جامعــة دمشق
كليـــة الهندســـة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة التصميم الميكانيكي
ماجستير تصميم وبناء الآلات

تحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التفريز بالاعتماد على تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا

رسالة أُعدت

لنيل درجة الماجستير في تصميم وبناء الآلات

إعداد
المهندس رامي شيخة

إشراف
الدكتور محي الدين الرفاعي

2017

قرار لجنة الحكم:

لجنة الحكم على رسالة الماجستير المشكلة بناءً على قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا بجامعة دمشق رقم /865/ تاريخ 2017/1/16.

نحن أعضاء لجنة الحكم نشهد بأننا قد اطلعنا على رسالة الماجستير: " تحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التفريز بالاعتماد على تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا"

وقد جرت مناقشة الطالب " رامي شيخة " في محتوياتها وفيما له علاقة بها من قبل أعضاء لجنة الحكم وأجيزت بتاريخ 2017/2/28.

تألفت لجنة الحكم على الرسالة من السادة الأساتذة:

الدكتور محمد رشيد شربجي عضواً

الأستاذ في قسم التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق

الدكتور محمد باسل صنوفة عضواً

الأستاذ المساعد في قسم التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق

الدكتور محي الدين الرفاعي عضواً مشرفاً

المدرس في قسم التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق

وقد تم إجراء التعديلات المطلوبة، وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في هندسة تصميم وبناء الآلات. وسلمت بتاريخ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ * خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ * اقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ * الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ * عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ *

(1-5 سورة العلق)

شكر وتقدير:

أشكر الله سبحانه وتعالى وأحمده على توفيقي بإتمام هذا البحث، فله الفضل والمنة، من قبل ومن بعد.

أتوجه بجزيل الشكر إلى السادة أعضاء لجنة الحكم والمناقشة لهذه الرسالة؛ الأستاذ الدكتورمحمد رشيد شربجي، الذي كان لي الشرف أن تتلمذت على يديه، وإني إذ أذكر حميد خصاله وجميل سجاياه، فإني أقدر بشكر وامتنان قبوله الاشتراك في لجنة الحكم على هذه الرسالة وتحمله عناء قراءة هذه الرسالة.

كما أتقدم أيضاً بخالص شكري وامتناني وتقديري للأستاذ الدكتور باسل صنوفة، الذي كان لي الشرف أن تتلمذت على يديه، ولتحمله عناء قراءة هذه الرسالة فله مني الشكر.

وأخص بالشكر الدكتور محي الدين الرفاعي الذي كان لي نعم الأبِ والمعلّمِ والصَّديق والذي أخذ بيدي ولم يبخل عليّ بعلمٍ أو نصيحة، وكانتِ الثّمرةُ هذا العمل.

كما لا يفوتني أن أتقدم بخالص الشكر والعرفان لجميع السادة أعضاء الهيئة التدريسية والهيئة التعليمية، بقسم هندسة التصميم الميكانيكي جامعة دمشق.

إهداء

إلى أجمل ما في الوجود إلى من وقف بجانبي وسار معي خطوة بخطوة

إلى الذين علموني معنى الصمود والتقدم والنهوض من جديد وعدم الاستسلام . .

إلى أبي وأمي

إلى رفيقة حياتي ومنارة دربي دائماً وأبداً . .

أختي الغالية ريم

إلى نصفي الثاني وتوأم روحي . .

أخي الغالي محمد

إلى زملاء العلم ورفاق الطريق في اليس والعسر . .

أصدقائي المخلصين

الفهرس

قرار لجنة الحكم: ..... أ
شكر وتقدير: ..... ب
إهداء ..... ج
فهرس أشكال البحث..... ه
فهرس جداول البحث ..... ز
مسرد مصطلحات البحث ..... ح
تعاريف و رموز ..... ي
ملخص البحث ..... ك
1- الفصل الأول: مقدمة البحث 2
1-1 التمهيد:..... 2
2-1 الإشكالية البحثية 3
3-1 هدف البحث 4
1-3-1 الأهداف الفرعية..... 4
1-2 الاهتزازات التي تظهر أثناء عملية التشغيل..... 6
2-1-1 تمهيد..... 6
2-1-2 أنواع الاهتزازات الميكانيكية 6
2-1-3 الاهتزازات المحرضة ذاتياً 6
2-1-4 ميكانزيم الاهتزازات المحرضة ذاتيا 9
2-2 التشغيل بسرعات عالية..... 11
2-2-1-التشغيل بسرعات عالية 11
2-2-2 تشغيل الأعصاب 12
2-3-منحني الاستقرار 13
2-4 تابع الاستجابة FRF frequency response function..... 14
2-4-1 الحل التحليلي لايجاد تابع الاستجابة 14
2-4-2 إيجاد تابع الاستجابة بالطريقة التجريبية..... 21
1-3 استراتيجيات الحصول على عملية تشغيل مستقرة 25
3-1-1 استراتيجية بعد أو قبل عملية التشغيل 25
3-1-2 استراتيجية تعديل بارامترات القطع أثناء عملية التشغيل..... 27
3-1-3 تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا بشكل غير مباشر..... 28
3-1-4-تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا بشكل مباشر..... 29
1-4 التمهيد..... 33
2-4 نمذجة عملية التفريز الطرفي..... 34
1-5 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً..... 44
5-1-1 الاعتبارات الأساسية في اختيار الحساس لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً..... 44
5-1-2 الحساسات المستخدمة في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً..... 45
2-5 الإجراء التجريبي..... 54
5-2-1 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الليزر 54
5-2-2 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الميكرفون..... 56
1-6 خشونة السطح..... 67
6-1-1 مفهوم خشونة السطح..... 67
6-1-2 تشكل الخشونة نتيجة عملية التفريز..... 70

6-1-3الطرق المستخدمة في التنبؤ بخشونة السطح 71
6-2 طريقة تاكوشي مع تحليل التباين 74
6-2-1 طريقة تاكوشي..... 74
6-2-2 تحليل التباين 76
6-2-3 طريقة استجابة السطح 77
6-3 الإجراء التجريبي.....78
7-الفصل السابع: المخرجات البحثية "النتائج والتوصيات".....97
7-1 نتائج الدراسة.....97
7-2 توصيات الدراسة.....98
المصادر والمراجع: 99
الملاحق:.....106
الملحق 1: نظرية القطع وأنواع عملية التفريز.....106
1-1 نظرية القطع 106
1-2 عملية التفريز.....110
الملحق 2: نظرية الرواسب ومثال عددي يبين كيف يمكن الاستفادة من تابع الاستجابة 112
2-1 نظرية الرواسب 112
2-1-1 شكل تابع الاستجابة في حال تركيبة بدرجة حرية واحدة 112
2-1-2 شكل تابع الاستجابة في حال تركيبة متعددة درجات الحرية 112
2-2 مثال عددي 113

فهرس أشكال البحث

شكل 2-1: يبين الفرق في جودة السطح المشغل في حال حدوث اهتزازات محرضة ذاتياً(b) من عدمه(a) **..... 8**
شكل 2-2: يظهر عدد الأبحاث التي تطرقت لظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا **..... 8**
شكل 2-3: يبين ترتيب الباحثين في ظاهرة الاهتزازات المرضة ذاتيا بحسب عدد المقالات المنشورة **..... 9**
شكل 2-4: يبين تأثير زاوية فرق الطور بين مسارين متتاليين على سماكة الرايش**..... 10**
شكل 2-5: تحديد مجال سرعات التشغيل التي يصبح فيها التشغيل بسرعات عالية **..... 12**
شكل 2-6: مشغولة ذات سطوح رقيقة**..... 12**
شكل 2-7: منحني الاستقرار **..... 13**
شكل 2-8: النموذج الديناميكي ذو درجة حرية واحدة **..... 14**
شكل 2-9: الاهتزازات الحرة **..... 14**
شكل 2-10: يبين طرق التقريب من تابع المستمر الى المجزأ **..... 17**
شكل 2-11: تابع الاستجابة لتركيبة من درجة حرية واحدة وفق طريقتين الأولى المطال وزاوية الطور والثانية الجزء الحقيقي والتخيلي **..... 19**
شكل 2-12: يبين تابع الاستجابة وفق الاحداثيات القطبية لتركيبة من درجة حرية واحدة**..... 20**
شكل 2-13: يبين الطريقة التجريبية لإيجاد تابع التحويل**..... 22**
شكل 2-14: يبين المخطط الذي يرسمه كل من حساس القوة وحساس التسارع والمخطط الانسيابي لمعالجة الإشارات للحصول على تابع الاستجابة **..... 22**
شكل 3-1: يبين استراتيجيات الحصول على عملية تشغيل مستقرة **..... 26**
شكل 3-2: استخدام أداة قطع ذات خطوة متغيرة b، زاوية حلزنة متغيرة c **..... 29**

شكل 3-3: يبين أشكال تغيير السرعة المثاثي أوالمنشاري والجيبي. **30**
شكل 1-4: الموديل (النموذج) الديناميكي لعملية التفريز على افتراض درجتان حرية **34**
شكل2 -4: سماكة الرايش الديناميكية (الحقيقية). **34**
شكل 3-4: سماكة الرايش الاستاتيكية لتفريز طرفي ويبين زوايا الدخول والخروج **35**
شكل 4-4: يبين kعدد أمواج الاهتزازية المطبوعة على سطح القطع والاستفادة منه في رسم منحني الاستقرار **42**
شكل 1-5: أداة القطع في حال التفريز الوجهي والطرفي **44**
شكل 2-5: يبين أماكن تموضع بعض الحساسات **45**
شكل 3-5: حساس قوى القطع وأنواعه **46**
شكل 4-5: حساس تسارع بيزوالكتريك **47**
شكل 5-5: مبدأ حساس التسارع بالاعتماد على الليزر **48**
شكل 6-5: مبدأ حساب التسارع بالاعتماد على الأمواج فوق صوتية. **49**
شكل 7-5: يُظهر طرق العزل **50**
شكل 8-5: يبين الطريقة التي تعتمد على مطال الاستجابة **52**
شكل 9-5: يبين مقدار إزاحة أداة القطع **52**
شكل 10-5: يبين الطريقة التي تعتمد على مكونات التردد **52**
شكل 11-5: يبين الطريقة الإحصائية **53**
شكل 12-5: الطريقة الضوئية لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً **55**
شكل 13-5: يبين الطريقة الصوتية في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً **56**
شكل 14-5: يبين التسجيل الصوتي قبل اجراء تحويل فورييه **57**
شكل 15-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي باستخدام برنامج Labview **59**
شكل 16-5: يبين خطوات رسم منحني الاستقرار باستخدام طريقة خريطة الصوت **60**
شكل 17-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة 5000 دورة في الدقيقة وبدون عملية تفريز **61**
شكل 18-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 5000 دورة في الدقيقة وعمق قطع 0.5 مم.... **61**
شكل 19-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 3000 دورة في الدقيقة وبدون عملية التفريز ... **62**
شكل 20-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 3000 دورة في الدقيقة وعمق قطع 2.5 مم.... **63**
شكل 21-5: يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 5000 دورة في الدقيقة وعمق قطع 4.5 مم.... **63**
شكل 22-5: منحني الاستقرار التجريبي **64**
شكل 23-5: يبين تخميد الاهتزازات المحرضة ذاتياً أثناء التشغيل بالاعتماد على تعديل السرعة **64**
شكل 24-5: يبين مجال قيم الخشونة الناتجة وفق كل عملية تشغيل **65**
شكل 1-6: يبين مفهوم الخشونة والفرق بين السطح الحقيقي والاسمي. **67**
شكل 2-6: يبين تضاريس سطح التشغيل ورموز الاتجاه **68**
شكل 3-6: تعبير يمثل قيم الخشونة **68**
شكل 4-6: يبين الخشونة R_a **69**
شكل 5-6: يبين الخشونة R_z **69**
شكل 6-6: يبين الخشونة R_v **70**
شكل 7-6: علاقة الأبعاد الهندسية لأداة القطع في توليد السطح **70**
شكل 8-6: يُظهر مخطط السمكة (السبب-التأثير) لخشونة السطح في عملية التفريز **71**
شكل 9-6: الطرق لمستخدمة في التنبؤ بالخشونة **73**
شكل 10-6: جهاز قياس الخشونة **79**
شكل 11-6: طريقة تاكوشي CNC Ra **80**
شكل 12-6: طريقة تاكوشي CNC Rz **81**
شكل 13-6: طريقة تاكوشي CNC Rv **82**
شكل 14-6: يظهر قيم الخشونة Ra لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات **85**
شكل 15-6: يظهر قيم الخشونة Rz لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات **86**
شكل 16-6: يظهر قيم الخشونة Rv لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات **86**
شكل 17-6: طريقة تاكوشي Ra للفارزة التقليدية **88**
شكل 18-6: طريقة تاكوشي Rz للفارزة التقليدية **89**

شكل 6-19: طريقة تاكوشي Rv للفارزة التقليدية **90**
شكل 6-20: يظهر قيم الخشونة Ra لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات **94**
شكل 6-21: يظهر قيم الخشونة Rz لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات..... **94**
شكل 6-22: يظهر قيم الخشونة Rv لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات..... **95**
شكل(1): يبين أ-القطع العامودي orthogonal ب-القطع المائل oblique..... **106**
شكل(2): يبين الظواهر الفيزيائية المتشكلة في منطقة القص **107**
شكل(3): يبين توزع قوة القطع في كل منطقة من مناطق القص الثلاثة وفق نموذج Merchant..... **108**
شكل(4): يبين أنواع التفريز الرئيسية أ-تفريز محيطي ب-تفريز وجهي أو طرفي **110**
شكل(5): أنواع التفريز بحسب طريقة التشغيل. **111**
شكل(1)": أبعاد الجائز ونتائج تجربة المطرقة الاهتزازية-حساس التسارع..... **114**

فهرس جداول البحث

جدول 1-2: طرق التقريب من تابع المستمر الى المجزأ **17**
جدول 1-6: المصفوفات العامودية القياسية المستخدمة في طريقة تاكوشي..... **75**
جدول 2-6: يُظهر معاملات التحكم ومستوياتها **78**
جدول 3-6: يُظهر قيم S/N لقيم الخشونة (نتائج التجارب المنفذة) وفق مصفوفة L9 للحالة المدروسة **79**
جدول 4-6: طريقة تاكوشي CNC Ra **80**
جدول 5-6: طريقة تاكوشي CNC Rz **81**
جدول 6-6: طريقة تاكوشي CNC Rv **82**
جدول 7-6: يظهر تحليل التباين لـ CNC Ra **83**
جدول 8-6: يظهر تحليل التباين لـ CNC Rz **84**
جدول 9-6: يظهر تحليل التباين لـ CNC Rv **84**
جدول 10-6: يُظهر معاملات التحكم ومستوياتها للفارزة التقليدية **87**
جدول 11-6: يُظهر قيم S/N لقيم الخشونة (نتائج التجارب المنفذة) وفق مصفوفة L9 للحالة المدروسة **88**
جدول 12-6: طريقة تاكوشي Ra للفارزة التقليدية..... **88**
جدول 13-6: طريقة تاكوشي Rz للفارزة التقليدية..... **89**
جدول 14-6: طريقة تاكوشي Rv للفارزة التقليدية..... **90**
جدول 15-6: يظهر تحليل التباين لـ Ra للفارزة التقليدية..... **91**
جدول 16-6: يظهر تحليل التباين لـ Rz للفارزة التقليدية..... **92**
جدول 17-6: يظهر تحليل التباين لـ Rv للفارزة التقليدية..... **92**

مسرد مصطلحات البحث:

معدل توليد السطوح	surface generation rate	الاهتزازات المحرضة ذاتياً في آلات التشغيل	chatter
معدل إزالة الرايش	material removal rate	الكشف	detecting
تقنية التجزئة الرقمية	discrete numerical technique	التمييز	Identify
محلل فورييه	Fourier analyzer	تجنب	avoiding
طيف فورييه	fourier spectrum	منع	preventing
تردد مرور أداة القطع	passing tooth frequency	إنقاص	reducing
تجارب الحصول على تابع الاستجابة	Modal testing	التحكم	controlling
هزاز	shaker	تخميد	suppressing
المطرقة الاهتزازية	impact hammer	الاهتزازات الحرة	free vibration
تعديل بارامترات التشغيل	Using the lobbing effect	الاهتزازات القسرية	forced vibration
تغيير السلوك الديناميكي للتركيبة	Changing the system behavior	الاهتزازات المحرضة ذاتياً	self-excited vibration
استراتيجية التحكم أثناء عملية التشغيل	In-process strategies	طريقة الحل الصفري	zeroth order ZOA approximation
استراتيجية التحكم خارج عملية التشغيل	Out-of-strategies	التأثير المتبادل	mode coupling chatter
استراتيجية التحكم بشكل مباشر	active strategies	الاهتزازات بتأثير إعادة تموج السطح	regenerative chatter
استراتيجية التحكم بشكل غير مباشر	passive strategies	الاهتزازات بتأثير الاحتكاك	Frictional chatter
مخمد الاحتكاك	friction damper	الاهتزازات بتأثيرات الميكانيكية الحرارية	Thermo-mechanical chatter
مخمد الكتلة	mass damper	سطح الجرف لأداة القطع	rake
مخمد	tuned damper	سطح التماس أو الخلوص لأداة لقطع	clearance(flank)
مخمد صدمي	impact damper	زاوية الجرف	angle rake
خطوة متغيرة	variable pitch	منحني الاستقرار التنبؤي	stability lobes diagram
زاوية حلزنة متغيرة	variable helix	التشغيل بسرعات عالية	high speed milling or machining HSM
مقدار الدخول القطري	radial immersion	طرق التشغيل بإزالة الرايش	metal removal
قيم حل المعادلة	eigenvalue	الالتصاق	adhesion

مجال التردد	frequency bandwidth	انتشار المادة	diffusion
التفريز االطرفي	end-mills	التحولات الطورية في مادة التركيبة	phase transformations
التفريز الوجهي	face-mills	تشوهات لدنة-مرنة	elasto-plastic deformation
الحساسية	Sensitivity	تولد حرارة	heat generation
نسبة الخطأ	S/N signal/noise	منطقة القص الأولي	Primary shear zone
مقياس القوى المركب على طاولة	dynamometric table	منطقة القص الثانوي	Secondary shear zone
مقياس القوى المتوضع على عامود الدوران	rotating dynamometer	منطقة القص الثالثة	Tertiary zone
حساس التسارع	Accelerometer sensor	تشوهات لدنة	plastic deformation
شكل الاهتزاز	Mode Shape	الاحتكاك	Friction
ميكرفون	microphone	عملية التفريز	milling operation
عمود الدوران الرئيسي	spindle	التفريز الهابط	down climb
ضجيج الآلة المرجعي	machine's background noise	التفريز الصاعد	UP
طريقة فصل الإشارة الصوتية	Isolation methods	نمذجة التفريز الطرفي	end milling model
طريقة تخميد الإشارات الصوتية	Absorption method	الحد القاطع لأداة القطع	Flute
طريقة جمع الإشارة الصوتية	method Collection	الخطوة الزاوية	pitch angles
طريقة شدة الصوت	intensity method	تابع التحويل(الاستجابة)	transfer functions matrix
بولي يوريتان الرغوي	polyurethane foam	مجال التردد	frequency domain
طريقة مجال الزمن	time domain	التوابع التوافقية	harmonic functions
طرق التي تعتمد على مستوى الصوت	Level-based methods	طور التأخير	phase delay

تعاريف و رموز :

الرمز	التعريف	الوحدة	الرمز	التعريف	الوحدة
α_{xx}	معامل القطع الاتجاهي بالنسبة للمحور x	N/m	m	الكتلة	kg
α_{xy}	معامل القطع الاتجاهي المختلط	N/m	k	معامل صلابة النابض	N/m
α_{yy}	معامل القطع الاتجاهي بالنسبة للمحور y	N/m	c	التخميد	N.s/m
Φ_{xy}	تابع الاستجابة المختلط	N/m	ζ	معامل التخميد	
Φ_{yy}	تابع الاستجابة بالنسبة للمحور y	N/m	ω_n	التردد الذاتي	Hz
Φ_{xx}	تابع الاستجابة بالنسبة للمحور x	N/m	ω_d	التردد المحرض	Hz
a_{lim}	عمق القطع الحدي	m	x_{st}	الازاحة الاستاتيكية	mm
ϵ	زاوية الطور بين التموجات	rad	x_0	الازاحة الابتدائية	mm
K	عدد الأمواج		F	القوة المحرضة	N
Λ	معامل مساعد		s	معامل لابلاس	
Λ_R	الجزء الحقيقي من المعامل مساعد (القيمة الذاتية)		$\boldsymbol{\phi}$	زاوية الطور	rad
Λ_1	الجزء التخيلي من المعامل مساعد (القيمة الذاتية)		Φ	تابع الاستجابة	N/m
$\boldsymbol{R_a}$	الخشونة	μm	r	نسبة الترددات	
$\boldsymbol{R_v}$	الخشونة	μm	$G(\omega)$	الجزء الحقيقي من تابع الاستجابة	N/m
$\boldsymbol{R_z}$	الخشونة	μm	$H(\omega)$	الجزء التخيلي من تابع الاستجابة	N/m
S/N	نسبة الخطأ		R	نصف قطر أداة القطع	mm
S	التباين		x	محور الاحداثيات	mm
μ	المتوسط الحسابي		y	محور الاحداثيات	mm
SS_T	مجموع التربيعات الكلي		υ_j	الازاحة اللحظية	mm
SS_E	مجموع التربيعات للخطأ		Ω	سرعة الدوران	rad/s
SS_p	مجموع التربيعات للمعاملات		h	سماكة الرايش	mm
DOF_P	درجة الحرية للبارامتر		$g(\emptyset_j)$	تابع الخطوة	
DOF	درجة الحرية الكلية		$\emptyset_{ex}$	زاوية الخروج لأداة القطع	rad
F_c	قوة القطع	N	$\emptyset_{st}$	زاوية الدخول لأداة القطع	rad
Φ	تابع الاستجابة	N/m	K_t	معامل القطع المماسي	N/m
α	زاوية الجرف	rad	K_{te}	معامل القطع المماسي بالنسبة لحافة أداة القطع	N/m
τ	زاوية الاحتكاك	rad	K_r	معامل القطع القطري	N/m
A_s	مساحة مقطع القص	m^2	K_a	معامل القطع المحوري	N/m
σ_s	اجهاد القص	Pa	K_{re}	معامل القطع القطري بالنسبة لحافة أداة القطع	N/m
$\emptyset_p$	الخطوة الزاوية	rad	K_{ae}	معامل القطع المحوري بالنسبة لحافة أداة القطع	N/m
F_y	قوة القطع بالاتجاه y	N	F_t	قوة القطع المماسي	N
F_x	قوة القطع بالاتجاه x	N	F_r	قوة القطع القطري	N
v	سرعة القطع	m/s	F_a	قوة القطع المحوري	N
f	التغذية	mm/min	a	عمق القطع	mm

ملخص البحث:

هذا البحث بعنوان تحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التفريز بالاعتماد على تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتياً ويهدف هذا البحث إلى الحصول على عملية تشغيل مستقرة بدون حدوث اهتزازات المحرضة ذاتياً وذلك من خلال تحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التشغيل.

