیرو به‌کمک روابط ۱۸ که توسط تلاستی (Tlusty) ارایه شده، به‌دست می‌آیند. با انتگرال‌گیری از مقدار شتاب به‌ترتیب سرعت و میزان جابه‌جایی محاسبه می‌شوند. با سوار شدن ارتعاشات به‌دست‌آمده در هر گام روی مسیر سینماتیکی ابزار موقعیت لحظه‌ای لبه برنده قابل محاسبه است.

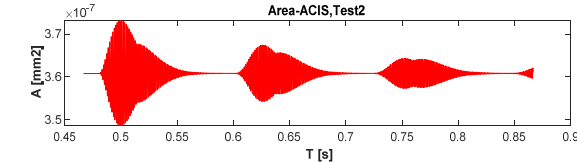
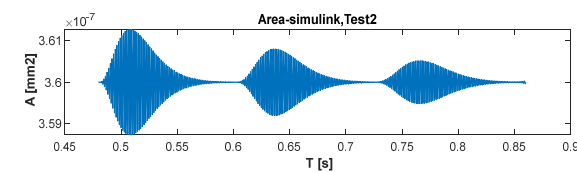
به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی فرآیند در جهت شعاعی با مقادیر متناسب آن در آزمون برش مورد مقایسه قرار گرفتند. بنابراین با تحلیل سیگنال‌های شتاب در آزمایشات می‌توان فرکانس‌های موجود در سیستم را شناسایی کرد. به این منظور از سیگنال‌های شتاب تبدیل سریع فوری گرفته شده و فرکانس‌های متعددی از سیستم استخراج شده است که با گذاشتن فیلتر میان‌گذر باترورت به محدوده فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی ابزار داخل تراش می‌رسیم که در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که شرایط مورد بررسی آزمایشات پایدار است بنابراین تحریک سازه ابزار در محدوده فرکانس طبیعی ابزار در دامنه‌ای بسیار کم رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت ارتعاشی اول بیشترین دامنه را نسبت به بقیه حالت‌ها دارد، بنابراین رفتار ارتعاشی ابزار داخل تراش متأثر از حالت اول است. برای تکمیل صحت‌گذاری در نمودار ۱۱ سعی شده است تا به‌عنوان نمونه سیگنال شبیه‌سازی شتاب در جهت شعاعی حاصل از ایسیس با سیگنال تجربی شتاب شعاعی مقایسه شود. برای مقایسه کمی RMS (که به‌صورت میانگین اختلاف مقادیر سیگنال شتاب از مقدار میانگین محاسبه شده است) سیگنال‌های شتاب شبیه‌سازی و تجربی در جدول ۷ آورده شده است. در آزمایش اول خطای شبیه‌سازی سیمولینک و ایسیس به ترتیب ۲۱/۴ و ۱/۹ و در آزمایش دوم ۲۸ و ۴/۹٪ است. همان‌طور که مشاهده شد خطای شبیه‌سازی روش مدل‌سازی هندسی نسبت به روش سیمولینک بهبود یافته است.

در شبیه‌سازی نیروهای ماشین‌کاری، گام نخست محاسبه دقیق مساحت دینامیکی در هر لحظه است. مدل در نظر گرفته شده برای رسیدن به این هدف، علاوه بر لحاظ کردن رفتار سینماتیکی فرآیند و پارامترهای هندسی از قبیل شعاع نوک لبه برشی قادر به اعمال رفتار دینامیکی سیستم نیز است. در شبیه‌سازی در محیط سیمولینک، ضخامت دینامیکی براده با در نظر گرفتن ارتعاشات چند دور قبل که بر روی تاریخچه سطح اثر می‌گذارند از طریق تقریب ریاضی محاسبه می‌شود. محدودیت این روش عدم لحاظ کردن شعاع نوک لبه برشی است در حالی که در روش مدل‌سازی هندسی علاوه بر لحاظ کردن ارتعاشات چندین دور قبل در محاسبه مساحت براده با بهره‌گیری از اثر هندسه شعاع نوک لبه برشی در شکل هندسی براده و مساحت آن، هندسه درگیر بین ابزار و قطعه‌کار به‌طور دقیق استخراج می‌شود. شکل ۹ هندسه سینماتیکی سطح مقطع براده را در دو روش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل‌سازی هندسی، تقریب دقیق‌تری از سطح مقطع ارائه می‌دهد.