تكمن الإشكالية البحثية لهذه الدراسة أنه أثناء عملية التشغيل تنشأ بين أداة القطع والمشغولة اهتزازات، مما يؤدي إلى فقدان الثبات ونشوء اهتزازات محرضة ذاتيا، مما ينتج عن ذلك عدم دقة بالأبعاد وسطح سيء (خشونة عالية) وكما ينتج عن هذه الاهتزازات نقص في عمر أداة القطع.

وقد استعرض الطالب المجالات البحثية ذات الصلة، بهدف التعرف على الطرق والسبل المختلفة للباحثين السابقين في التعامل مع مشكلة البحث، كما وجد الطالب نقص في الدراسات التي تتناول مجال الاهتزازات التي تنشأ أثناء عملية التشغيل من حيث كيفية التحكم بها أو تخميدها من جهة ومعرفة أسباب تشكلها من جهة أخرى على مستوى الجامعات السورية بشكل خاص والعربية بشكل عام. بينما رصد الطالب اهتماما متزايدا بدراسة الاهتزازات التي تنشأ أثناء عملية التشغيل على كلا المستويين الإقليمي والعالمي.

قام الطالب بمحاولة الربط بين مختلف المجالات التي يمكن أن تساهم في إيجاد حل متكامل لمشكلة الاهتزازات المحرضة ذاتياً في عمليات التشغيل، تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في اقتراح حلول عملية، تساعد في إيجاد حل لهذه المشكلة التي تؤدي الى تدهور العملية الانتاجية، من خلال استخدام ميكرفون لكشف هذه الاهتزازات ومن خلال قياس الخشونة باعتبارها أحد أهم نتائج هذه الاهتزازات.

يتكون هذا البحث من مقدمة عامة في الفصل الأول:

الفصل الثاني تناول المفاهيم الأساسية لنظرية الاهتزازات المحرضة ذاتياً.

الفصل الثالث دراسة الإطار المرجعي بحيث تم استعراض الأبحاث السابقة التي تناولت هذه المشكلة.

في الفصل الرابع تناول الباحث الدراسة التحليلية للحالة المعتبرة وإيجاد منحني الاستقرار التنبؤي.

الفصل الخامس الذي تم فيه استخدام الميكرفون في كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً.

الفصل السادس إلى استخدام طريقة تاكوشي وتحليل التباين للوصول الى القيم المثلى لبارامترات التشغيل بالاعتماد على قيم الخشونة.

الفصل السابع تم وضع توصيات بناءً على الحالة المدروسة.

الفصل الأول:

مقدمة البحث

1- الفصل الأول: مقدمة البحث

1-1 التمهيد:

يتحدث هذا البحث عن الحصول على البارامترات المثلى لبارامترات عملية التشغيل من خلال منحني الاستقرار الذي يتم الوصول اليه بطريقة تحليلية وبطريقة تجريبية، ومن خلال أيضاً استخدام طرق اتخاذ القرار لتحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التشغيل وسيتم ذلك من خلال الدراسة النظرية لمختلف الاتجاهات المتعلقة بموضوع البحث.

لابد للنهوض بالمستوى البحثي من دعم وتشجيع التصنيع الداخلي وربط الجامعة بالمجتمع لما لذلك من فائدة تعود على الوطن والمواطن وقلة الاعتماد على الغير وربط مصيرنا بالخارج.

تعتبر دراسة آلات التشغيل أولى هذه الخطوات لأنها تعتبر اللبنة الأولى في الصناعة، ومن هنا كان لابد من دراسة إحدى العمليات التصنيع التي تعتمد على مبدأ إزالة الرايش ولتكن عملية التفريز.
يُقصد بعمليات التي تعتمد على تقنية ازالة الرايش مثل التفريز والخراطة والتثقيب والجلخ.... الخ، والتي تشكل أكثر من 90 بالمئة من عمليات التصنيع الأخرى مثل السكب.
أدى التطور الكبير في عمليات التشغيل بالتزامن مع تطور العلوم الأخرى مثل (المعالجة الحرارية، تلبيس المعادن، المواد المركبة، صناعة أدوات القطع، الأدوات والتجهيزات والمثبتات الميكانيكية، القياسات والحواسيب ومعالجة الاشارة والحساسات والتحكم الآلي) مما أدى الى الحصول على آلات التشغيل ذات مرونة عالية في الإنتاج لما تقدمه من حلول تكنولوجية تزيد المرونة والدقة والانتاجية والجودة العالية للمنتجات بهدف الوصول الى أعلى المستويات التقنية.
كان لتصنيع الآلات المبرمجة CNC دور بارز في زيادة الإنتاجية. يوجد عوامل عدة تؤدي الى الحد من مقدرة عمليات التشغيل بإزالة الرايش ولا تؤدي الى الحصول على منتج ذو جودة عالية من حيث (الدقة، الاستقامة، الخشونة) وبأعلى انتاجية من حيث الزمن والكلفة، من هذه العوامل (الاهتزازات، تأكل أداة القطع). يمكن الحد من مشكلة تأكل أداة القطع وذلك بتصنيع أدوات قطع من مواد مقاومة للتأكل (ذات قساوة عالية) ولكن الاهتزازات التي تحدث أثناء التشغيل لا بد من دراستها بشكل مفصل لمعرفة ما هي أسباب نشوؤها وكيفية تجنبها، حيث تؤدي الى فشل العملية الإنتاجية وضرر بالغ على الآلة وجميع مكوناتها.

يعتبر إيجاد البارامترات المثلى (نقطة التشغيل المثلى) أي البارامترات التي تحقق أعلى مستويات الإنتاجية مع الحفاظ على جودة المنتج؛ بمعنى أخر بدون اهتزازات محرضة ذاتياً، أمر ذو أهمية اقتصادية عالية من خلال زيادة كمية الإنتاج وتخفيض الوقت اللازم للحصول على المنتجات من جهة، ومن جهة أخرى الحفاظ على الطاقة والمادة من خلال استهلاك الحد الأدنى من الطاقة والتوفير في المادة، من خلال عدم انتاج منتجات مرفوضة والحفاظ على أدوات الإنتاج، لذلك قام الطالب باستخدام طريقة إحصائية للوصول الى هذه النقطة.

2-1 الإشكالية البحثية:

لوحظ أن الاهتزازات التي تحدث أثناء عمليات التشغيل تؤثر على الجودة والإنتاجية، هذه الملاحظة دفعت الباحث إلى البحث عن الاهتزازات المحرضة ذاتياً المتشكلة في عمليات التشغيل من حيث تعريفها وأسبابها وكيف يتم كشفها، معرفتها، تجنبها، منع حدوثها، إنقاصها، التحكم بها، تخميدها.

إذاً الإشكالية البحثية لهذه الدراسة هي الاهتزازات المحرضة ذاتياً المتشكلة في عمليات التشغيل، التي تؤدي إلى:

- جودة سطح منخفضة.
- دقة غير مقبولة.
- ضجيج زائد.
- ضرر آلة التشغيل.
- تأكل أداة القطع.
- انخفاض معدل إزالة الرايش (MRR material removal rate)
- خسارة الطاقة والمادة بسبب المنتجات التالفة الناتجة عن الاهتزازات.

1-2-1 أسلوب تناول المشكلة

تم دراسة الاهتزازات المحرضة ذاتياً المتشكلة أثناء عملية التفريز وذلك من خلال إيجاد منحني الاستقرار التوقعي أو التنبؤي والتجريبي من جهة والاستفادة من الخشونة الناتجة عن عملية التشغيل؛ باعتبارها مؤشر على حدوث الاهتزازات المحرضة ذاتياً من جهة أخرى، في تحديد القيم المثلى لبارامترات عملية التشغيل بالاعتماد على الطرق الإحصائية.

2-2-1 أهمية البحث:

إنّ عدم وجود معطيات كافية لاختيار نظام التفريز الأمثل في الصناعات المحلية، واعتمادها على معدلات قطع محافظة لتجنب الاهتزازات المحرضة ذاتياً، فكان لابد من دراسة موسعة لهذه العملية بحيث يتم الحصول على نقطة التشغيل المثلى التي تحقق رفع كمية الإنتاج وبدون حدوث اهتزازات محرضة ذاتياً.

3-1 هدف البحث:

الهدف الرئيسي هو الحصول على عملية تشغيل مستقرة بدون اهتزازات محرضة ذاتياً.

1-3-1 الأهداف الفرعية:

- معرفة أسباب نشوء ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتياً والعوامل المؤثرة فيها وذلك من أجل محاولة التحكم بها والحد منها أو تخميدها.
- دراسة المفاهيم المتعلقة بهذه الظاهرة (منحني الاستقرار-تابع الاستجابة).
- إيجاد منحني الاستقرار التنبؤي بطريقة تحليلية للحالة المدروسة.
- كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام تقنية الميكرفون.
- إيجاد منحني الاستقرار بطريقة تجريبية.
- إيجاد البارامترات المثلى لمجال معين من هذه البارامترات باستخدام الطرق الإحصائية (تاكوشي، تحليل التباين، استجابة السطح).
- إيجاد معادلة الخشونة بطريقة تجريبية بدلالة بارامترات عملية التشغيل.

الفصل الثاني:

الاهتزازات المحرضة ذاتياً في عمليات التشغيل

2-1 الاهتزازات التي تظهر أثناء عملية التشغيل:

2-1-1 تمهيد:

إن أول بحث عن تأثير الاهتزازات على آلات التشغيل ظهر في بداية القرن العشرين نتيجة للتطور في آلات التشغيل، حيث أنه ازدادت مقدرة آلات التشغيل وظهرت تحديات جديدة ومن هذه التحديات الاهتزازات.

تنشأ الاهتزازات في عمليات التشغيل بسبب كون الآلات والتركيبات ليست أجسام (جاسئة) صلدة تماما، وإنما تحتوي على عناصر مرنة، تستجيب للقوى الخارجية والداخلية بانحرافات متناهية في الصغر، مما يؤدي الى حدوث حركة نسبية بينها وبالتالي زيادة القوى الداخلية. بسبب هذه القوى تتحرك الآلية أو التركيبة، وهذا ما تدعى (الديناميك والاهتزازات) [1].

2-1-2 أنواع الاهتزازات الميكانيكية:

تحدث في عمليات التشغيل التي تعتمد على ازالة الرايش ثلاث أنواع مختلفة من الاهتزازات الميكانيكية. وهي الاهتزازات الحرة، الاهتزازات القسرية، الاهتزازات المحرضة ذاتيا[2].

2-1-2-1 الاهتزازات الحرة: تحصل هذه الاهتزازات عندما ينزاح النظام الميكانيكي عن وضع توازنه ويُسمح له أن يهتز بشكل حر، تحدث هذه الاهتزازات في عمليات التشغيل التي تعتمد على ازالة الرايش على سبيل المثال كنتيجة للتعريف الغير صحيح لمسار أداة القطع الأمر الذي يؤدي إلى تصادم بين أداة القطع والمشغولة.

2-1-2-2 الاهتزازات القسرية: تنشأ هذه الاهتزازات بسبب التحريض الخارجي أثناء عملية التفريز، المصدر الرئيسي للاهتزازات القسرية هو الدخول والخروج الدوري لأداة القطع وأما المصادر الأخرى مرتبطة بعدة أمور منها على سبيل المثال (الاهتزازات الناتجة عن كون التركيبة غير متوازنة ديناميكياً أو الاهتزازات التي تنتقل عبر الأساسات من آلات التشغيل الأخرى المجاورة لألة التشغيل المدروسة).

يمكن تجنب الاهتزازات الحرة والقسرية أو إنقاصها أو تخميدها بمعرفة أسبابها، والمهندسون قد طوروا أساليب كثيرة من أجل تخفيف أو تخميد هذه الاهتزازات.

2-1-2-3 الاهتزازات المحرضة ذاتيا: هذا النوع من الاهتزازات يجعل التركيبة غير مستقرة لذلك تُعد هذه الاهتزازات غير مرغوب بها، كما أنّ امكانية التحكم بها صعبة لذلك تعتبر من أكثر المواضيع تداولا في المقالات العلمية.

2-1-3 الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

قد تحدث أثناء عملية التشغيل اهتزازات تُدعى الاهتزازات المحرضة ذاتيا وتؤدي بشكل رئيسي الى عدم دقة بالأبعاد وسطح سيء (خشونة عالية) كما هو مبين في الشكل(2-1)، كما ينتج عنها نقص عمر أداة القطع مما يتطلب استخدام أدوات قطع ذات مقاومة تآكل عالية (غالية الثمن)، إن

أول تصور وُضع لهذه الاهتزازات المحرضة ذاتياً كان مبكراً في عام 1907 من قبل تايلور حيث عرف الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

"الاهتزازات المحرضة ذاتيا هي من أكثر الأشياء غموضا التي تواجه المشغل"[3].

بقيت هذه الاهتزازات غير معروفة حتى عام 1961 حيث قام Tobias بدارسة هذه الظاهرة من خلال معرفة أسباب نشوئها والعوامل المؤثرة فيها [5]، وثم جاء Fishwick، Tlusty، Polacek حيث تم بواسطتهم معرفة ألية اعادة توليد الأمواج على سطح المشغولة (السبب الرئيسي للاهتزازات) وطوروا النموذج الرياضي المعبر عن هذه الاهتزازات على شكل معادلات التفاضلية المتأخرة. قدم Merrit نموذج بتغذية عكسية على شكل حلقة مغلقة (المخطط الصندوقي) لكل من المواصفات الديناميكية وبارامترات التشغيل [7]، تُعد طريقة الحل التقريبي للمعادلات التفاضلية المعبرة عن هذه الاهتزازاتZOA (zeroth order approximation)التي استخدمها كل من Altintas and Budak ونشرا بحثهما الذي يعتبر أهم بحث نشر يتحدث عن ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا تم ذكر هذه الطريقة بالتفصيل في الحل التحليلي من الاطروحة[6].

تعتبر هذه الظاهرة إلى الأن مادة هامة جدا في مجالات البحث كما يبينه الشكل (2-2)، حيث يبين عدد الأبحاث التي تحدثت عن الاهتزازات المحرضة ذاتيا كعنوان للبحث أو ككلمات دلالية، حيث جُمعت هذه البيانات من كبرى المجلات التي تختص بنشر المقالات العلمية من عام 1966 حتى عام 2009، يُلاحظ من الشكل البياني مدى الاهتمام المتزايد بهذه الظاهرة. أهم الباحثين الذين قاموا بدراسة هذه الظاهرة وعدد النشرات لكل باحث مبين في الشكل (2-3) [4].

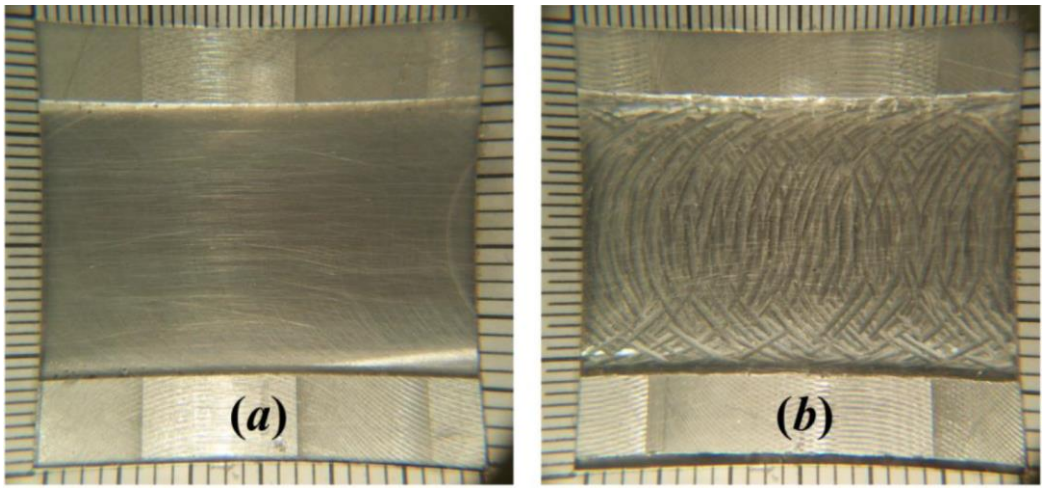
قام الباحثون بشكل عام بدراسة هذه الظاهرة وفق ما يلي: كيف يتم اكتشافها، كيف يتم تميزها، تجنبها، منعها، الإنقاص منها، التحكم بها، تخميدها. تحدث هذه الظاهرة في معظم عمليات التشغيل بإزالة الرايش: التفريز، الخراطة، التثقيب، الجلخ، الدرفلة.

هناك عاملان رئيسيان يجعلان من هذه الظاهرة محط أنظار الدراسات الاكاديمية المهتمة بمجال التصنيع منذ عدة سنوات.

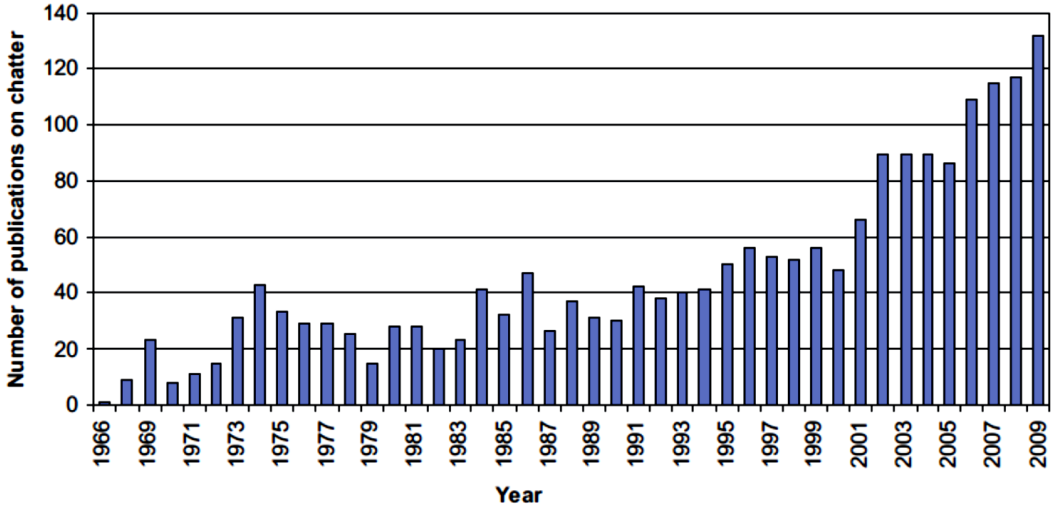
- الأول هو الغموض الذي يكتنف هذه الظاهرة مما يجعل دراستها ومحاولة فهمها أمر مهم جدا، التعقيد أو الغموض بسبب تنوع العناصر التي تُكون النظام الديناميكي (أداة القطع، حامل أداة القطع، عمود الدوران الرئيسي (السبيندل)، آلة التشغيل)، مادة المشغولة، تركيبات ألة التشغيل (ألية نقل لحركة الى محور الدوران الرئيسي)، بارامترات التشغيل، تأثيرات إعادة التموج.....
- الثاني هو التأثيرات السلبية لهذه الظاهرة التي تتطلب بحث من أجل حلها، التأثيرات السلبية لهذه الظاهرة: جودة سطح منخفضة، دقة غير مقبولة، ضجيج زائد، اهتراء بأداة القطع، ضرر آلة التشغيل، انخفاض معدل إزالة الرايش (MRR(Material Removal Rate، ازدياد التكاليف بسبب زيادة زمن الإنتاج، ضياع الطاقة، ضياع المواد (على شكل مواد

تالفة(سكراب)) وبالتالي خفض تكاليف اعادة التدوير، الحفاظ على الطاقة والمادة وبالتالي الحفاظ على البيئة.

لتفسير أحد التأثيرات السلبية على سبيل المثال **انخفاض معدل إزالة الرايش**: يختار مشغلو آلات التشغيل في الورش عادةً معدلات قطع محافظة لتجنب الاهتزازات ومع ذلك في كثير من الحالات يتم إجراء عمليات تشغيل اضافية لإزالة علامات الاهتزازات المتبقية على السطح أو اتلاف هذه المواد مما يؤدي الى خسارة الطاقة والمادة والزمن الذي يؤدي الى نقص الإنتاجية.



الشكل (1-2) يبين الفرق في جودة السطح المشغل في حال حدوث اهتزازات محرضة ذاتياً(b) من عدمه(a)[8] .



الشكل (2-2) يظهر عدد الأبحاث التي تطرقت لظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا[4]

Most prolific chatter problem authors.

1. Altintas, Y.	51 publications
2. Budak, E.	29 publications
3. Tlusty, J.	23 publications
4. Marui, E.	23 publications
5. Ismail, F.	21 publications
6. Insperger, T.	20 publications
7. Stepan, G.	18 publications
8. Schmitz, T.L.	18 publications
9. Tobias, S.A.	16 publications
10. Ota, H.	16 publications

الشكل (3-2) يبين ترتيب الباحثين في ظاهرة الاهتزازات المرضة ذاتيا بحسب عدد المقالات المنشورة[4].

2-1-4 ميكانزيم الاهتزازات المحرضة ذاتيا:

يُفسر الباحثون بشكل عام سبب حدوث الاهتزازات (بكافة أشكالها) أثناء عملية التشغيل:

- اختلاف قوى الاحتكاك بين الرايش وأداة القطع وبين المشغولة وأداة القطع.
- التقسية الغير منتظمة للطبقة المنتزعة على طول سماكة الرايش أثناء عملية التشغيل.
- عدم استقرار الحد المتراكب الذي يؤدي الى تغيرات في زاوية القطع وفي المساحات المعرضة لمقطع الرايش.
- انخفاض الصلادة الديناميكية لجزء أو عدة أجزاء من التركيبة (آلة التشغيل، حامل أداة القطع، أداة القطع، المشغولة) [10].

يُصنف الباحثون سبب هذه الاهتزازات على العموم إلى صنفين:

السبب الأولي:

- الاحتكاك بين أداة القطع والمشغولة.
- التأثيرات الميكانيكية-الحرارية نتيجة عملية تشوه الرايش.
- التأثير المتبادل.

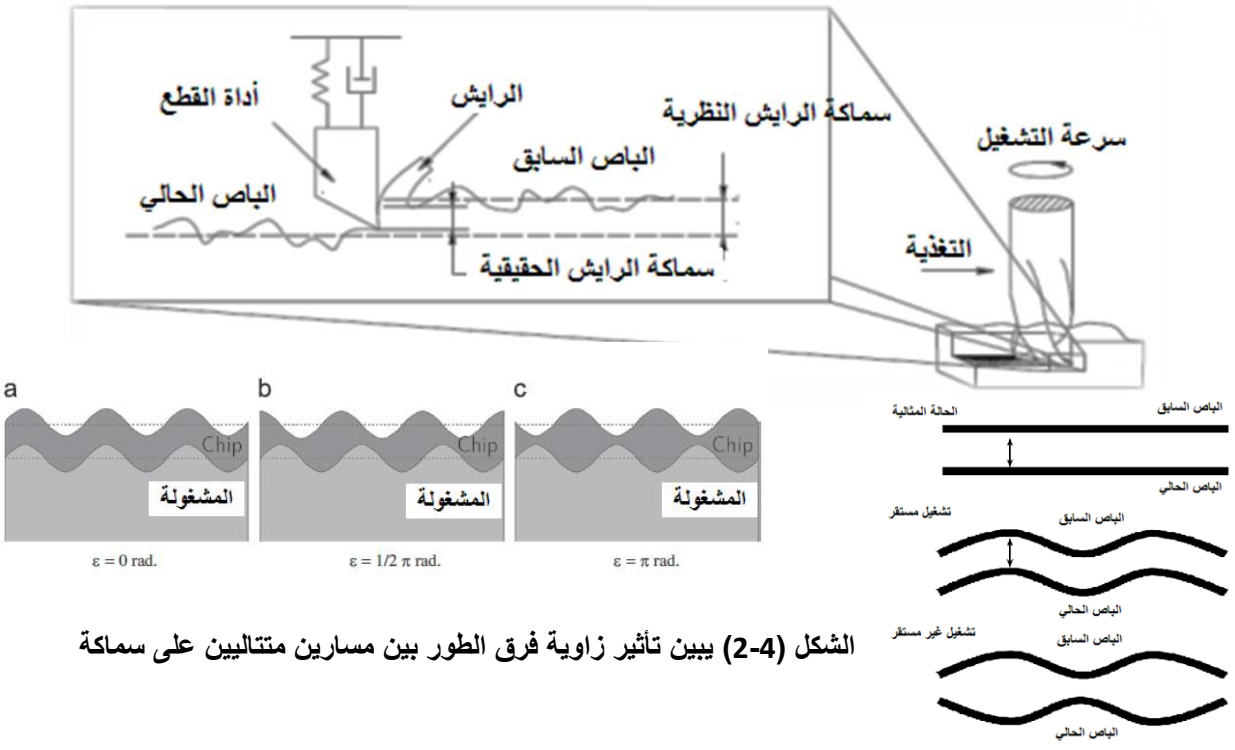
السبب الثانوي:

اعادة التموج على السطح، والتي تعتبر السبب الرئيسي في ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا، لهذا يُعتبر في كثير من المقالات أن سبب الاهتزازات المحرضة ذاتيا بسبب ظاهرة اعادة التموج فقط[11].

يمكن ترتيب أشكال الاهتزازات المحرضة ذاتياً بغض النظر عن الترتيب السابق وفق ما يلي:

1-الاهتزازات المحرضة ذاتيا بسبب تأثير الاحتكاك: يحدث احتكاك سطح المشغولة بسطح الخلوص لأداة القطع عندها يتشكل اهتزاز في اتجاه قوة القطع المماسية وبشكل محدود في اتجاه القوة العامودية.

2-الاهتزازات المحرضة ذاتيا بسبب تأثيرات الميكانيكية الحرارية: يحدث بتأثير الحرارة والانفعال في منطقة الانفعال اللدن.
3-الاهتزازات المحرضة ذاتيا بسبب التأثير المتبادل: يُعرف بأنه لو حصل اهتزاز في اتجاه القوة العامودي فيتولد بتأثيره اهتزاز في الاتجاه المماسي والعكس بالعكس. تتعدد مصادر أسباب هذا الاهتزاز منها الاحتكاك على سطح الجرف وسطح التماس(الخلوص) وسماكة الرايش المتغيرة وتأرجح زاوية الجرف وتأثيرات إعادة توليد الأمواج على السطح.
4-الاهتزاز بسبب ظاهرة التموج: يعتبر هذا النوع من أكثر الأنواع شيوعا وهذا النوع يحدث في أغلب عمليات التشغيل التي يحدث فيها أثناء التشغيل تراكب الأمواج المتولدة على سطح التشغيل؛ ويقصد بذلك أن اهتزاز أداة القطع يترك تموج على سطح المشغولة في عملية التفريز مثلاً وأثناء المرور الثاني يُرسم تموج جديد على سطح المشغولة يختلف عن السابق **بزاوية طور**، تختلف سماكة الرايش وقوى القطع بحسب قيمة زاوية الطور بين الباصين أو المرورين، تؤدي هذه الظاهرة في حال حدوثها الى ازدياد الاهتزاز بشكل كبير جداً ومن هنا تأتي أهميتها[12][13].
يبين الشكل (4-2) تأثير زاوية الطور على تشكل التموج على سطح المشغولة في المسار الباص الثاني فعندما تكون الزاوية صفر في هذه الحالة لا يحدث اهتزازات محرضة ذاتيا وسماكة الرايش الناتج عن الاهتزاز (سماكة الرايش الديناميكية)dynamic chip thickness تكون صفر ولكن في حال ازدياد زاوية الطور يزداد الاهتزاز ويزداد سماكة الرايش الديناميكية،
في حال$\varepsilon = \pi$ rad يكون الاهتزاز أعظمي وتصبح قوى القطع كبيرة تحت تأثير هذه الظاهرة، كما تُصبح قوى القطع متغيرة على طول المسار [9][14].



الشكل (4-2) يبين تأثير زاوية فرق الطور بين مسارين متتاليين على سماكة

2-2 التشغيل بسرعات عالية:

تُعد دراسة الاهتزازات المحرضة ذاتياً عملية ضرورية جداً بشكل خاص في حالة التشغيل بسرعات عالية أو عند تشغيل الأعصاب حيث تكون الصلادة الديناميكية للمشغولة منخفضة.

2-2-1-التشغيل بسرعات عالية:

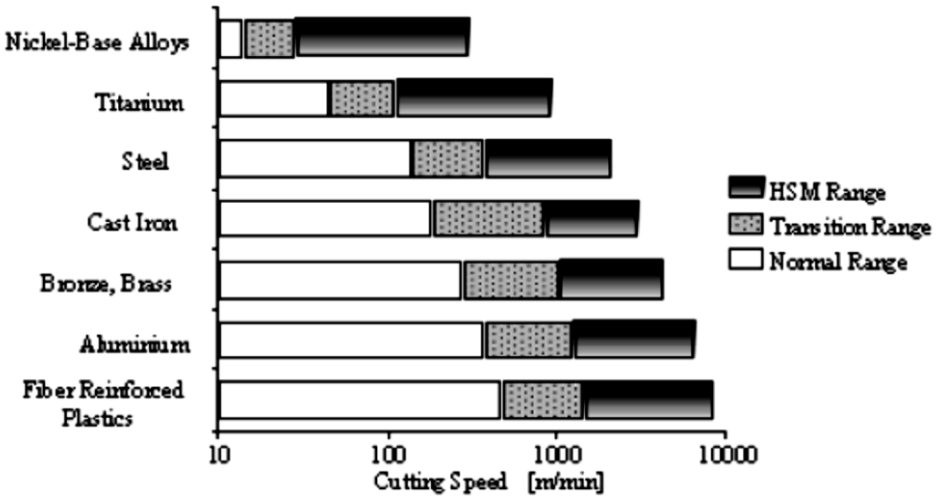
تكون سرعة القطع بهذه الطريقة أعلى ب 5-10 مرات من التفريز التقليدي تصل الى 50000rpm أول من استخدام هذه الطريقة هو Carl Salomon عام 1931، حيث لا حظ أن الحرارة الناتجة عن الاحتكاك بالسرعات العالية تتناقص طالما التشغيل مستقر وكما لاحظ أيضاً أنه تم الحصول على منتجات عالية الجودة رغم السرعات العالية.
تشغل طريقة التشغيل بسرعات عالية دوراً هاماً في الصناعة في هذه الأيام وبشكل خاص في صناعة الطائرات والقوالب (المصنوعة من الألمنيوم)، حيث تم بواسطة هذه الطريقة تصنيع هياكل الطيارات من جزء واحد بدلاً من تجميع الصفائح بواسطة البرشمة، وبالتالي يتم الحصول على تركيبات أخف وأكثر متانة وأكثر دقة واحكام إنّ ما يميز هذه الطريقة هي امكانية تشغيل المشغولات الكبيرة الحجم ومعقدة الشكل وذات سطوح رقيقة (قليلة السماكة) عوضاً عن تجميع قطع كثيرة للحصول على المنتج النهائي ومن جهة أخرى زيادة معدل إزالة الرايش يؤدي الى خفض زمن التشغيل ورفع الإنتاجية.

يتم التعبير عن هذه الطريقة من خلال مفهومان هما material removal rate MRR معدل ازالة الرايش وsurface generation rate SRG معدل توليد السطح. تتميز هذه الطريقة بمعدلات إزالة رايش عالية، حيث أنه في بعض الحالات يتم ازالة 90 بالمئة من كمية المادة الخام للوصول الى المنتج النهائي[15].

تتم هذه الطريقة بشكل مؤتمت كامل لزيادة فعاليتها، للحصول على كفاءة تشغيل عالية (انتاجية عالية، دقة عالية، أقل تكاليف)، تتم أتمته هذه العملية بشكل كامل حيث يتم تبديل أداة القطع بشكل أتوماتيكي ومعايرة تعويض أداة القطع لتعويض تآكل أداة القطع ويتم مراقبة العملية بالحساسات.
تكمن المشكلة الرئيسية التي تضع حدود لهذه الطريقة من حيث عمق القطع الأعظمي وسرعة القطع العظمى هي الاهتزازات القسرية والاهتزازات المحرضة ذاتياً.

استخدمت هذه الطريقة لأول مرة على خلائط من التيتانيوم والنيكل حيث تمتاز هذه المواد بأنها ذات قساوة عالية وصعبة التشغيل ومقاومة للحرارة.

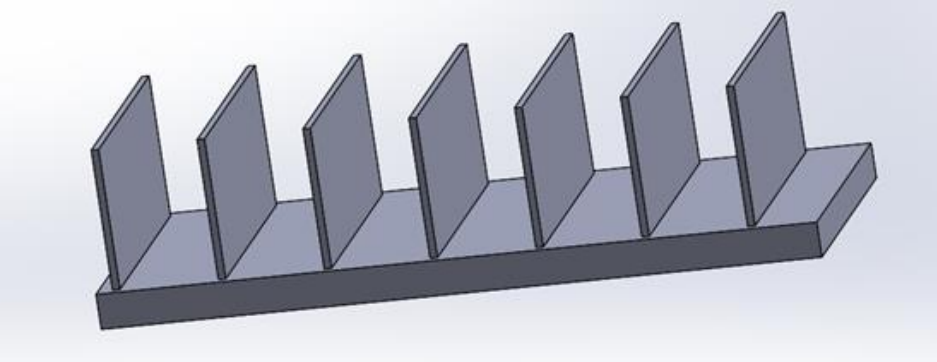
يبين الشكل (5-2) حدود التشغيل بسرعات عالية HSM عند تشغيل مواد مختلفة، حيث يلاحظ أنه عند تشغيل خلائط من النيكل بسرعة تشغيل أعلى من 200 rpm يكون تشغيل عالي السرعة ولكن عند تشغيل الألمنيوم بسرعة أكثر من 5000rpm حتى يصبح التشغيل عالي السرعة [16].



الشكل(2-5) تحديد مجال سرعات التشغيل التي يصبح فيها التشغيل بسرعات عالية HSM [16]

2-2-2 تشغيل الأعصاب:

تعد عملية تشغيل المشغولات ذات الجدران قليلة السماكة (الأعصاب) صعبة بسبب نقص الصلادة الديناميكية للمشغولة حيث يختلف التردد الطبيعي على طول السطح المشغل بحسب موقع أداة القطع يبين الشكل(2-6) مشغولة ذات جدران قليلة السماكة [19].

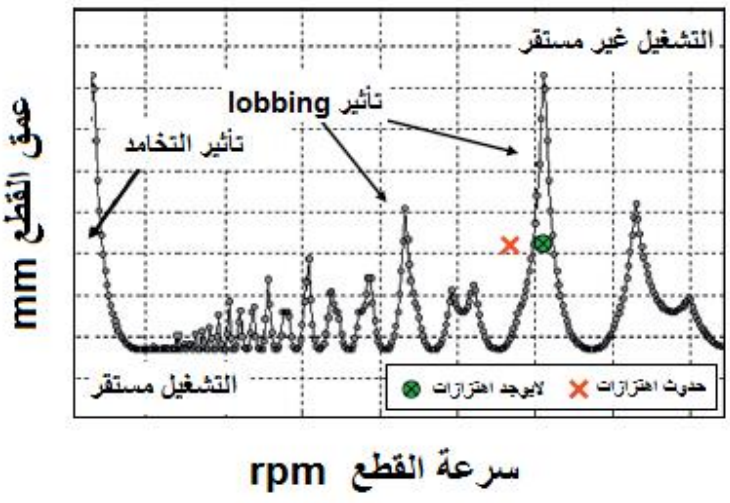


الشكل(2-6) مشغولة ذات جدران قليلة السماكة(الأعصاب)[17]

2-3-منحني الاستقرار:

يبين الشكل (2-7) منحني الاستقرار وأهم ما يميزه وفق ما يلي:

- قيم عمق القطع تابع لقيم سرعة القطع.
- المنحني تنبؤي (تخميني) للقيم المثلى لبارامترات التشغيل التي يكون فيها التشغيل مستقر بدون اهتزازات محرضة ذاتياً، يكون التشغيل فيها مستقر عند قيم البارامترات التي تقع تحت المنحني أما التي تقع فوق المنحني يكون التشغيل فيها غير مستقر.
- يتناقص تأثير التخامد على الاستقرار عند سرعات التشغيل العالية وتصبح العملية أقرب الى حالة عدم استقرار (الاهتزازات المحرضة ذاتيا). تحدث عملية التخميد عادة عند سرعات تشغيل منخفضة بسبب تشكل أمواج على سطح المشغولة ذات تموج قصير عند السرعات المنخفضة (طول موجة قصير أي تردد عالي لهذه التموجات) وتتداخل مع سطح أداة القطع مما يؤدي الى تخامد الاهتزازات.
- يكون منحني الاستقرار خاص يتعلق **بتابع الاستجابة للتركيبة** (أداة القطع-حامل أداة القطع-آلة التشغيل) ويكون خاص بـ **أداة قطع معينة (الطول الحر –عدد اللقم)، مادة المشغولة معينة، ومقدار الدخول القطري.**
- تعد عملية النمذجة لرسم منحني الاستقرار بالعملية البسيطة بسبب كون التركيبة التي تمثل عملية التشغيل (آلة-أداة القطع –المشغولة –حامل أداة القطع) تركيبة متعددة درجات الحرية، كما أن لأداة القطع متعددة الرؤوس القاطعة وذات الأشكال المختلفة، قوى قطع متغيرة الاتجاه على طول حلزنة أداة القطع، اختلاف تشوه الرايش، تعقد هذه العوامل التحليل والحساب.
- تعتبر أهم نتيجة يتم الحصول عليها من الدراسة التحليلية أو المحاكاة بطريقة العناصر المنتهية للحالة المدروسة.
- يُستفاد من المنحني في عملية التحكم ببارامترات عملية التشغيل للوصول الى الحل الأمثل [18].

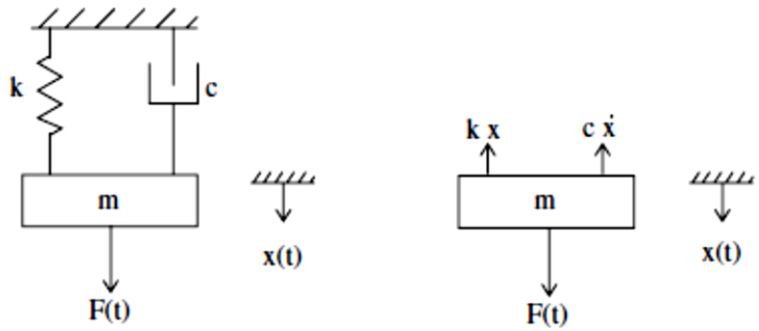


الشكل(2-7) يبين منحني الاستقرار[4]

4-2 تابع الاستجابة FRF frequency response function:

1-4-2 الحل التحليلي لإيجاد تابع الاستجابة FRF:

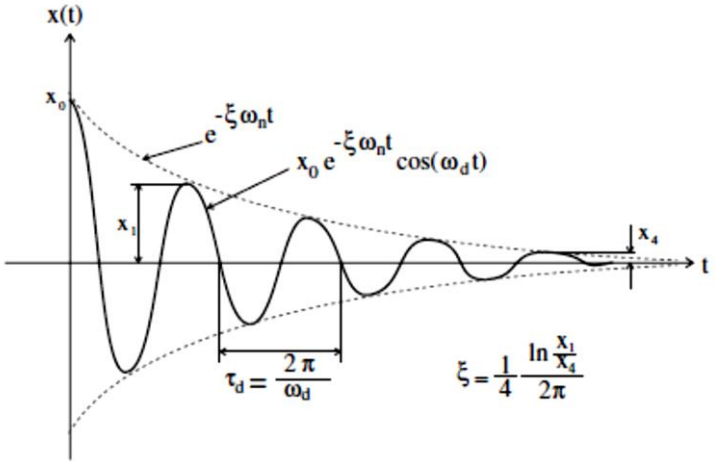
لفهم ماذا يُقصد بتابع الاستجابة سيتم التدرج في تعقيد النموذج الديناميكي المعبر عن التركيبة المدروسة.
سيتم إيجاد تابع الاستجابة بطريقة تحليلية في حال تم اعتبار النموذج الديناميكي درجة حرية واحدة وتطبيق شروط معينة لكل حالة وفق ما يلي:



الشكل(2-8) النموذج الديناميكي ذو درجة حرية واحدة[22].