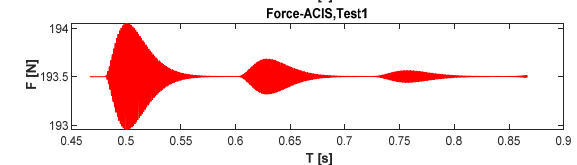
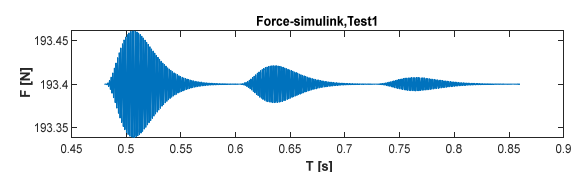
بنابراین محدودیت مدل شبیه‌سازی سیمولینک در تخمین پارامترهای دینامیکی فرآیند (مانند شتاب) در حضور ارتعاشات ناپایدار است چرا که در شرایط برشی ناپایدار اثر شعاع نوک لبه برشی بسیار اهمیت دارد. برتری مدل هندسی ارائه شده در لحاظ کردن شعاع نوک است. در جدول ۸ مقایسه ای بین RMS



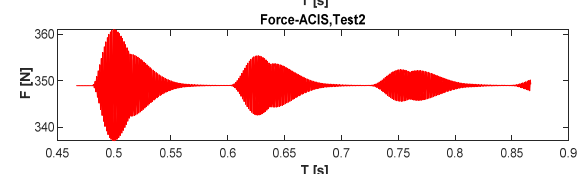
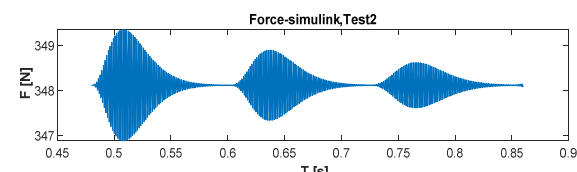
نمودار ۶) منحنی دامنه زمان سیگنال مساحت در آزمون اول



نمودار ۷) مقایسه سیگنال مساحت در آزمون دوم



نمودار ۸) منحنی دامنه زمان سیگنال نیرو در آزمون اول

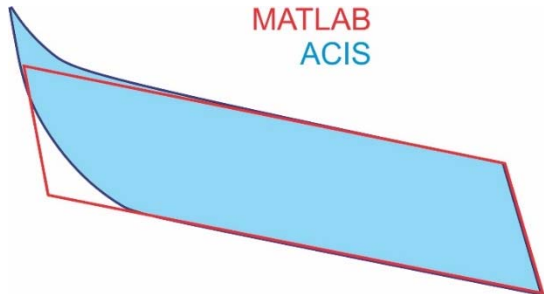


نمودار ۹) منحنی دامنه زمان سیگنال نیرو در آزمون دوم

برای صحت‌گذاری مدل‌های شبیه‌سازی از داده‌های ارتعاشی که در حین عملیات برش توسط شتاب‌سنج جمع‌آوری شده، استفاده شده است. شتاب‌سنج بر روی جهت شعاعی ابزار داخل تراش نصب شده است و در نهایت تبدیل سریع فوری شتاب‌های

جدول (۷) مقایسه مشخصه کمی سیگنال‌های شتاب شبیه‌سازی و تجربی در شرایط برشی پایدار در نسب طول به قطر ۴

پارامتر	عمق برشی (mm)	
	۱	۲
اختلاف از میانگین داده‌های حاصل از سیمولینک	۲/۵۵	۳/۱
اختلاف از میانگین داده‌های حاصل از ACIS	۲/۰۶	۲/۳
اختلاف از میانگین داده‌های تجربی	۲/۱۰	۲/۴۲