أبسط طريقة ممكن أن تُمثل آلة التشغيل فيها هي النموذج الديناميكي ذو درجة حرية واحدة حيث الكتلة (m) النابض(k)التخميد(c)، القوة الخارجية المؤثرة على التركيبة F(t)، مبين في الشكل (2-8) وتمثل المعادلة (2-1) معادلة الحركة.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \text{ أو } \ddot{x} + 2\zeta\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{\omega_n^2}{k}F(t) \qquad (2-1) \qquad [22]$$



الشكل (2-9) الاهتزازات الحرة[22]

2-4-1-1 الاهتزازات الحرة:

تحصل الاهتزازات الحرة في آلات التشغيل على افتراض أن التركيبة تعرضت لضربة مطرقة لفترة زمنية قصيرة جدا، مما أدى الى انزياح التركيبة إستاتيكيا عن وضع توازنها وتم ترك التركيبة حتى تعود الى وضع توازنها، مطال الاهتزاز يتناقص مع الزمن كتابع لثابت التخميد للتركيبة كما هو مبين في الشكل(2-9)، تردد الاهتزازات بشكل أساسي محدود بصلادة (مرونة التركيبة) والكتلة وثابت التخميد الذي يكون عادة صغير جدا في التركيبات الميكانيكية.

- مع اعتبار أن الكتلة لا يؤثر عليها أي قوة خارجية وتم ازاحتها x_0 **فالاهتزاز الحر(الاستجابة)** يعطى بالمعادلة (2-2):

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos \omega_d t \qquad (2-2) \qquad [22]$$

يُعطى معدل التخامد في حالة الاهتزازات الحرة أو المتخامدة كمعدل لتناقص المطال الأعظمي للموجات المتعاقبة من الموجة الأولى حتى الموجة n ومبين ذلك في الشكل(2-9) والمعادلة (3-2).

$$\zeta = \frac{\frac{1}{n}\left(\ln \frac{x_1}{x_n}\right)}{2\pi} \qquad (3-2) \qquad [22]$$

2-4-1-2-الاهتزازات القسرية:

عندما يوجد قوة تحريض خارجية قوة قسرية F(t).

1- **القوة ثابتة** $\mathrm{F(t)} = F_0$ في هذه الحالة فإن التركيبة تهتز اهتزازات حرة أو متخامدة وتعود تستقر عند ازاحة استاتيكية $x_{st} = {F_0}/{k}$

استجابة التركيبة تحسب من خلال حل المعادلة التفاضلية (معادلة الحركة(1-2))، وبإجراء تحويل لابلاس لمعادلة الحركة مع شروط بدائية المسافة الإبتدائية x_0، سرعة الاهتزاز $\dot{x}(0)$ وبالتالي :

استجابة التركيبة بشكل عام لاهتزازات التركيبة عند درجة حرية واحدة SDOF

$$\boldsymbol{x(s) = \frac{\omega_n^2}{k} \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} F(s) + \frac{(s + 2\zeta\omega_n)x(0) - \dot{x}(0)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}} \quad (4-2) \; [22]$$

للتوضيح تعتبر المعادلة (2-4) هي المعادلة العامة وسيتم إيجاد الحل الخاص وفق الشروط المعتبرة.

تابع الاستجابة للتركيبة FRF بإهمال تأثير الشروط الابتدائية وباعتبار أن الاهتزازات متخامدة:

$$\boldsymbol{\Phi(s) = \frac{x(s)}{F(s)} = \frac{\omega_n^2}{k}\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}} \qquad \boldsymbol{(5-2)\ [22]}$$

حل المعادلة يكون على شكل جذور عقدية وبما أنه تم اعتبار الاهتزازات متخامدة وبالتالي

$1 \gg \zeta$ والجذور هي p, p^*

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = (s - \mathrm{p})(\mathrm{s} - p^*)$$

$$\mathrm{p} = -\zeta\omega_n + j\omega_d, p^* = -\zeta\omega_n - j\omega_d \qquad (6-2) \quad [22]$$

2-القوة الخارجية على شكل قوة ثابتة والشروط البدائية وفق المعادلة (2-7)

$$\mathrm{F(t) = F_0 \longrightarrow t \geq 0, \mathcal{L}(F_0) = \frac{F_0}{s}, \left(x(0) = \dot{x(0)} = 0\right)} \qquad (7-2)\ [20]$$

وبالتالي استجابة التركيبة في حال تعرضت لقوة خارجية ثابتة وشروط ابتدائية(2-7) وفق المعادلة (2-8).

$$\boldsymbol{x(t) = \frac{F_0}{k}\left[1 - e^{-\zeta\omega_n t}\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin(\omega_d t + \phi)\right]}$$

$$\boldsymbol{\longrightarrow \phi = \tan^{-1}\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}} \qquad \boldsymbol{(8-2)\ [20]}$$

3-الاهتزازات حرة وبشروط ابتدائية وفق (2-9) فالاستجابة تكون وفق المعادلة(2-10).

$$F(t) = 0, \dot{x}(0) = 0, x(0) = x_0 \qquad (9-2)\ [21]$$

$$\boldsymbol{x(t) = x_0 e^{-\zeta\omega_n t}\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin(\omega_d t + \phi) \longrightarrow}$$

$$\boldsymbol{\emptyset = \tan^{-1}\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}} \qquad \boldsymbol{(10-2)\ [21]}$$

4-**القوة الخارجية على شكل تابع مستمر** يتم دراسة عينة أي جزء من التابع المستمر خلال زمن T، باستبدال تقريب اويلر ($s \approx (1 - z^{-1}/T)$) الى حدود لابلاس في تابع الاستجابة.
الاهتزاز في حال نموذج ديناميكي ذو درجة حرية واحدة وخلال زمن التقطيع ($z^{-1}x(k) = x(k-1)$) يُقدر بالعلاقة (2-12)

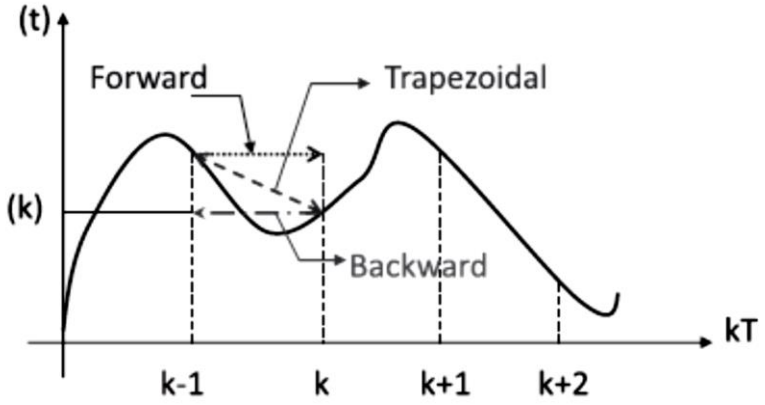
$$\Phi x(k) = \frac{1}{a_0}[-x(k-2) - a_1 x(k-1)] + \frac{b_0}{a_0} F(k) \qquad (12-2)\ [24]$$

بحيث x(k) يمثل اهتزاز التركيبة عندما يتم تحميل التركيبة بقوة F(k) عند فترات زمنية.

$t = kT \longrightarrow k = 0,1,2,3, \ldots\ldots, k$ حل المعادلة التفاضلية يتم عند كل فترة زمنية حتى k طرق التحويل التقريبية من مجال مستمر الى مجزأ مبينة في الجدول(1-2) والشكل (10-2)، حيث يبين الشكل الأخطاء الناتجة عن تقريب الحل بكل طريقة عن الأخرى.

الطريقة	S	Z	التكامل التقريبي
Euler(Backward)	$\frac{z-1}{zT} = \frac{1-z^{-1}}{T}$	$\frac{1}{1-T_s}$	$\omega(k).T$
Forward	$\frac{z-1}{T} = \frac{1-z^{-1}}{z^{-1}T}$	$1+T_s$	$\omega(k-1).T$
Tusin(Trapezoidal)	$\frac{2(z-1)}{T(z+1)} = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$	$\frac{2+sT}{2-sT}$	$\frac{T}{2}[\omega(k-1).T + \omega(k)]$

الجدول 1-2 طرق التقريب من تابع المستمر الى المجزأ[24] .



الشكل(10-2) يبين طرق التقريب من تابع المستمر الى المجزأ[24].

5-القوة الخارجية على شكل توافقي (على شكل sin,cos او كلاهما) وبالتالي تصبح معادلة الحركة وفق المعادلة (13-2)

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{\omega_n^2}{k} F_0 \sin(\omega t) \qquad (13-2)$$

يتم تحريض التركيبة وتنشأ اهتزازات قسرية بنفس تردد القوة الخارجية ولكن بتأخير زمني أو بتأخير طور زاوي وتكون الاستجابة على الشكل التالي$\mathrm{x(t) = X\sin(\omega t + \phi)}$

6-القوة الخارجية على شكل قوة توافقية عقدية $F(t) = F_0 e^{i\omega t}$فتكون استجابة التركيبة على الشكل التالي $x(t) = Xe^{i(\omega t+\phi)}$ وبالتالي تصبح معادلة الحركة و تابع الاستجابة FRF وفق المعادلة (2-14).

$$\Phi(\omega) = \frac{X(\omega)}{F_0(\omega)} = \frac{\omega_n^2}{k}\frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega_n} \qquad (14-2)[23]$$

تابع الاستجابة FRF ممكن أن يبسط باستخدام لابلاس s=iω في تابع الاستجابة وتعويضه بالمعادلة (2-5)، وبالتالي مطال وزاوية الطور لتابع الاستجابة في حال تأثير قوة خارجية على شكل توافقي هرموني يُعطى بالعلاقة (2-15).

$$|\Phi(\omega)| = \left|\frac{X}{F_0}\right| = \frac{\omega_n^2}{k}\frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega\omega_n)^2}}$$
$$= \frac{1}{k}\frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{-2\zeta\omega\omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2} = \tan^{-1}\frac{-2\zeta r}{1-r^2} \qquad (15-2)[23]$$

حيث $r = \omega/\omega_n$ نسبة بين التردد المحرض والتردد الطبيعي، تُدعى المعادلة 2-15 تابع الاستجابةFRF على شكل مطال وزاوية طور أو ممكن أن يكون تابع الاستجابة FRF على شكل جزئين حقيقي وتخيلي مركبات الجزء $\frac{X}{F_0}e^{i(\phi-\alpha)}$وفق المعادلة (2-16) الشكل (2-10) كالتالي:

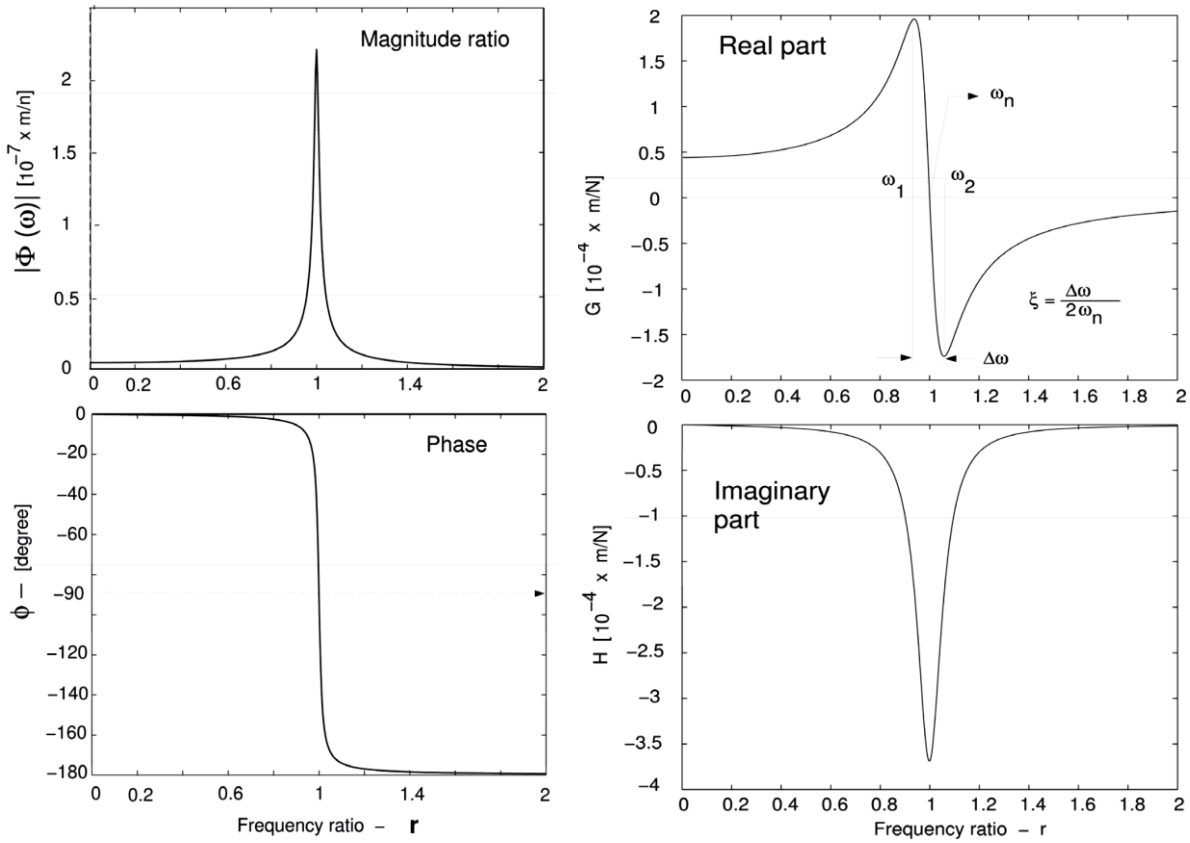
$$G(\omega) = \frac{1-r^2}{k[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \qquad H(\omega) = \frac{-2\zeta r}{k[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]}$$

$$\Phi(\omega) = G(\omega) + iH(\omega) \qquad (16-2)$$

في حال حدوث تجاوب تكون الحالة وفق ما يلي:

$$\omega = \omega_n, r = 1 \Longrightarrow G(\omega_n) = 0, H(\omega_n) = -1/2k\zeta$$

الجزء الحقيقي والتخيلي لتابع التحويل(الاستجابة) مبين في الشكل (2-11) بشكل منفصل عن بعضهما في الاحداثيات الديكارتية، أما في الاحداثيات القطبية مبين في الشكل (2-12).



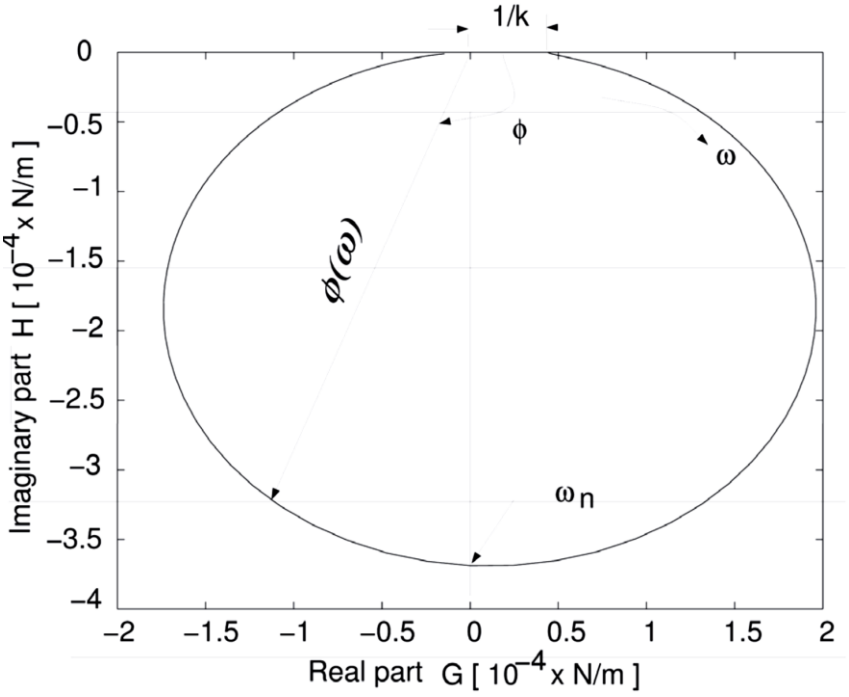
الشكل(11-2) يبين تابع الاستجابة لتركيبة من درجة حرية واحدة وفق طريقتين الأولى المطال وزاوية الطور والثانية الجزء الحقيقي والتخيلي.[23]

في حال تردد التحريض يساوي الصفر فإن الجزء الحقيقي 1/k يمثل الصلادة الستاتيكية ومبين في الشكل (12-2) ولكن عند تحريض التركيبة بتردد يساوي التردد الطبيعي الذاتي (r=1) تحدث ظاهرة الطنين ومطال الاهتزاز يصبح أعظمي وزاوية الطور تصبح -90 درجة، بازدياد التردد المحرض.

فإن زاوية الطور تقترب من -180 درجة، مطال الاهتزاز يتناقص كما يبين الشكل(11-2)، زمن التأخير بين التحريض و الاستجابة يحسب بالعلاقة التالية $t_d = \phi/\omega$ عند تردد محرض ω .
حيث القيمة العظمى $\Phi(\omega)$ عند تردد $\omega = \omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$ وبالتالي الجزء الحقيقي يأخذ قيمتان كما هو مبين في الشكل(11-2)

$$\omega_1 = \omega_n\sqrt{1-2\zeta} \longrightarrow G_{max} = \frac{1}{4k\zeta(1-\zeta)}$$

$$\omega_2 = \omega_n\sqrt{1+2\zeta} \longrightarrow G_{min} = -\frac{1}{4k\zeta(1+\zeta)} \quad (17-2)\ [23]$$



الشكل (12-2) يبين تابع الاستجابة وفق الاحداثيات القطبية لتركيبة من درجة حرية واحدة.[23]

7-القوة الخارجية على شكل دوري وليس توافقي هرموني: تمثل القوة الدورية بواسطة مكوناتها التوافقية، القوة المؤثرة على عملية التفريز F(t) تكون دورية وبدور $\tau = 2\pi/\omega$ فمثلاً يتم التعبير عن القوى المؤثرة على عملية التفريز(قوة دورية غير توافقية) على شكل متسلسلة فورييه كالتالي:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \qquad (18-2)\ [23]$$

حيث n توافقيات التردد الأساسي ω، في حالة التفريز تكون قوة القطع دورية على شكل موجة غير منتظمة، وكون عملية التفريز متقطعة غير مستمرة يمكن بالاعتماد على تقنيات التجزئة الرقمية تقسيم الزمن الى T ثانية وعدة مرات N حيث $\tau = NT$ و بالتالي حساب معاملات فورييه وفق ما يلي:

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} F_i$$

$$a_n = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} F_i \cos\frac{n2\pi t_i}{\tau}, n = 1,2,3 \dots \dots$$

$$b_n = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} F_i \sin\frac{n2\pi t_i}{\tau}, n = 1,2,3 \dots \dots$$

ملاحظة: في حالة الطرق التجريبية يتم تحديد قوة القطع في كل لحظة F_i بواسطة محلل فورييه.

متسلسلة فورييه للتابع الدوري تكون وفق المعادلة (19-2).

$$F(t) = \sum_{n=0}^{N} c_n e^{-i\propto_n} e^{in\omega t} \qquad (19-2) \quad [23]$$

حيث أن $\propto_n = \tan^{-1}\frac{b_n}{a_n}$ $c_n = \sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2}$ رسم c_n، $\propto_n$ بدلالة التردد يسمى طيف فورييه .

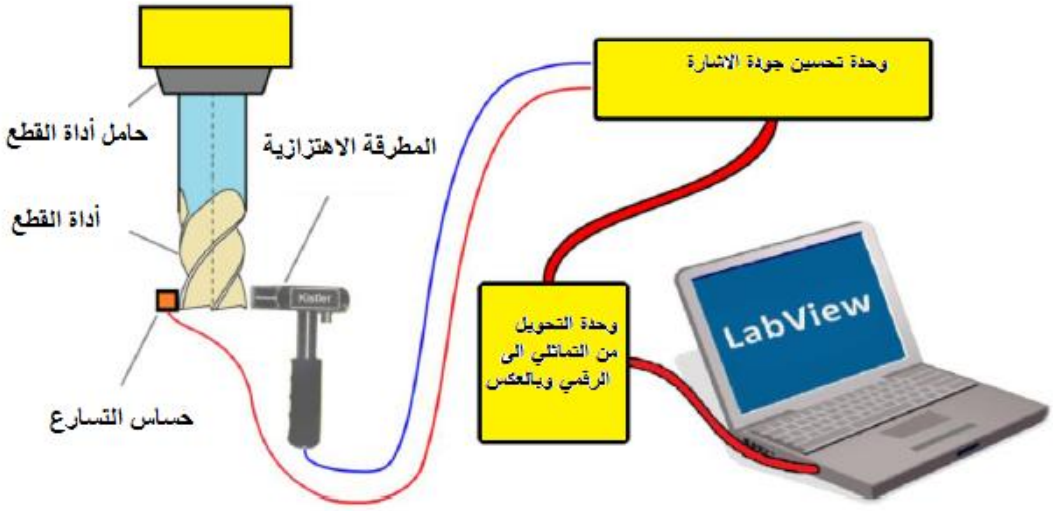
8-القوة على شكل تابع دوري وليس توافقي مثل عملية التفريز وعلى افتراض أن التركيبة بدرجة حرية واحدة فإن الاستجابة ممكن أن تحسب لكل توافقية للتابع الدوري المحرض على الشكل التالي:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N} \frac{c_n}{k\sqrt{(1-n^2r^2)^2 + (2\zeta nr)^2}} e^{i(n\omega t - \alpha_n - \phi_n)} \qquad (20-2)\ [23]$$

يُكتفى في كثير من الحالات التطبيقية عندما تكون القوة الخارجية المحرضة الدورية بالتوافقات الأربعة أو الخمسة الأولى من التوافقيات n والتوافقيات التي تكون أعلى من ذلك عادة لا تملك طاقة كافية لتسبب تأثير واضح على الاهتزازات. تكون القوى دورية بتردد المرور ففي حالة التفريز يجب الحذر من أن تكون احدى توافقيات قوى القطع تقترب من التردد الطبيعي لذلك يجب تغيير السرعة لعدم حدوث التجاوب.

2-4-2 إيجاد تابع الاستجابة بالطريقة التجريبية

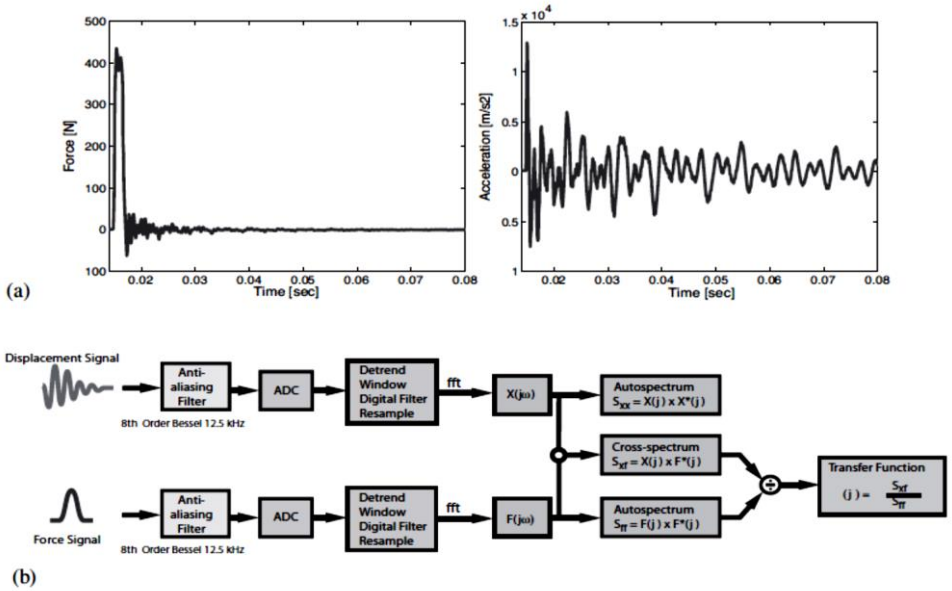
يمكن ايجاد تابع الاستجابة للتركيبة بطريقة تقنية Modal testing حيث يتم تحريض التركيبة بواسطة قوة محرضة عن طريق المطرقة الاهتزازية والاستجابة تقاس بواسطة حساس تسارع كما هو مبين بالشكل (13-2).



الشكل(2-13) يبين الطريقة التجريبية لإيجاد تابع التحويل[23]

2-4-2-1 الاجراء التجريبي للحصول على تابع الاستجابة وفق طريقة Modal

الشكل(2-14) يبين طريقة تنفيذ تجربة عملية الطرق وتقطيع الاشارة ومخطط الانسيابي للخوارزمية المستخدمة في معالجة الاشارة لحساب تابع الاستجابة FRF.



الشكل(2-14) يبين المخطط الذي يرسمه كل من حساس القوة وحساس التسارع والمخطط الانسيابي لمعالجة الإشارات للحصول على تابع الاستجابة [23].

التركيبة يتم اثارتها اما بواسطة **محرض اهتزاز أو مطرقة اهتزازية**. الفرق بين محرض اهتزاز والمطرقة[24].

1- يعطي محرض الاهتزاز قوة يُمكن التحكم بمطالها وترددها ونوعها ففي حال كان شكل القوة التي يتم التحريض بها جيبيه على سبيل المثال فإنه يتم تحريض التركيبة عند كل الترددات وما يميز ذلك أنه من المفترض أن تكون التركيبة محمل بشكل مسبق وبالتالي فإنه يكون تأثير محرض الاهتزاز ضمن المجال الخطي المرن وبالتالي لا تتحرك التركيبة إلا عند تردد معين هو تردد الطبيعي أما في حال المطرقة الاهتزازية فلا يمكن التحكم بشكل القوة المؤثرة التي تكون عشوائية على الأغلب ومطالها هو عبارة عن مقدار قوة[23].
2- يُحرض محرض الاهتزاز التركيبة بواسطة ذراع (الحركة الترددية) الموصول بالجزء الذي يتم قياسه، أما في حال المطرقة يتم طرق الجزء المراد قياسه خلال فترة زمنية قصيرة.
3- يتوضع محول (حساس القوة) في كلا الحالتين خلف الجزء الذي يتصل مع الجزء المقاس.
4- تحتاج عملية ضبط وتركيب الهزاز الى وقت طويل أما في حال المطرقة لا تحتاج الى تعيير.
5- كلفة ودقة محرض الاهتزاز أعلى بالمقارنة بالمطرقة الاهتزازية.
6- يغطي الهزاز (محرض الاهتزاز) مجال واسع من الترددات وفي حال توقع التردد الطبيعي ضمن مجال معين يمكن استخدام الهزاز ضمن هذا المجال، أما في حالة المطرقة الاهتزازية يجب أن يتم اختيار مطرقة خاصة يكون مجالها ضمن المجال المتوقع، يكون هذا المجال خاص بنوع مادة قمة المطرقة حيث أنه من الممكن أن تكون من الفولاذ والألمنيوم والبرونز والمطاط، المواد القاسية يكون شكل نبضة القوة للقمة ضيق وبالتالي يعطي مجال ترددات كبير، مادة القمم طرية تؤمن اتصال طويل الفترة الزمنية مع التركيبة ومجال ترددات التحريض صغير[25].
7- يوجد للمطرقة الاهتزازية أبعاد مختلفة. تعطي المطارق الكبيرة قوة مع دور كبير (زمن تأثير كبير) تعد فعالة لتحريض التركيبات ذات الحجم الكبير ذات التردد الطبيعي المنخفض، تكون النبضة ضيقة وبطاقة أقل للمطارق الصغيرة، حيث تكون مناسبة لتحريض التركيبات الصغيرة التي يكون ترددها الطبيعي ذو قيمة عالية[26] [27] .

يتم قياس الاستجابة بواسطة حساس تسارع أو سرعة أو مسافة:

يوصل حساس التسارع أو السرعة أو المسافة بشكل مباشر مع التركيبة بواسطة شمع wax أو لاصق أو مغناطيس أو براغي. يسبب كتلة حساس التسارع مشكلة في حال كانت التركيبة ذات وزن خفيف لأنه يزيد من كتلة التركيبة وبالتالي يتم الحصول على نتائج غير دقيقة.

يمكن أن يكون حساس التسارع بدون اتصال مباشر على شكل سعوي أو حثي (تحريض مغناطيسي) أو ليزر، على الرغم من أن حساسات الليزر تعطي دقة عالية للاستجابة الخطية لمجال تردد واسع ولكن هذه الحساسات تستغرق زمن لضبطها وممكن أن تكون بعيدة بمسافة تصل الى أمتار، الحساسات السعوية والحثية تكون ذات مجال ترددات أضيق ومسافة بعد الحساس عن التركيبة لا يتجاوز عدة ميليمترات.

الفصل الثالث:

الدراسة المرجعية

1-3 استراتيجيات الحصول على عملية تشغيل مستقرة:

يهدف الباحثون بشكل عام في حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً الى **كشف حدوث الاهتزازات المحرضة ذاتيا، تعريفها، تجنبها، منعها، إنقاصها، التحكم بها أو تخميدها.**
إن استراتيجية الحصول على عملية تشغيل مستقرة بدون اهتزازات محرضة ذاتياً تُصنف الى طريقتين أساسيتين كما هو مبين في الشكل (1-3).
الطريقة الأولى تعديل بارامترات التشغيل:
تهدف هذه الطريقة الى الحصول على بارامترات التشغيل المثالية ففي حال الاعتماد على منحني الاستقرار، تكون قيم البارامترات المثلى ضمن المنطقة المستقرة في منحني الاستقرار.

الطريقة الثانية تغيير السلوك الديناميكي للتركيبة:
تهدف هذه الطريقة الى تجنب حدوث الاهتزازات المحرضة ذاتياً وذلك من خلال تغيير السلوك الديناميكي للتركيبة وبالتالي تعديل حدود الاستقرار في منحني الاستقرار (الحصول على منحني استقرار مغاير).
في الطريقة الأولى يُمكن التمييز بين نوعين أو استراتيجيتان أثناء التشغيل أو بعد عملية التشغيل أما في الطريقة الثانية يوجد أسلوبان المباشر والغير مباشر.
سيتم التطرق الى كل طريقة بشيء من التفصيل مع ذكر أهم الأبحاث لكل طريقة[4].

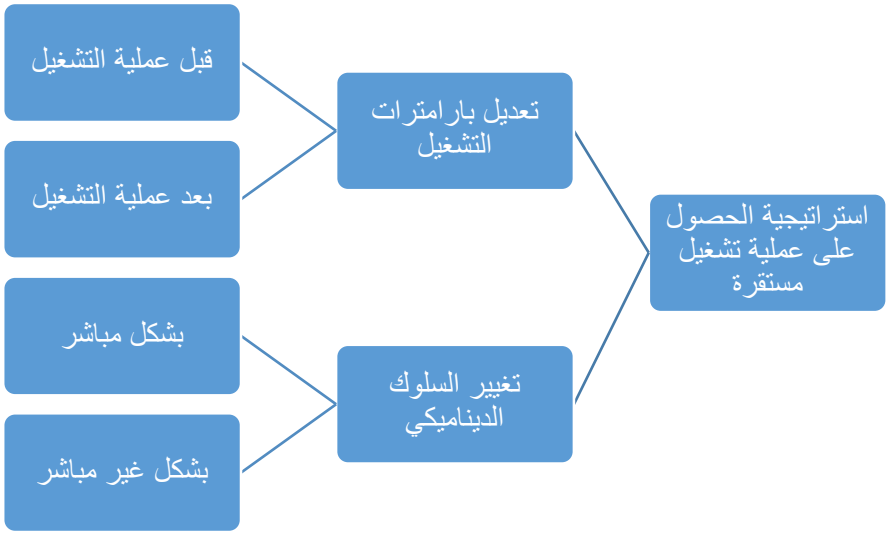
1-1-3 استراتيجية بعد أو قبل عملية التشغيل:

تقوم هذه الطريقة على إيجاد حدود منحني الاستقرار قبل عملية التشغيل. يعتبر منحني الاستقرار نتيجة لتحليل النموذج الديناميكي المكافئ للتركيبة، حيث تم في الفصل الثاني من الأطروحة شرح كيفية إيجاد تابع الاستجابة بواسطة (المطرقة الاهتزازية -حساس التسارع) ومن ثم يُمكن رسم منحني الاستقرار التوقعي سيأتي في الفصل الرابع من الأطروحة، حيث يوجد برامج تجارية مثل CutPro يُمكن بواسطته رسم منحني الاستقرار بعد اجراء تجارب بسيطة.
يمكن الاختيار الأمثل لبارامترات القطع بعد معرفة منحني الاستقرار والحصول على البارامترات التي تؤمن تشغيل مستقر. يوجد عدد من الأبحاث اللذين استخدموا هذه الطريقة ومنهم:

1) دراسة تأثير ظاهرة الخلوص الحر على استقرار التشغيل[28].
2) تقديم نموذج متعدد درجات الحرية لعملية الخراطة[29].
3) دراسة تأثير زاوية الجرف وزاوية الحلزنة على استقرار عملية التشغيل في التفريز الطرفي ورسم منحني ثلاثي الابعاد يُظهر زيادة الاستقرار بزيادة كل من زاوية الجرف والحلزنة [30].
4) دراسة تأثير زاوية الحلزنة على الاستقرار[31].

طورالباحثون النمذجة التي تعتمد على التحليل الرياضي للتنبؤ باستقرار عملية التشغيل التي تأخذ بعين الاعتبار ميلان أداة القطع وبالتالي ايجاد معاملات قوى القطع الاتجاهية لاستخدامها بالتحليل الرياضي.

1) تقديم نموذج ديناميكي لدراسة حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا في حالة التفريز في فارزة مبرمجة CNCخمس محاور حيث تم حساب معدل التغذية بطريقة معالجة المسار ومحاكاة ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا باستخدام طريقة مجال الزمن[32].



الشكل(1-3) يبين استراتيجيات الحصول على عملية تشغيل مستقرة[4]

2) إيجاد الحل الرياضي في عملية الجلخ[33].
3) إيجاد التحليل الرياضي في عملية توسيع الثقوب، محاكاة شروط القطع في عملية توسيع الثقوب التي تؤدي الى الاهتزازات المحرضة ذاتيا[34].
4) اقترح نموذج تجريبي بحيث تم تغيير كل من سرعة القطع وعمق القطع ورسم منحني الاستقرار ثم كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا لرسم حدود المنحني[35].
5) اقتراح طريقة تعتمد على الاحتمالات حيث تم إيجاد خوارزمية احتمالية سميت التنبؤ بحالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا حيث تعتمد على تحليل النموذج الديناميكي لعملية التفريز[36].
6) اقتراح طريقة الشبكات العصبونية لإيجاد القيم المثلى لمعدلات القطع[37].
7) تطوير رسم بياني لمحاكاة ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا في عملية التفريز، كل بكسل من المنحني يتعلق بكل من مطال الاهتزاز والتردد بنفس الوقت[38].
8) استخدم بعض الباحثين طريقة العناصر المنتهية لمحاكاة الاستقرار والتنبؤ به، بهذه الطريقة يمكن التنبؤ عن سلوك آلة التشغيل أو أجزاء من الألة في مرحلة التصميم قبل انشاء الألة، تقديم نموذج للتنبؤ عن حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا بالاعتماد على طريقة العناصر المنتهية. [39]
9) اقتراح نموذج بالاعتماد على طريقة العناصر المنتهية لعملية الجلخ، تكمن الفائدة الكبيرة من هذه الطريقة في تقدير الصلادة الديناميكية لعامود الدوران الرئيسي (السبيندل) وبالتالي ايجاد التصميم المثالي لعمود الدوران الرئيسي أو التعديل عليه بعد التجريب لأنه يمكن تخمين تأثير تغيير أي جزء على الصلادة الديناميكية وبالتالي على منحني الاستقرار مما يوفر في المال والجهد[40].

10) الاهتزازات التي تحدث للمشغولة أثناء تشغيل (الأعصاب) والتي تعطي سطوح تشغيل سيئة تعد من المواضيع المهمة التي ناقشها الباحثون، ركز Gonzalo على المشغولات المصنوعة من الألمنيوم في محاكاة تشغيل الأعصاب أو المشغولات الرقيقة إيجاد حل لمشكلة تنوع مصادر الاهتزاز وذلك برسم منحني استقرار ثلاثي أبعاد حيث البعد الثالث هو مكان الدراسة ضمن المشغولة [41]، دراسة تشغيل السطوح الرقيقة ورسم منحني الاستقرار ثلاثي الابعاد بحيث كان البعد الثالث هو مكان التشغيل بالنسبة لأداة القطع[42]. دراسة ظاهرة الاهتزازات المحرضة ذاتيا في السطوح الرقيقة من خلال رسم منحني الاستقرار بثلاث أبعاد (سرعة التشغيل وعمق القطع المحوري وعمق القطع القطري) وبالتالي ايجاد التقاطع الأفضل ين عمق القطع المحوري والقطري الأمثل الذي يعطي أعلى انتاجية [43].

3-1-2 استراتيجية تعديل بارامترات القطع أثناء عملية التشغيل:

تقوم هذه الطريقة على كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا أثناء عملية التشغيل مما يتيح تعديل وتصحيح قيم بارامترات التشغيل أثناء عملية التشغيل وفي حال معرفة منحني الاستقرار التنبؤي يمكن أن يُتخذ القرار الأفضل بحيث يتم على سبيل المثال إما زيادة أو إنقاص سرعة القطع.
الطريقة السابقة تعتمد على رسم منحني الاستقرار المتنبؤ به بحيث يُكون فكرة عن المنطقة ذات البارامترات المثلى وبأعلى انتاجية من حيث الزمن وعمق القطع ومعدل ازالة الرايش، ولكن نظرا لصعوبة تأمين التجهيزات ورسم المنحني التوقعي وكما أنه في حالة تشغيل السطوح الرقيقة فإن الاجهادات تختلف على طول المسار لاختلاف الصلادة وبالتالي حتى لو توفرت التجهيزات من الصعب رسم منحني استقرار لهذه الحالة الخاصة، لذلك اقترح الباحثون طريقة جديدة لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا تعتمد على كشفها أثناء التشغيل online من خلال مراقبة اشارة معينة مثل اهتزازات أو صوت أو الاستطاعة أو غير ذلك بواسطة أنواع مختلفة من الحساسات والأجهزة لتجميع المعلومات.

1) اقتراح طريقة لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتيا تعتمد على حساب مقدار الازاحة للمشغولة أثناء عملية التشغيل [44].
2) اقتراح طريقة يتم بها التحكم بسرعة التشغيل أثناء عملية التشغيل بحيث يتم تبديل سرعة التشغيل في حال ظهور الاهتزازات المحرضة ذاتيا ويتم معرفة ذلك من خلال جهاز يُستخدم لقياس قوة القطع[45].
3) يوجد عدة طرق استخدمت تختلف عن بعضها من حيث اما نوع الاشارة المستخدمة كمعيار (صوتي-ضوئي-اهتزازات-حساس سرعة-مسافة-تسارع-قوى القطع-مقياس الاستطاعة) أو الخوارزمية المستخدمة في معالجة البيانات وتحليلها واختيار الاستراتيجية المثلى مثلا زيادة أو نقصان السرعة تتم هذه المرحلة بواسطة الحاسوب في الزمن الحقيقي من هؤلاء الباحثين مع ماذا استخدم. استخدم Schmitz et al اشارة صوتية بواسطة ميكرفون المعالجة كانت باستخدام برنامج Harmonizer by Metalmax حيث يتم من خلال هذا البرنامج ادخال جميع البيانات ومن ثم يكون هناك عتبة لمستوى الصوت عند تجاوزها يكون التشغيل غير مستقر (حالة اهتزازات محرضة ذاتيا).
4) تم إيجاد حل تجاري لكشف وتجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا أطلق عليها التشغيل نافي يتضمن استخدم ميكرفون خاص أو حساس تسارع معين ووصله بوصلة الى الحاسب ومن

ثم تخريج أوامر الى ماكينة التشغيل حيث يُعدل النظام بشكل أتوماتيكي بارامترات التشغيل[46].