شکل (۹) مقایسه شکل هندسه سینماتیکی براده

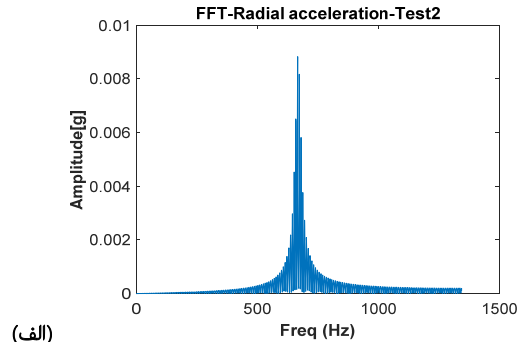
جدول (۸) مقایسه مشخصه کمی سیگنال‌های شتاب شبیه‌سازی و تجربی در شرایط برشی ناپایدار در نسبت طول به قطر ۸

پارامتر	عمق برشی (mm)	
	یک	۲
اختلاف از میانگین داده‌های حاصل از سیمولینک	۹/۶	۱۱/۸
اختلاف از میانگین داده‌های حاصل از ACIS	۶/۱۲	۸/۲۳
اختلاف از میانگین داده‌های تجربی	۶/۵۴	۸/۸۱

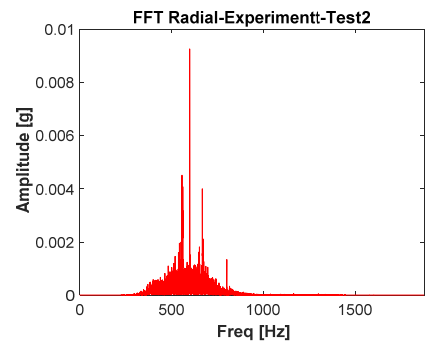
### جمع‌بندی

همان طور که نتایج نشان می‌دهد مدل هندسی با در نظر گرفتن فیزیک واقعی فرآیند با تقریب بسیار خوبی قادر به شبیه‌سازی مساحت و سیگنال شتاب است. به عبارت دیگر در شرایط برشی پایدار تطابق بسیاری خوبی بین پاسخ مدل هندسی ارائه شده و نتایج تجربی وجود داشت و اثر شعاع نوک لبه برشی در شرایط برشی پایدار نامحسوس است. در حالی که محاسبه سطح مقطع براده و به دنبال آن شتاب در شرایطی که ارتعاشات زیاد می‌شود به راحتی امکان‌پذیر نیست و اثر شعاع نوک لبه برشی در حضور ارتعاشات ناپایدار چشمگیر است و وجود این خطا باعث عدم صحت شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین در ادامه از ایسیس جهت محاسبه سطح مقطع براده در شرایط برشی ناپایدار استفاده شد و با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی سیگنال شتاب بود. از آن جا که ارتباط بین ارتعاشات ابزار داخل تراش در شرایط برشی مختلف و سطح ایجاد شده در مطالعه چگونگی اثرگذاری مکانیزم ناپایداری لرزه روی سطح قطعه‌کار از موضوعات مهم در تحقیقات گذشته بوده است از این روش می‌توان جهت مطالعه و مدل‌سازی بافت سطح و بررسی نحوه شکل‌گیری کانال‌های لرزه و تاثیر شعاع نوک لبه برشی روی سطح استفاده نمود. همچنین مدل قابلیت توسعه یافتن به مدل چند درجه آزادی به منظور مطالعه اثرات حالت‌های بالاتر ارتعاشی و تاثیر آن بر روی شبیه‌سازی سطح را

سیگنال‌های شبیه‌سازی حاصل از دو روش شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی آورده شده است. در آزمایش اول خطای شبیه‌سازی سیمولینک و ایسیس به ترتیب ۴۶ و ۶/۴ و در آزمایش دوم ۴۳ و ۶٪/۵۸ است. همان طور که مشاهده شد خطای شبیه‌سازی روش مدل‌سازی هندسی نسبت به روش سیمولینک بهبود یافته است.