5) اقتراح طريقة index-based reasoning (IBR) من أجل كشف الاهتزازات المحرضة ذاتيا وتخمين مقدار التأكل لأداة القطع باستخدام بيانات قياس العزم باستخدام جهاز قياس قوة القطع، حيث يتم باستخدام هذه الطريقة تصنيف البيانات الصادرة من جهاز قياس قوة القطع في جدول بيانات[47].
6) استخدام عدة حساسات ومقارنة نتائج هذه الحساسات (جهاز قياس قوة القطع، حساس التسارع، مصدر صوتي) لمعرفة أيها أكثر حساسية لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا[48].
7) تطوير حساس اهتزاز بدون اتصال لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا [49]
8) اقتراح طريقة rescaled range (R/S) analysis التي تمكن من اجراء قياسات احصائية بتغيير للمتغيرات في المتتالية ويتم التحقق من النتائج بشكل تجريبي باستخدام حساس تسارع[50].
9) استخدام طريقة wavelet لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتيا ومنعها وتعطي نتائج دقيقة بحيث يتم التخلص من الأضرار الناتجة عن حدوث هذه الاهتزازات بنسبة 95 بالمئة.
10) استخدام هجين من طريقتين لمراقبة الاهتزازات الشبكات العصبونية وماركوف بحيث يتم الحصول من طريقة ماركوف على نموذج من اشارات تابعة للزمن ويتم تكامل هذه البيانات بطريقة الشبكات العصبونية.
11) تصميم جهاز ضوئي لقياس وتسجيل الاهتزازات في عملية التفريز من أجل تمييز حالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا. [51]

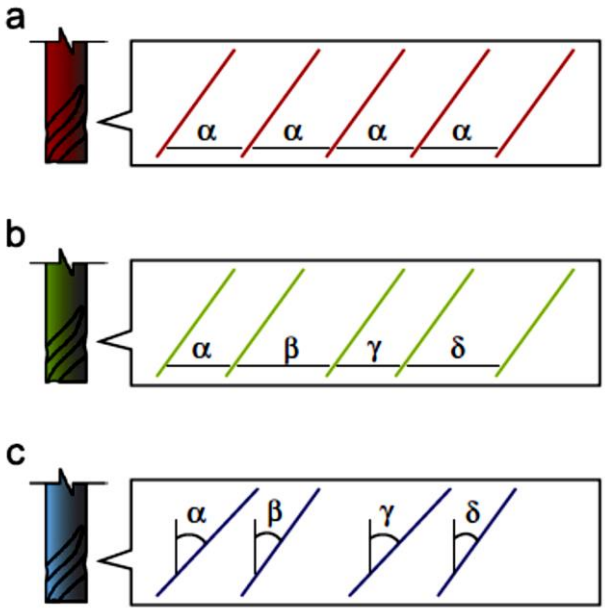
3-1-3 تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا بشكل غير مباشر:

تقوم هذه الاستراتيجية على إجراء تعديل ما في آلة التشغيل مما يؤدي الى تغير السلوك الديناميكي لهذه الآلة والحصول على منحني استقرار جديد. يتم التعديل باستخدام تجهيزات اضافية تقوم بامتصاص الاهتزازات، ومنها المخمدات التي تُوضع في الأماكن ذات الجساءة المنخفضة، ومنها مخمدات احتكاكية ، مخمدات كتلة ، مخمدات ، أو تغيير في أجزاء التركيبة المتأكلة لتحسين أداء الآلة. يمكن باستخدام هذه الطريقة توسيع حدود المناطق ذات التشغيل المستقر في منحني الاستقرار.

1) اقتراح طريقة تعتمد على تغيير أداء آلة التشغيل بتأثير الاهتزازات من خلال اعادة تصميم الأجزاء الضعيفة في التركيبة من خلال دراسة عدة حالات تبين أن الجزء المتحرك (عمود الدوران الرئيسي) هو أضعف الأجزاء وأكثرها تأثيرا وبالتالي ايجاد التصميم الأمثل للسبيندل[52].
2) تخميد آلة التشغيل من خلال اضافة بلاطات احتكاكية اضافية [53].
3) استخدام مخمد صدمي لتخميد الاهتزازات[54]. استخدام مخمد ميكانيكي موضوع في اسطوانة مثقوبة توضع على حامل أداة القطع حيث يتم تخميد الاهتزازات على شكل احتكاك[55].
4) تحسين عملية توسيع الثقوب باستخدام مخمد لتخميد الاهتزازات[56].
5) استخدام أدوات القطع الغير تقليدية أي أدوات قطع ذات خطوة متغيرة أو أدوات قطع ذات زاوية حلزنة متغيرة كما هو مبين في الشكل(2-3) حيث يمكن بهذه الطريقة زيادة الحد الأقصى لعمق القطع المسموح به. دراسة تأثير استخدام أدوات القطع الغير تقليدية ولاحظ أن أدوات القطع ذات الخطوة الغير منتظمة وذات الحلزنة الغير منتظمة تعطي نتائج جيدة

على تخميد الاهتزازات أما تغيير زاوية الخلوص وزاوية الجرف لا يعطي نتائج باهرة من حيث التخميد الشكل (2-3) [57].

تقدم شركات صناعية أدوات قطع مركب في داخلها مخمد مثلSandvik. كما تؤثر نسبة قطر أداة القطع مع طول التعليق (الطول الحر) كثيرا في تولد الاهتزازات



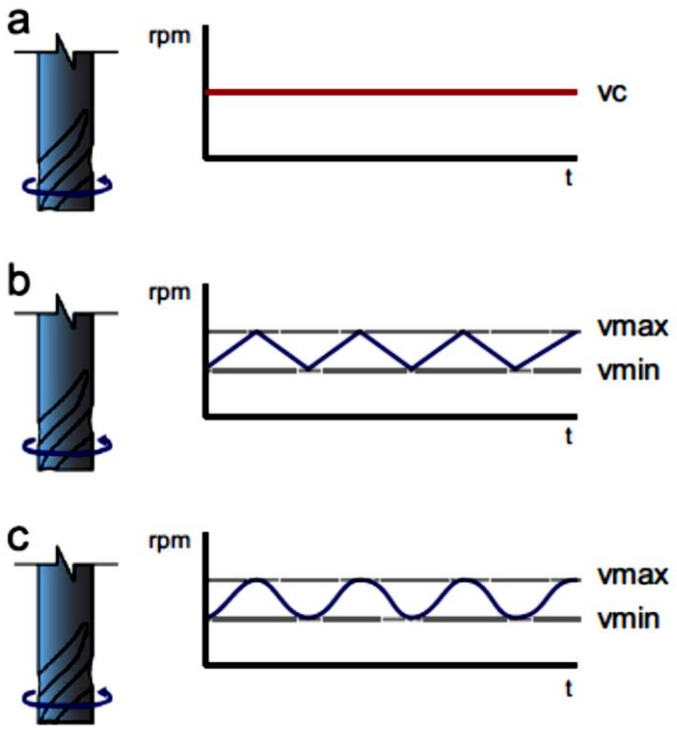
الشكل(2-3) استخدام أداة قطع ذات خطوة منتظمةa، متغيرة b، زاوية حلزنة متغيرة c[57]

3-1-4-تجنب الاهتزازات المحرضة ذاتيا بشكل مباشر:

تعتمد على عناصر محددة بإمكانها تعديل مقدار الطاقة المقدمة عن طريق تخميدها أو تعديل في مقدار الطاقة المقدمة، بهذه الوسيلة بشكل مباشر يتم زيادة أو إنقاص قيمة الطاقة للحصول على تشغيل مستقر، تختلف هذه الطريقة عن السابقة من كونها تعتمد على مراقبة الاهتزازات وتشخيصها ومن ثم اتخاد القرار المناسب والتغيير يتم بشكل مباشر، في الآونة الأخيرة زاد الاعتماد على هذه الطريقة بسبب تطور الحساسات والمؤازرات والحواسيب، كما تعطي هذه الطريقة مرونة **حيث يُمكن تعديل طاقة التخامد أو الطاقة المقدمة بشكل مباشر**.

1) استخدام هذه الطريقة لتخفيف الاهتزازات بشكل مباشر وتوسيع حدود الاستقرار في المنحني[58].
2) استخدم خوارزمية للتحكم بحالة الاهتزازات المحرضة ذاتيا من خلال تغيير تابع الاستجابة للتركيبة وخصائص النموذج بشكل مباشر عن طريق محمل مساعد لعمود الدوران الكتروستاتيكي أوكهروضغطي [59].
3) التحكم بالاهتزازات على المشغولة باستخدام مؤازر كتلي الكترومغناطيسي [60].
4) تخميد الاهتزازات والتحكم بها بشكل مباشر ولكن بشكل جزئي[61].
5) احدى الطرق المستخدمة لتخميد الاهتزازات بشكل مباشر تشابه طريقة أداة القطع مختلفة الخطوة وهي استخدام سرعة قطع مختلفة spindle speed variation (SSV)

تعتبر هذه الطريقة مرنة وتكون فعالة في تخميد الاهتزازات عند السرعات المنخفضة الشكل (3-3) يبين أشكال تغيير السرعة المثلثي أوالمنشاري والجيبي.



الشكل 3-3 يبين أشكال تغيير السرعة المثلثي أوالمنشاري والجيبي[57].

6) إيجاد تحويل فورييه لأي شكل من أشكال تغيير السرعة[63].
7) استخدام طريقة SSV مع معادلات تفاضلية متأخرة لا خطية ومن ثم التحقق بطريقة تحليلية أو تجريبية[64].
8) إيجاد تأثير طريقةSSV في حال السرعات العالية[65].
9) إيجاد استراتيجية لكشف الاهتزازات وبحسب منحني الاستقرار إما المحافظة على سرعة القطع أو تغيير في سرعة القطع، كما تم كشف الاهتزازات المحرضة ذاتيا وتشخيصها أثناء التشغيل باستخدام طريقة portable digital assistant (PDA)[66].
10) تقديم نموذج تطبيقي لاستخدام هذه الطريقة في عملية الدرفلة[67].

يوجد باحثون اقترحوا استخدام عناصر ذات تأثير مباشر، تعطي أجهزة التخميد المباشرة للنظام طاقة من أجل تخميد الاهتزاز حيث أنه من الممكن أن تكون هذه الطاقة كمسافة أو قوة حسب المؤازر المتحكم به بواسطة الحاسب حيث يجب أن يكون مجال هذه القوة أو الضربة كافي مع امكانية التحكم به من أجل أن يغطي مجال واسع من النماذج الديناميكية.

11) استخدام حساس تسارع لقياس الاهتزاز ومخمد كتلي بتحكم مباشر لزيادة مجال الاستقرار في منحني الاستقرار[68].
12) استخدام مخمد كتلي والمقارنة بين الخطي واللاخطي من هذه المخمدات حيث تم اكتشاف أن اللاخطي أفضل في التخميد كونه يخفض قيمة الجزء الحقيقي من تابع الاستجابة[69].
13) اقتراح طريقة لتشغيل البلاطات المرنة (المقاصات) التي يعد تشغيلها عملية صعبة، حيث يتم التشغيل على وجهين البلاطة بنفس الوقت وبسبب ظهور الاهتزازات المحرضة

ذاتيا لذلك تم اقترح أن يتم التشغيل بسرعتين تشغيل مختلفتان وبالتالي يتم تخميد الاهتزازات[70].

14) تصميم حامل أداة قطع يتم التحكم بصلادته من خلال مؤازرات كهروضغطية[71].

15) اقتراح استخدام مخمد مغناطيسي لتخميد الاهتزازات كما تم استخدام طريقة العناصر المنتهية لاختيار التصميم الأمثل وعند تطبيق هذا المخمد بشكل عملي كان له دور في زيادة حدود الاستقرار، ميزة هذا المخمد تكمن في امكانية تغيير الصلادة بتغيير قوة المجال المغناطيسي المؤثر [72].

الفصل الرابع:

الدراسة التحليلية

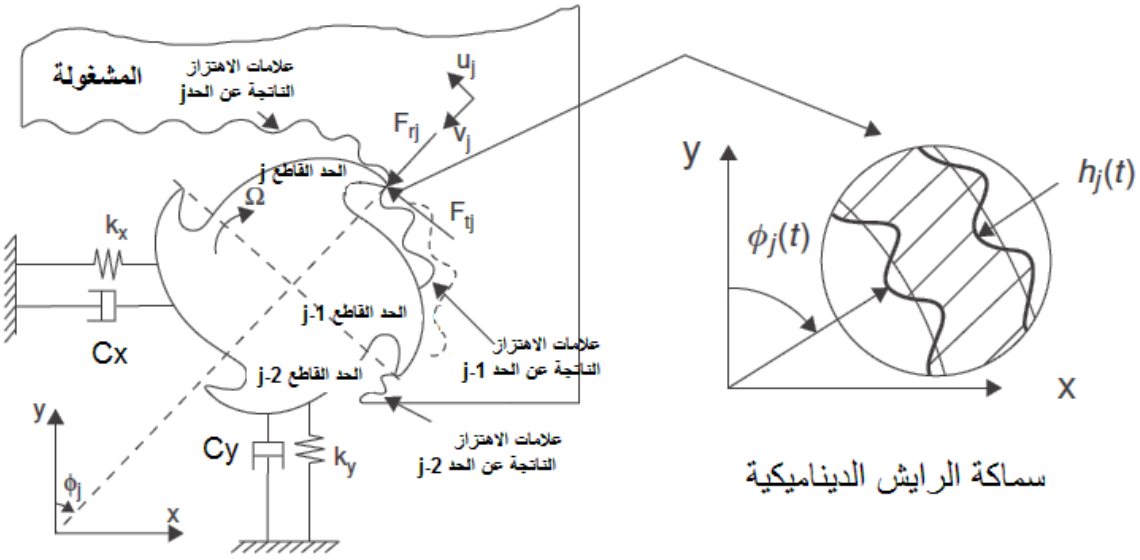
الفصل الرابع: الدراسة التحليلية

4-1 التمهيد:

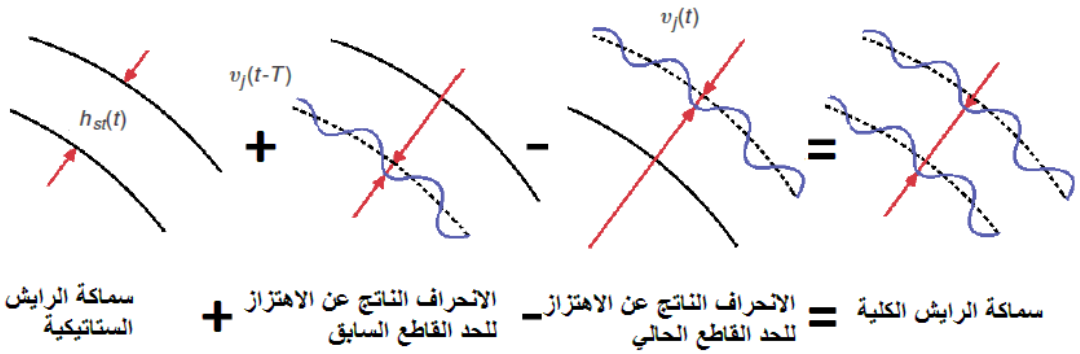
يتم الحصول على الشكل النهائي لمعظم التركيبات الميكانيكية من خلال عمليات التشغيل التي تعتمد على تقنية إزالة الرايش. يتبع معظم عمليات السكب والدرفلة مجموعة من عمليات التشغيل التي تعتمد على تقنية ازالة الرايش للوصول الى الشكل والأبعاد والجودة المطلوبة للمنتج.
تقسم عمليات التشغيل بإزالة الرايش الى عمليات تشغيل يتم فيها إزالة كمية كبيرة من المعادن مثل الخراطة وتسمى عمليات تشغيل أولية وعمليات تشغيل يتم فيها إزالة كمية صغيرة من المعدن مثل الجلخ تسمى عمليات انهاء، معظم عمليات التشغيل مثل الخراطة والتفريز والتثقيب يتبعهم عمليات جلخ.
كل هذه العمليات تشترك بنفس مبدأ ألية تشكل الرايش (نظرية القطع) ولكن تختلف بالشكل وكينماتيك (علم الحركة).
تم اختيار بالاستفادة من نظرية القطع المعادلات التي تعبر عن القطع العامودي واختيار عملية التفريز الطرفي وبطريقة التفريز الهابط، تم توضيح هذه المفاهيم في الملحق رقم(1).

2-4 نمذجة عملية التفريز الطرفي:

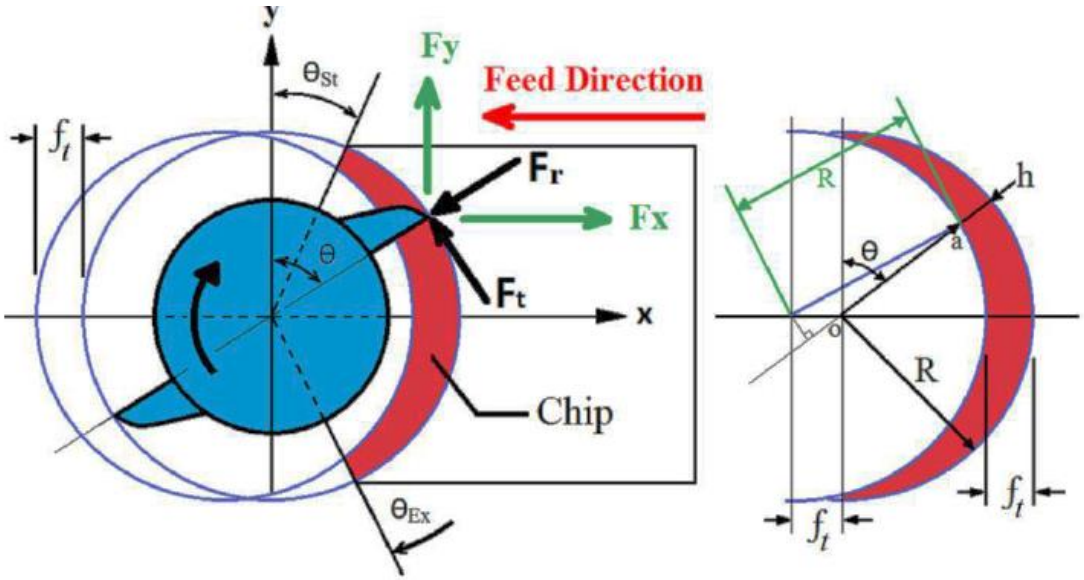
تعتبر نمذجة عملية التفريز عملية معقدة بسبب قوى القطع المتغيرة وحمولة الرايش المتغيرة من جهة والتعقيد الناتج عن مواصفات أداة القطع من جهة أخرى (عدد حدود أداة القطع، زاوية الجرف، زاوية الخلوص، طول أداة القطع، الحلزنة).
تختلف سماكة الرايش وقوة القطع على طول الحد القاطع بسبب الحلزنة والخطوة الزاوية المتغيرة.
يُعتبر تحليل عملية التفريز وأداة القطع عملية معقدة جداً وتشكل تحدي كبير للباحثين.
يتم تبسيط النموذج الديناميكي لعملية التفريز باعتبار وجود درجتان حرية وأما باقي درجات الحرية الممكنة فهي مقيدة، حيث يتم اعتبار أن المشغولة جاسئة ومثبتة بطريقة جيدة وبالتالي لا يوجد لها أي درجة حرية وأما بالنسبة لأداة القطع فأنه لا يوجد سوى درجتان حرية من أصل ستة ممكنة وهما الازاحة الخطية x,y كما هو مبين في الشكل(4-1).



الشكل(4-1) الموديل (النموذج) الديناميكي لعملية التفريز على افتراض درجتان حرية [76]



الشكل(4-2) سماكة الرايش الديناميكية (الحقيقية)[76]



الشكل (3-4) سماكة الرايش الاستاتيكية لتفريز طرفي ويبين زوايا الدخول والخروج. [75]

أولاً: حساب سماكة الرايش:

على افتراض أن أداة القطع تحتوي على عدد من الحدود القاطعة N، **زاوية الحلزنة صفر**، قوى القطع تحرض التركيبة باتجاه التغذية (X) والاتجاه العامودي (Y) وتؤدي الى إزاحة ديناميكيةx،y بالترتيب، المسافة الديناميكية بالنسبة لحد التفريز رقم j بالاتجاه القطري أو باتجاه سماكة الرايش يعطى بالمعادلة رقم (4-1) بدلالة الاحداثيات الديكارتية.

$$\upsilon_j = -x \sin \emptyset_j - y \cos \emptyset_j \qquad (1-4) \qquad [76]$$

$\emptyset_j$ زاوية الطور الأني مقاس باتجاه الدوران من محورY، في حال دوران محور الدوران بسرعة Ω rad/s وبالتالي فإن تغير زاوية الطور بالنسبة للزمن $\emptyset_j(t) = \Omega t$.

سماكة الرايش يتألف من جزء استاتيكي مبين في الشكل (3-4) ويحسب وفق العلاقة (2-4)

$$h_s(\emptyset) = R - \overline{oa} \qquad (2-4)$$

$$\left(\overline{oa} + fsin(\emptyset)\right)^2 = R^2 - \left(fcos(\emptyset)\right)^2 \qquad (2-4)$$

$$\overline{oa} = \sqrt{R^2 - \left(fcos(\emptyset)\right)^2} - fsin\emptyset \qquad (2-4)$$

$$h_s(\emptyset) = R - \sqrt{R^2 - \left(fcos(\emptyset)\right)^2} + fsin\emptyset \qquad (2-4)$$

$$h_s(\emptyset) \cong fsin\emptyset \qquad (2-4) \qquad [75]$$

وبالتالي فإن سماكة الرايش الاستاتيكية الناتجة باعتبار أداة القطع جاسئة ($f \sin \emptyset_j$)، أما الجزء الديناميكي الناتج عن الاهتزازات خلال عملية التشغيل بين الحد القاطع (سن التفريز) الحالي j و السابق j,0، سماكة الرايش تُقاس على المحور القطري وبالتالي سماكة الرايش الكلي تُعطى بالعلاقة (4-3).

$$h\left(\emptyset_j\right) = \left[f \sin \emptyset_j + \left(\upsilon_{j,0} - \upsilon_j\right)\right] g\left(\emptyset_j\right) \qquad (3-4)[76]$$

f التغذية، R نصف قطر أداة القطع، ($\upsilon_j, \upsilon_{j,0}$) الازاحة الديناميكية لأداة القطع عند سن التفريز الحالي والسابق، $g(\phi_j)$ تابع الخطوة لتحديد فيما إذا كان سن التفريز في حالة القطع أم لا.

$$\left.\begin{aligned} g(\emptyset_j) = 0 \leftarrow \emptyset_j < \emptyset_{st}, \emptyset_j > \emptyset_{ex} \\ g\left(\emptyset_j\right) = 1 \leftarrow \emptyset_{st} < \emptyset_j < \emptyset_{ex} \end{aligned}\right\} \qquad (4-4)\ [76]$$

زاوية الطور عند الدخول والخروج بالنسبة لأداة القطع $\emptyset_{ex}, \emptyset_{st}$ بالترتيب.
سيتم إهمال المركبة الاستاتيكية لسماكة الرايش ($f \sin \emptyset_j$) لأنها لا تشارك في الحمل الديناميكي.
وبتعويض قيمة υ_j بالتالي تصبح المعادلة (4-1) على الشكل التالي :

$$h\left(\phi_j\right) = \left[\Delta x \sin \phi_j + \Delta y \cos \phi_j\right] g\left(\phi_j\right) \qquad (5-4)[76]$$

حيث أن $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$

(x_0, y_0), (x,y) يمثلان المسافة الديناميكية لأداة القطع خلال السن الحالي والسابق بالترتيب.
أي تم إيجاد علاقة سماكة الرايش الحقيقية في كل لحظة بدلالة الاحداثيات الديكارتية والوضع الزاوي $\emptyset_j$.

ثانياً: نمذجة قوى القطع المؤثرة في عملية التفريز:

يمكن إيجاد العلاقة الرياضية التي تصف قوى القطع بمعرفة مساحة الرايش غير المقطوع ومعاملات القطع.
يمكن في حالة التفريز الطرفي التعبير عن قوى القطع بناءً على زاوية الحلزنة واعتبار قوى القطع خطية أولا خطية. [75]
تم افتراض في الحالة المدروسة زاوية الحلزنة صفر لذلك تعطى قوة القطع بالعلاقات التالية:
في حال اعتبار قوة القطع خطية تُعطى بالعلاقة (4-6):

$$\left.\begin{aligned} F_t = (K_t h + K_{te}) a \\ F_r = (K_r h + K_{re}) a \\ F_a = (K_a h + K_{ae}) a \end{aligned}\right\} \qquad (6-4)[75]$$

في حال اعتبار قوة القطع لا خطية تُعطى بالعلاقة (4-7).

$$\left.\begin{aligned} F_t &= K_t a h^m \\ F_r &= K_r a h^m \\ F_a &= K_a a h^m \end{aligned}\right\} \qquad (7-4)[75]$$

K_t, K_r, K_a معاملات قوى القطع، F_t, F_r, F_a قوى القطع المماسي، القطري، المحوري بالترتيب، a عمق القطع، m معامل قوة أسية في حال اعتبار لا خطي وتساوي 0.8، سماكة الرايشh، K_{te}, K_{re}, K_{ae} معاملات قوى القطع عند حافة أداة القطع.

$F_{tj}F_{rj}$ قوى القطع المماسية والقطرية عند سن التفريز j.باعتبار القوة خطية والتركيبة درجتان حرية (محورانx,y)، وتعطى القوة المماسية والقطرية للتركيبة (20-8).

$$F_{tj} = K_t a h\left(\emptyset_j\right), F_{rj} = K_r F_{tj} \qquad (8-4)[75]$$

بتحويل الى المحاور الاحداثيات x,y

$$F_{xj} = -F_{tj}\cos\emptyset_j - F_{rj}\sin\emptyset_j \qquad (9-4)[75]$$

$$F_{yj} = +F_{tj}\cos\emptyset_j - F_{rj}\sin\emptyset_j \qquad (10-4)[75]$$

قوة القطع الكلية المؤثرة على أداة القطع على كل أسنان التفريز يمكن أن تكتب على الشكل التالي:

$$F_x = \sum_{j=0}^{N-1} F_{xj}(\emptyset_j), F_y = \sum_{j=0}^{N-1} F_{yj}\left(\emptyset_j\right) \qquad (11-4)[75]$$

باستخدام نموذج Altintas and Budakالذي يأخذ الاهتزازات المحرضة ذاتيا بعين الاعتبار وكما أن $\emptyset_j = \emptyset + j\emptyset_p$، الخطوة الزاوية $\emptyset_p = 2\pi/N$ وبتعويض سماكة الرايش المعادلة 5-4 والقوة في المعادلة 8-4 في المعادلة 9-4 و10-4واعادة ترتيب النتائج على شكل مصفوفة

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} a K_t \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \qquad (12-4)[76]$$

معاملات قوى القطع لعملية التفريز الديناميكية الاتجاهية تابعة للزمن كالتالي:

$$a_{xx} = \sum_{j=0}^{N-1} -g_i\left[\sin 2\phi_j + K_r(1-\cos 2\phi_j)\right]$$

$$a_{xy} = \sum_{j=0}^{N-1} -g_i\left[\left(1+\cos 2\phi_j\right) + K_r \sin 2\phi_j\right]$$

$$a_{yx} = \sum_{j=0}^{N-1} g_i\left[\left(1-\cos 2\phi_j\right) - K_r \sin 2\phi_j\right]$$

$$a_{yy} = -\sum_{j=0}^{N-1} g_i\left[\sin 2\phi_j - K_r\left(1+\cos 2\phi_j\right)\right] \qquad (13-4)[76]$$

وبما أن الوضع الزاوي(زاوية الطور)يتغير مع الزمن والسرعة الزاوية ويمكن تحويل المعادلة السابقة على شكل مصفوفة وفق ما يلي:

$$\{F(t)\} = \frac{1}{2} a K_t [A(t)]\{\Delta(t)\} \qquad (14-4)[76]$$

المعاملات الاتجاهية تختلف مع الزمن، حيث هذه القيمة تختلف حسب عملية التشغيل في حال كان تفريز أو خراطة حيث في حالة الخراطة يكون اتجاه قوة القطع ثابتة، ولكن في حال قوى التفريز فإن مصفوفة المعاملات الاتجاهية $[A(t)]$ دورية عند تردد المرور لسن التفريز $= \omega$ $N\Omega$ أو فترة المرور بالزمن $T = 2\pi/\omega$ ممكن أن يعبر عنها باستخدام متسلسلة فورييه.

$$[A(t)] = \sum_{r=-\infty}^{\infty} [A_r] \mathrm{e}^{-\mathrm{i}r\omega\mathrm{t}} \qquad (15-4)[76]$$

$$[A_r] = \frac{1}{T}\int_0^T [A(t)] \mathrm{e}^{-\mathrm{i}r\omega\mathrm{t}} dt \qquad (15-4)[76]$$

حيث r عدد التوافقات لتردد المرور لسن التفريز و لحساب القيمة الدقيقة $[A(t)]$ تتعلق بعدد أسنان التفريز ومقدار الدخول القطري لأداة القطع ، بالتقريب يعتبر r=0 حسب طريقة الحل الصفري ZOA [81] وبالتالي يصبح المعدل الوسطي لمكونات متسلسلة فورييه وفق مايلي:

$$[A_0] = \frac{1}{T}\int_0^T [A(t)] dt \qquad (16-4)[76]$$

حيث أن $[A_0]$ محققة فقط عندما تكون $\emptyset$ بين زوايا الدخول والخروج لأداة القطع $\emptyset_{st}$ $\emptyset_{ex}$ أي يعني $g_j(\emptyset_j) = 1$ وهي تساوي قيمة المعدل الوسطي ل$[A(t)]$ عند زاوية الخطوة الزاوية $\emptyset_p = 2\pi/N$

$$[A_0] = \frac{1}{T}\int_0^T [A(t)] dt = \frac{1}{\emptyset_p}\int_{\emptyset_{st}}^{\emptyset_{ex}} [A(\emptyset)] d\emptyset = \frac{N}{2\pi}\begin{bmatrix}\alpha_{xx} & \alpha_{xy}\\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy}\end{bmatrix} \qquad (17-4)$$

$$\alpha_{xx} = \frac{1}{2}[\cos 2\emptyset - 2K_r\emptyset + K_r \sin 2\emptyset]\Big|_{\emptyset_{st}}^{\emptyset_{ex}}$$

$$\alpha_{xy} = \frac{1}{2}[-\sin 2\emptyset - 2\emptyset + K_r \cos 2\emptyset]\Big|_{\emptyset_{st}}^{\emptyset_{ex}}$$

$$\alpha_{yx} = \frac{1}{2}[-\sin 2\emptyset + 2\emptyset + K_r \cos 2\emptyset]\Big|_{\emptyset_{st}}^{\emptyset_{ex}}$$

$$\alpha_{yy} = \tfrac{1}{2}[-\cos 2\emptyset - 2K_r\emptyset - K_r \sin 2\emptyset]\Big|_{\emptyset_{st}}^{\emptyset_{ex}} \qquad (18-4)$$

بالتالي المعادلة تختصر الى:

$$\{F(t)\} = \frac{1}{2} a K_t [A_0]\{\Delta(t)\} \qquad (19-4)[76]$$

حيث مصفوفة معاملات القطع الاتجاهية$[A_0]$ لا تتعلق بالزمن ولكن لها علاقة بمقدار الدخول القطري لأداة القطع،$[A_0]$ تصلح في حال وجود حلزنة بأداة القطع.

أي أنه تم استخدام احدى طرق التقريب (للتكامل) من أجل إيجاد القيم الوسطية المعبرة لمعاملات القطع الاتجاهية بدلالة معاملات القطع (التي تتعلق بأداة القطع ومادة المشغولة) وزوايا الدخول والخروج (التي تتعلق بطريقة التفريز) وبحذف علاقته بالزمن.

ثالثاً:رسم منحني الاستقرار بالطرق التحليلية :

يتم الاستفادة من تابع الاستجابة في رسم منحني الاستقرار بالطرق التحليلية وفق مايلي
مصفوفة تابع التحويل ($[\Phi(i\omega)]$) معرف في منطقة الاتصال أداة القطع-المشغولة

$$[\Phi(i\omega)] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}(i\omega) & \Phi_{xy}(i\omega) \\ \Phi_{yx}(i\omega) & \Phi_{yy}(i\omega) \end{bmatrix} \qquad (20-4)[76]$$

$\Phi_{yy}(i\omega)\Phi_{xx}(i\omega)$ تابع التحويل المباشر لكل من محور x,y $\Phi_{xy}(i\omega)$ $\Phi_{yx}(i\omega)$ تابع التحويل التقاطع أو المختلط.
شعاع الاهتزازات في اللحظة الزمنية الحالية (t)، وفي المرور السابق للسن التفريز (t-T)

$$\{r\} = \{x(t)y(t)\}^T; \{r_0\} = \{x(t-T)y(t-T)\}^T$$

شعاع الاهتزاز عند تردد الاهتزازات المحرضة ذاتيا ω_c وباستخدام طريقة مجال التردد والتوابع التوافقية.

$$\left.\begin{aligned} \{r(i\omega_c)\} &= [\Phi(i\omega)]\{F\}e^{i\omega_c t} \\ \{r_0(i\omega_c)\} &= e^{-i\omega_c T}\{r(i\omega_c)\} \end{aligned}\right\} \qquad (21-4)[76]$$

وباستبدل $\{\Delta\} = \{(x-x_0)(y-y_0)\}^T$ في المعادلة(4-21).

$$\{\Delta(\mathrm{i}\omega_c)\} = \{r(i\omega_c)\} - \{r_0(i\omega_c)\}$$

$$= \left[1 - e^{-i\omega_c T}\right]e^{i\omega_c t}[\Phi(i\omega_c)]\{F\} \qquad (22-4)[76]$$

حيث أن $\omega_c T$ هو عبارة عن طور التأخير بين الاهتزازات عند فترات المتعاقبة للأسنان التفريز Tوبتعويض$\{\Delta(\mathrm{i}\omega_c)\}$ في المعادلة (4-30):

$$\{F\}e^{i\omega_c t} = \frac{1}{2}aK_t\left[1 - e^{-i\omega_c T}\right][A_0][\Phi(i\omega_c)]\{F\}e^{i\omega_c t} \qquad (23-4)$$

يوجد حل غير صفري إذا كان المحدد يساوي الصفر كما في المعادلة التالية

$$det\left[[I] - \frac{1}{2}K_t a(1 - e^{-i\omega_c T})[A_0][\Phi(i\omega_c)]\right] = 0 \qquad (24-4)$$

يمكن أن تبسط مركبات المعادلة(4-24) مصفوفة تابع التحويل الاتجاهية هي جداء مصفوفة تابع التحويل(الاستجابة) بمعاملات القطع الاتجاهية.

$$[\Phi_0(i\omega_c)] = \begin{bmatrix} \alpha_{xx}\Phi_{xx}(i\omega_c) + \alpha_{xy}\Phi_{yx}(i\omega_c) & \alpha_{xx}\Phi_{xy}(i\omega_c) + \alpha_{xy}\Phi_{yy}(i\omega_c) \\ \alpha_{yx}\Phi_{xx}(i\omega_c) + \alpha_{yy}\Phi_{yx}(i\omega_c) & \alpha_{yx}\Phi_{xy}(i\omega_c) + \alpha_{yy}\Phi_{yy}(i\omega_c) \end{bmatrix} \quad 25-4$$

تفترض القيمة الذاتية (معامل مساعد يحتوي على عمق القطع الذي تهدف الدراسة لإيجاد قيمته) كالتالي:

$$\Lambda = -\frac{N}{4\pi} a K_t \left(1 - e^{-i\omega_c T}\right) \qquad (26-4)$$

تصبح المعادلة على الشكل التالي:

$$det\left|[I] + \Lambda[\Phi_0(i\omega_c)]\right| = 0 \qquad (27-4)[76]$$

يمكن حل هذه المعادلة بمعرفة تردد الاهتزازات المحرضة ذاتيا ω_c، معاملات قوة القطع الاستاتيكية(K_t, K_r) (تعتبر من مواصفات الخاصة بأداة قطع معينة ومادة مشغولة معينة) وبمعرفة مقدار الدخول القطري وطريقة التفريز يتم معرفة زوايا الدخول والخروج(ϕ_{st}, ϕ_{ex})، وبمعرفة تابع الاستجابة للتركيبة FRF، و في حالة درجتان حرية في جهة fالتغذية x والعامودي y و بافتراض $\Phi_{xy}, \Phi_{yx} = 0$ ، يمكن حل المعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية المعبرة عن النموذج الديناميكي على الشكل التالي:

$$a_0\Lambda^2 + a_1\Lambda + 1 = 0$$

$$a_0 = \Phi_{xx}(i\omega_c)\Phi_{yy}(i\omega_c)\left(\alpha_{xx}\alpha_{yy} - \alpha_{xy}\alpha_{yx}\right)$$

$$a_1 = \alpha_{xx}\Phi_{xx}(i\omega_c) + \alpha_{yy}\Phi_{yy}(i\omega_c) \qquad (28-4)$$

$$\Lambda = -\frac{1}{2a_0}\left(a_1 \pm \sqrt{a_1 - 4a_0}\right) \qquad (29-4)[76]$$

حل المعادلة من الدرجة الثانية يحتوي على جزء حقيقي وأخر تخيلي بحيث $\Lambda = \Lambda_R + i\Lambda_I$وبتعويض $e^{-i\omega_c T} = \cos\omega_c T - i\sin\omega_c T$

ومن خلال معرفة المعامل المساعد يمكن إيجاد عمق القطع الحرج (عند تردد الاهتزازات المحرضة ذاتياًω_c) يُعطى كالتالي:

$$a_{lim} = -\frac{2\pi}{NK_t}\left[\frac{\Lambda_R(1-\cos\omega_c T) + \Lambda_1\sin\omega_c T}{(1-\cos\omega_c T)} + i\frac{\Lambda_1(1-\cos\omega_c T) - \Lambda_R\sin\omega_c T}{(1-\cos\omega_c T)}\right] \qquad (30-4)[76]$$

بما أن عمق القطع الأعظمي المسموح به هو عدد حقيقي فإن الجزء التخيلي للمعامل المساعد(القيم الذاتية) يساوي الصفر.

$$\Lambda_1(1-\cos\omega_c T)-\Lambda_R\sin\omega_c T=0 \qquad (31-4)[76]$$

وبتعويض $(32-4)$ $\kappa=\frac{\Lambda_1}{\Lambda_R}=\frac{\sin\omega_c T}{(1-\cos\omega_c T)}$ وبالتالي فإن عمق القطع الأعظمي بدون اهتزازات محرضة ذاتيا:

$$a_{lim}=-\frac{2\pi\Lambda_R}{NK_t}\left(1+\kappa^2\right) \qquad (33-4)[76]$$

لذلك يمكن عند اعطاء قيمة تردد الاهتزازات المحرضة ذاتيا معرفة عمق القطع من المعادلة(33-4).كما أن سرعة القطع يمكن أن تحسب وفق ما يلي:
المسافة الزاوية الطور خلال زمن مرور لسن واحد(T) ومن المعادلة(32-4).

$$\omega_c T=\cos^{-1}\frac{\kappa^2-1}{\kappa^2+1}=-\cos^{-1}2\psi \qquad (34-4)[76]$$

زاوية الطور للقيمة الذاتية (المعامل المساعد) $\kappa=\Lambda_I/\Lambda_R=\tan\psi$ ، k عدد صحيح من أمواج الاهتزازية المطبوعة على سطح القطع.

$$\omega_c T=\pi-2\psi+2k\pi=\epsilon+2k\pi \qquad (35-4)[76]$$

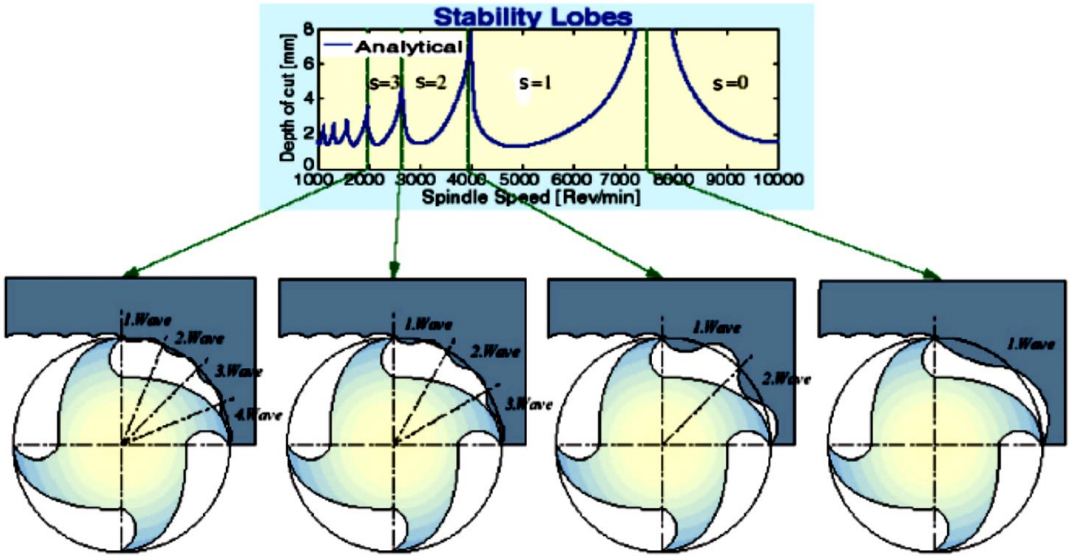
$$\epsilon=+2k\pi\ ,2\psi=\tan^{-1}\kappa$$

ϵ زاوية الطور بين (الأمواج المتولدة على سطح التشغيل الناتج عن العملية السابقة والحالية).

(ملاحظة بما أن الجزء الحقيقي من القيم الذاتية$\Lambda_R<0$ لذلك لابد من اضافة π الى2ψ في الحسابات الرقمية)

سرعة التشغيل n تحسب بطريقة بسيطة بمعرفة زمن المرور $T_{(s)}$

$$T=\frac{1}{\omega_C}(\epsilon+2k\pi)\longrightarrow n=\frac{60}{NT}=\frac{60\omega_C}{N(\epsilon+2k\pi)}\ rpm \qquad (36-4)[76]$$



الشكل(4-4) يبين k عدد الأمواج الاهتزازية المطبوعة على سطح القطع والاستفادة منه في رسم منحني الاستقرار[88].