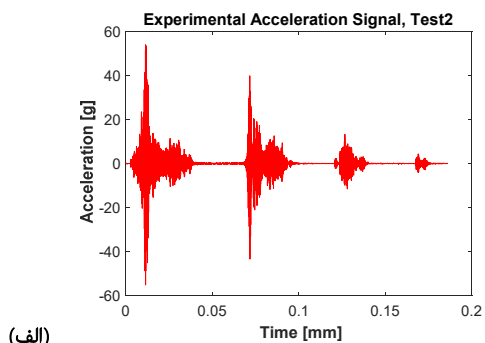


(الف)

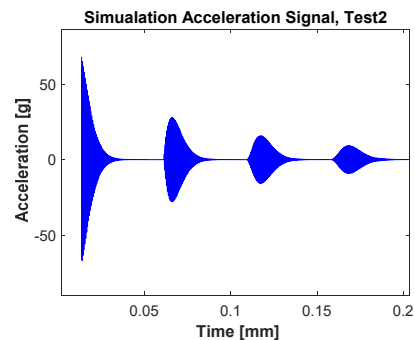


(ب)

نمودار (۱۰) منحنی تبدیل فوریه داده‌های شتاب حاصل از: الف) شبیه‌سازی در محیط ACIS، ب) داده‌های شتاب حاصل از آزمون برش بعد از اعمال فیلتر با عمق برشی ۲ میلی‌متر



(الف)



(ب)

نمودار (۱۱) مقایسه: الف) سیگنال شتاب شعاعی تجربی با، ب) سیگنال شبیه‌سازی ACIS شتاب شعاعی با عمق برشی ۲ میلی‌متر

## علام‌یونانی

$\omega$	متغیر فرکانس (Hz)
$\omega_c$	فرکانس ناپایداری دینامیکی (Hz)
$\omega_n$	فرکانس طبیعی ابزار (Hz)
$\zeta_q$	نسبت میرایی بدون بعد
$\psi$	مولفه ماتریس مودال بدون بعد
$\tau$	دوره تناوب (s)

## منابع

- Zhao G, Cao X, Xiao W, Liu Q, Jun MBG. STEP-NC feature-oriented high-efficient CNC machining simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;106(5):2363-2375.
- Hendriko H. Cut geometry calculation for the semifinish five-axis milling of nonstraight staircase workpieces. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34(1):1301-1311
- Gao G, Baohai W, Dinghua Z, Ming L. Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013;26(3):823-830.
- Altintas Y, Kersting P, Biermann D, Budak E, Denkena B, Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*. 2014;63(2):585-605.
- Sai L, Belguith R, Baili M, Dessein G, Bouzid W. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;34:7-17.
- Du J, Zhi H, Liu P, Bai Y. A novel method of calculating the engagement length of cutting edge in five-axis machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102(9-12):3977-3994.
- Wei ZC, Guo ML, Wang MJ, Li SQ, Liu SX. Prediction of cutting force in five-axis flat-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(1-4):137-152
- Wang W, Li Y, Shen W, Li X, Mou W. An industrial case study of feature-based in-process workpiece modeling. in 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 14-17 October 2012, Seoul, South Korea. Piscataway: IEEE; 2012.
- Joy J, Feng HY. Frame-sliced voxel representation: An accurate and memory-efficient modeling method for workpiece geometry in machining simulation. *Computer-Aided Design*. 2017;88:1-13
- Gong X, Feng HY. Cutter-workpiece engagement determination for general milling using triangle mesh modeling. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2016;3(2):151-160.
- Lee SW, Nestler A. Virtual workpiece: workpiece representation for material removal process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;58(5-8):443-463.
- Inui M, Huang Y, Onozuka H, Umezu N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. 2020;48:520-527.
- Weinert K, Du S, Damm P, Stautner M. Swept volume generation for the simulation of machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44(6):617-628.

دارا است. ویژگی‌های ممتاز این محیط می‌تواند در شبیه‌سازی و مطالعه کیفیت سطح تولیدی مورد استفاده قرار گیرد. به‌گونه‌ای که فرآیند با در نظر گرفتن رفتار ارتعاشی ابزار در محیط نرم‌افزار ایسیس، برنامه‌نویسی و به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌شود. همچنین در محیط شبیه‌سازی می‌توان پدیده‌های غیرخطی دیگر از جمله پرش ابزار و اثرات آن روی سطح را مورد مطالعه قرار داد. همچنین از مدل‌سازی هندسی می‌توان جهت تشخیص نوع ناپایداری بهره برد. در نتیجه ایسیس ابزار قدرت‌مندی جهت مدل‌سازی عملیات ماشین‌کاری است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**سهم نویسندگان:** محمد مهرابی‌نسب (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ بهنام معتکف‌ایمانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

## فهرست علام‌یونانی

## علام‌یونانی

a	عمق برشی (mm)
A	سطح مقطع براده (m <sup>2</sup> )
b	عرض برش (mm)
c <sub>q</sub>	میرایی مودال ابزار (N s/m)
dt	گام زمانی شبیه‌سازی (s)
f <sub>c</sub>	فرکانس ناپایداری دینامیکی (Hz)
f <sub>z</sub>	نرخ پیش‌روی ابزار (mm)
F	نیروی مکانیکی (N)
F <sub>c</sub>	نیروی برش برآیند (N)
h	ضخامت براده برآیند (mm)
h <sub>m</sub>	ضخامت براده استاتیکی (mm)
h <sub>d</sub>	ضخامت براده دینامیکی (mm)
k <sub>q</sub>	سفتی مودال ابزار (N/m)
K <sub>s</sub>	ثابت برشی برآیند (N/mm <sup>2</sup> )
K <sub>e</sub>	ثابت برشی لبه‌ای برآیند (N/mm <sup>2</sup> )
m <sub>q</sub>	جرم مودال ابزار (kg)
L	تعداد نمو های زمانی
n	سرعت دوران چرخنده (rpm)
p	مقدار قله بخش موهومی تابع تبدیل
Q	جابه‌جایی مودال متناظر با مود ارتعاشی (m)
r	متغیر فرکانسی بدون بعد
R	نیروی مودال متناظر با مود ارتعاشی (N)
s	متغیر مختلط فرکانسی (rad <sup>-1</sup> )
t	متغیر زمان (s)
x	تغییر مکان نوک ابزار (mm)
$\dot{x}$	تغییر سرعت نوک ابزار (mm/s)
$\ddot{x}$	تغییر شتاب نوک ابزار (mm/s <sup>2</sup> )

model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three-and five-axis virtual milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;81(5-8):811-823.

20- Aras E, Yip-Hoi D. Geometric modeling of cutter/workpiece engagements in three-axis milling using polyhedral representations. Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2008;8(3):031007.

21- Altintas Y. Manufacturing automation. Cambridge: Cambridge University Press; 2012.

22- Ebrahimi M, Moetakef-Imani B. Dynamic simulation of boring process in time and frequency domain. 9th International Conference on Acoustics and Vibration (ISAV2019), 24-25 December 2019, Tehran, Iran. Tehran: Iranian Acoustics and Vibrations Association; 2019.

23- Schmitz TL, Smith KS. Machining dynamics. Berlin: Springer; 2014.

14- Spence AD, Abrari F, Elbestawi MA. Integrated solid modeller based solutions for machining. Computer-Aided Design. 2000;32(8-9):553-568.

15- Spence A, Altintas Y. A solid modeller based milling process simulation and planning system. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1994;116(1):61-69.

16- Moetakef-Imani B, Elbestawi M. Geometric simulation of ball-end milling operations. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2001;123(2):177-184.

17- Kouravand S, Moetakef-Imani B. Developing a surface roughness model for end-milling of micro-channel. Machining Science and Technology. 2014;18(2):299-321.

18- Lazoglu I, Boz Y, Erdim H. Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces. CIRP annals. 2011;60(1):117-120.

19- Boz Y, Erdim H, Lazoglu I. A comparison of solid