خلاصة:في حال معرفة تابع الاستجابة ومعرفة المعاملات الاتجاهية $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}$ من أجل أداة قطع معينة ومادة المشغولة ومقدار الدخول القطري يمكن رسم منحني الاستقرار بطريقة تحليلية وفق مايلي:

1- اختيار تردد الاهتزازات المحرضة ذاتيا من تابع التحويل .
2- ايجاد القيم الذاتية بحل المعادلة (4-28).
3- حساب عمق القطع الحرج من المعادلة (4-33).
4- حساب سرعة القطع من المعادلة (4-36) لكل حلقة k=0.1.2.3.
5- تكرر العملية لكل ترددات الاهتزازات المحرضة ذاتيا المكتشفة من تابع التحويل[76] [77] [78] [23] [81].

الفصل الخامس:

استخدام الميكرفون في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً

الفصل الخامس: استخدام الميكرفن في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً

5-1 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

سيتم التطرق في هذا الفصل الى التقنيات المستخدمة في كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً بشكل عام، وسيتم استخدام الميكرفون باعتباره حساس صوتي بشكل خاص.

5-1-1 الاعتبارات الأساسية في اختيار الحساس لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

تُعد عملية اختيار الحساس المناسب لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً عملية حدية حرجة، مما يلزم الباحث اجراء دراسة شاملة لعملية التشغيل المدروسة واختيار الحساس المناسب.
يجب أن يُدقق في اختيار الحساس من أجل الحصول على الأداء الأمثل كونها تؤثر على كفاءة عملية المراقبة والتحكم من المعايير في الاختيار هي :

- **الخصائص الذاتية للحساس.**
- **مكان وضع الحساس من أجل إجراء عملية القياس.**

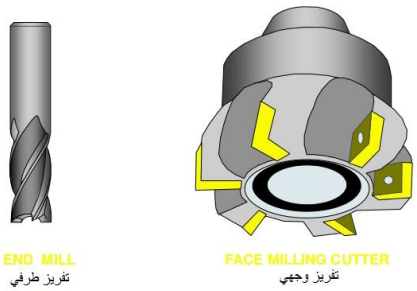
5-1-1-1 الخصائص الذاتية للحساس:

يوجد عدة عوامل تشكل الخصائص الذاتية للحساس مثل (الدقة، الموثوقية، عرض مجال الترددات، المتانة...الخ).

1-عرض مجال التردد الذي يقيس ضمنه الحساس يعتمد على:

- مقدار الترددات الطبيعية (الذاتية) للتركيبة ويُقصد بها [أداة القطع، حامل أداة القطع، السبيندل (عامود الدوران الرئيسي)]، يمكن الحصول على القيم الذاتية اما بطريقة المحاكاة (العناصر المنتهية) أو عن طريق تجربة (المطرقة الاهتزازية-حساس التسارع) لإيجاد تابع التحويل وبالتالي معرفة الترددات الطبيعية أو الذاتية للتركيبة.
- طبيعة المشغولة المراد تشغيلها أي في حال تشغيل مشغولات ذات كتل كبيرة وتثبيت جيد تكون الجساءة عالية أما في حال تشغيل سطوح رقيقة أو الأعصاب تكون الجساءة ضعيفة.

حسب الحالة المدروسة يتم اختيار مجال التردد المطلوب الذي يُغطي قيم الترددات الطبيعية.
على سبيل المثال في حال التفريز الطرفي يتطلب حساس يكون مجال الترددات مرتفع بالمقارنة مع التفريز الوجهي



الشكل (1-5) يبين أداة القطع في حال التفريز الطرفي والوجهي

2-مجال القياس.
3-الحساسية.
4-الدقةResolution .
5-قيمة الإشارة بالمقارنة الضجيج (S/N) (signal/noise).

2-1-1-5 مكان وضع الحساس:

بالنسبة لتموضع الحساس فإنه يوجد نوعان:

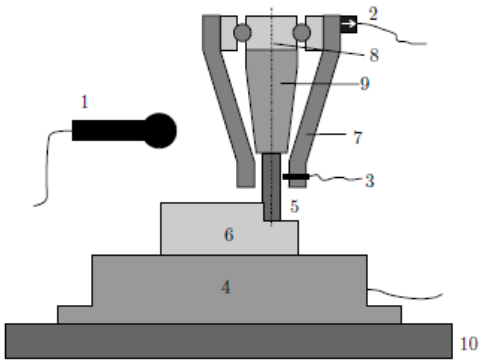
1-حساس باتصال مباشر يكون كل من الحساس والمنطقة المُقاسة باتصال مادي مباشر أي يُوضع الحساس على المنطقة المقاسة بتماس مباشر، من الحساسات التي تكون على اتصال مباشر

- حساس قوة القطع (ديناموميتر) حيث يُوضع تحت المشغولة.
- حساس قياس المسافة أو التسارع يُوضع على أداة القطع أو على حامل أداة القطع أو على غلاف عمود الدوران، مع الأخذ بالاعتبار أن الازاحة سوف تكون عند أداة القطع أعلى بالمقارنة مع المكانان الأخران.

2-حساس بدون اتصال مباشر يتم القياس في هذه الطريقة عن بعد ومن الحساسات التي تكون بدون اتصال مباشر:

- حساس التسارع أو المسافة باستخدام تقنية الليزر(LDV (laser Doppler vibrometer
- الميكرفون أو الأمواج فوق صوتية.

يوجد عوامل إضافية تحدد أي من الحساسات يُفضل استخدامها مثل (شكل الرايش الصادر وسوائل التبريد وعوامل أخرى) حيث تؤثر في اختيار مكان وضع الحساس وبالتالي اختيار الحساس المناسب لهذا التطبيق.



1-الميكرفون 2-حساس تسارع 3- حساس تيار ايدي 4- حساس القوة ديناموميتر 5-أداة القطع 6-المشغولة 7-غطاء السبيندل 8-السبيندل 9- حامل أداة القطع 10- فرش ألة التشغيل.
الشكل رقم (2-5) يبين مكان وضع بعض الحساسات على الفارزة [93]

2-1-5 الحساسات المستخدمة في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

هناك طيف واسع من الحساسات يمكن أن تُستخدم في كشف الاهتزازات حيث تقسم بحسب الاستجابة المُقاسة الى:

- حساس يقيس المسافة (الازاحة) أو السرعة أو التسارع (بمجرد معرفة أحد هذه البارامترات يمكن الحصول على الأخر من خلال تكامل أو اشتقاق).
- حساس يقيس القوة أو العزم أو شدة التيار المسحوب.

كما تُقسم وفق المبدأ المستخدم في القياس الى:

- الطريقة الصوتية.
- الطريقة الضوئية.

- طريقة الكهرو ضغطي.

من الحساسات:

5-1-2-1حساس قياس القوى:

يُستخدم حساس قوة القطع من أجل كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً، ويُستخدم أيضاً في مراقبة تأكل أداة القطع وانكسارها. أول من استخدم هذا الحساس في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً هو الباحث smith عام 1987.

يبين الشكل رقم (3-5) عدة أنواع لحساس القوى، منها حساس القوى الذي يُوضع على طاولة التشغيل تحت المشغولة ويُستخدم في عملية التفريز، حساس القوى يُركب على السبيندل(عامود الدوران الرئيسي) ويُستخدم في عمليات التثقيب والتفريز، كما أنه يوجد حساس قوى يستخدم لعملية الخراطة كما يبين الشكل (3-5).

الشكل رقم (3-5) حساس قوى القطع وأنواعه

الاعتبارات التي يجب أن تؤخذ عند استخدام حساس قياس قوة القطع:

- حساس قوى القطع يصبح جزء من التركيبة (أداة القطع-حامل أداة القطع-السبيندل) وبالتالي يغير من الخصائص الديناميكية لها مما يؤدي الى تعديل القيمة المعيارية لجهاز قياس قوة القطع (التردد الذاتي للجهاز)، حيث تكون محسوبة بالاعتماد على كتلة الحساس فقط وعند إضافة كتلة المشغولة تصبح القيمة المعيارية أصغر.
- يستخدم هذا الحساس في التطبيقات التي يكون فيها التردد الذاتي للتركيبة منخفض، على سبيل المثال في حال التشغيل الطرفي يكون التردد الذاتي أكبر من 1000هرتز، والقيمة المعيارية لهذا الحساس أقل 1000هرتز، لذلك لا يصلح للعمليات التشغيلية التي يكون فيها التردد الذاتي أكبر من 1000هرتز، يُمكن أن يستخدم هذا الحساس في حال التفريز الجبهي.

- عند تشغيل مواد ذات قساوة منخفضة مثل الألمنيوم فإنه يجب أن تكون حساسية الحساس كافية لقياس قوى القطع الصغيرة. في هذه الحالة تصبح نسبة الإشارة للضجيج SNR صغير فلا يمكن تمييز فيما إذا كانت حالة قطع أولا قطع أو اهتزازات محرضة ذاتياً.
- زمن عمل الحساس هو الزمن الذي تكون فيه أداة القطع والمشغولة في اتصال مباشر. يقوم الحساس بتسجيل قوة القطع فقط في حالة الاتصال المباشر وعندما لا يوجد اتصال فيكون الحساس بدون عمل.

في حالة التشغيل النهائي يكون مقدار الدخول القطري لأداة القطع صغير، 10 بالمئة وأقل من قطر أداة القطع وبالتالي فإنه يتم دخول وخروج أداة القطع خلال زمن قصير جداً. وعند استخدام حساس.

- القوى فإنه لا يمكن التمييز بين ترددات مرور أداة القطع وتردد الاهتزازات المحرضة ذاتياً ، لذلك لا يستخدم حساس القوى في عمليات الانهاء، ولكن يمكن استخدام حساس المسافة أو السرعة أو التسارع كونه يُعطي إشارة مستمرة حتى بعد خروج أداة القطع، لذلك تعد هذه الحساسات أكثر فعالية لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً في عمليات الانهاء.

5-1-2-2-حساس التسارع:

عندما يُذكر حساس التسارع فإنه يشمل حساس المسافة والسرعة كون أنه بمعرفة أحد هذه القيم يمكن معرفة الباقي من خلال التكامل والاشتقاق.

المشكلة الرئيسية في استخدام حساسات السرعة أو المسافة أو التسارع تكمن في:

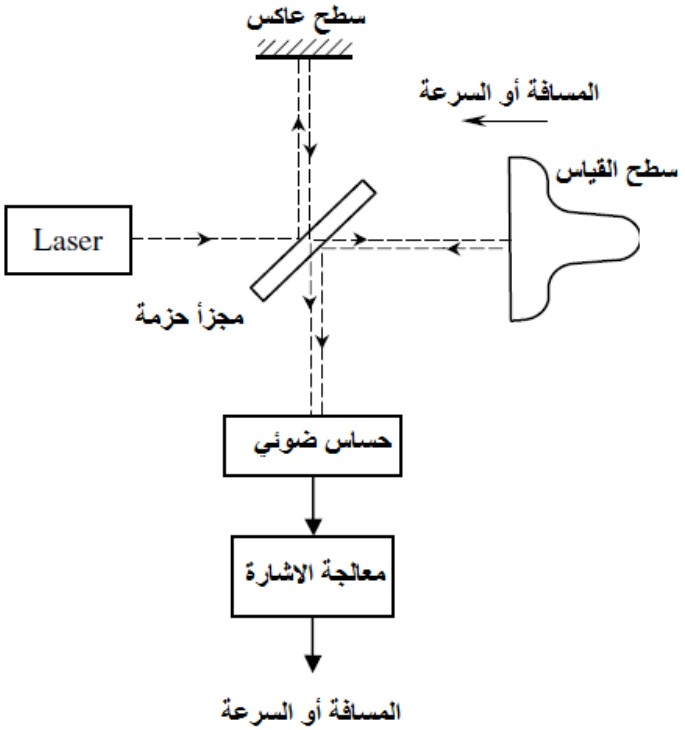
- مكان تموضع الحساس، فعندما يتم مراقبة الاهتزازات أثناء التشغيل فإنه من غير الممكن تركيب الحساس على الأجزاء الدورانية وبالتالي اما أن يُوضع على غطاء السبيندل (عامود الدوران الرئيسي) أو على المشغولة.
- يعتبر تحديد النقطة التي يتم قياس الاهتزاز فيها عملية معقدة خوفاً من أن تكون النقطة المُقاسة هي عقدة اهتزاز.

من أجل معرفة مكان هذه العقد يتطلب ذلك معرفة السلوك الديناميكي للتركيبة، يُقصد بالسلوك الديناميكي للتركيبة (مودات الشكل (شكل الاهتزاز) و الترددات الطبيعية)، ولكن { تغيير أداة القطع (القطر-الطول الحر)-شكل وأبعاد المشغولة-طبيعة الاتصال بين السبيندل(عامود الدوران الرئيسي) وحامل أدوات القطع (أنواع المكوك)-بارامترات التشغيل } تؤدي الى تغيير السلوك الديناميكي، وبالتالي ينتج عنه عدد لا نهائي من الترددات و مودات الشكل (أماكن توضع عقد الاهتزاز). نظراً لتبدل أماكن عقد الاهتزاز أثناء التشغيل يُفضل استخدام حساسي تسارع على محوري القطع كحد أدنى.

حساس التسارع الذي حُددت مشاكله هو حساس التسارع الكهرو ضغطي (البيزو الكتريك) مبين في الشكل رقم (4-5).

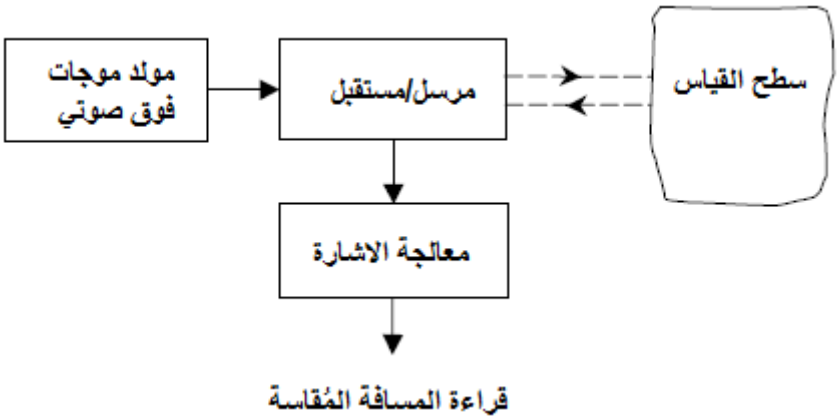
الشكل(4-5) حساس تسارع بيزوالكتريك.

لحل المشاكل السابقة يُمكن استخدام حساسات تسارع تعطي مودات الشكل أثناء التشغيل بشكل مباشر وتعتمد على الليزر ويدعى:"Laser Doppler vibrometry"
تعتبر تكلفة الجهاز عالية جداً ولكن الميزة الأساسية هي عدم وجود اتصال مباشر يبين الشكل(5-5) مبدأ دوبلر.
بالاستفادة من مفهوم الليزر من كونه عبارة عن موجة ذات تردد وحيد قد يكون ضوئي أو فوق بنفسجي أو تحت الأحمر ولكن بطول موجة واحد وزاوية طور واحدة، حيث يقوم مبدأ دوبلر على أنه يصدر جهاز ليزر موجة يمكن باستخدام مجزأ حزمة تقسيم الموجة الى موجتين متطابقتين أحد الموجتين الناتجتين تنعكس على سطح عامودي عياري (ثابت) والموجة الثانية تتجه نحو الهدف (السطح المتحرك) وحسب مبدأ دوبلر فإن الموجة المنعكسة تختلف بالطور عن المرسلة ومن ثم يتم تداخل الموجتان المنعكستان وباستخدام كاشف ضوئي تتشكل عليه الأهداب المظلمة والمضيئة وباستخدام وحدة معالجة يمكن تحديد قيمة التسارع كما يبين الشكل(5-5).



الشكل (5-5) مبدأ حساس التسارع بالاعتماد على الليزر.[95]

وبنفس الأسلوب الذي يعتمد على تداخل الموجات المرسلة والمستقبلة يمكن حساب التسارع باستخدام أمواج فوق صوتية كما يبين الشكل (5-6)



الشكل(6-5) مبدأ حساب التسارع بالاعتماد على الأمواج فوق صوتية.[95]

5-1-2-3 الميكرفون:

أثناء عملية التفريز ونتيجة للتصادم بين أداة القطع والمشغولة ونقص الصلادة الديناميكية تُحرض اهتزازات، على عدة أشكال، اهتزازات حرة، قسرية، محرضة ذاتياً.
الاهتزازات تنتقل عبر الهواء وتولد صوت، هذا الصوت يحتوي معلومات عن عملية التفريز، أهم ما يميز استخدام الميكرفون كحساس صوتي لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

- التكلفة البسيطة بالمقارنة مع الطرق السابقة.
- مجال قياس الترددات (عرض المجال) واسع، بشكل نموذجي بين 100-13000 هرتز وبالتالي يشمل تطبيقات كثيرة، فقط الآلات الضخمة جداً وعدد قليل منها تكون أقل من 100هرتز، أما أغلب التطبيقات تكون أعلى من 100 هرتز مما يعطي الميكرفون كحساس مرونة عالية، وفعالية عند التشغيل بسرعات عالية (ترددات عالية).

يُعزى الصوت الصادر عن عملية التشغيل لمصدرين أساسين:

- مصدر رئيسي الناتج عن آلة التشغيل:
- الناتج عن عملية القطع (وهو المطلوب دراسته).
- الناتج عن آلة التشغيل مثل دوران أداة القطع، محرك عامود الدوران الرئيسي(السبيندل) ، نظام نقل الحركة من المحرك الى عامود الدوران، الرولمانات، ألية سحب الرايش من آلة التشغيل.... الخ، يُدعى الضجيج الناتج عن عمل آلة التشغيل بدون عملية القطع بمصطلح ضجيج الألة المرجعي.
- مصدر ثانوي هو الضجيج الصادر عن البيئة المحيطة مثل ضاغط هواء أومن آلات مجاورة أومن خارج غرفة الألة.

من أجل تحليل الإشارة الصوتية الناتجة عن عملية القطع يتم فصلها عن باقي المصادر من خلال استخدام تقنيات تُدعى "الاتجاهية أو العزل".
ومنها التجميع و التخميد و الشدة[82][86].

5-1-2-3-1 طرق فصل أو عزل الإشارة الصوتية الناتجة عن عملية القطع:

1-طريقة التخميد:

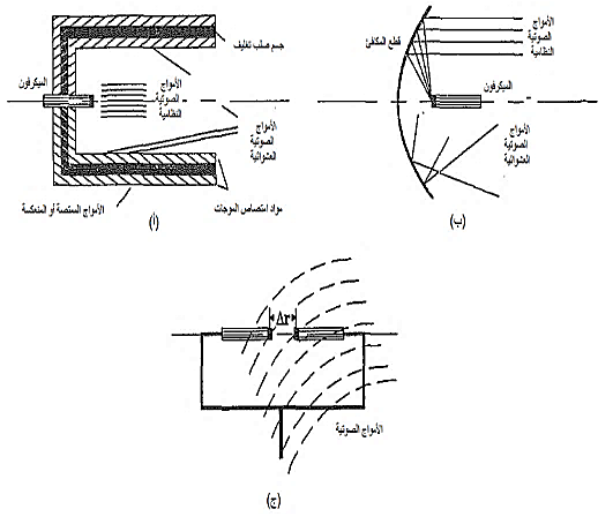
من أجل استخدام طريقة التخميد يوجد عاملان هامان هما **التردد والمادة المستخدمة**.
توجد جداول قياسية تعطي مقدار معامل الامتصاص (التخميد للصوت)، ولكن هذه القيمة مرتبطة بتردد الصوت فمعظم هذه المواد تقل فعاليتها عند الترددات المنخفضة، فمثلاً معامل الامتصاص لمادة بولي يوريتان الرغوي polyurethane foam α=0.98 عند تردد صوت 2000هرتز، أما عند تردد صوت 500هرتز يُصبح معامل الامتصاص α=0.38. بما أن ضجيج الألة المرجعي يحتوي ترددات بين 160-300 هرتز الناتجة عن المحركات الكهربائية أو المراوح، بالتالي لا تستطيع هذه الطريقة تخميد بعض ترددات ضجيج الألة المرجعي بشكل فعال.
يبين الشكل (7-5-أ)استخدام طريقة التخميد.

2-طريقة التجميع:

تتم هذه الطريقة بالاعتماد على مواد صلبة تكون على شكل قطع مكافئ بحيث تنعكس الموجات الصوتية بعد اصطدامها بالقطع المكافئ وتتجمع بالمحرق (حيث يوجد الميكرفون).
يكون مكان القطع المكافئ مقابل مصدر الصوت. يجب أن تكون أبعاده (القطر) كافي لتجميع الإشارات المطلوبة ويتعلق ببعده عن مركز صدور الموجات الصوتية. تعد هذه الطريقة غير فعالة عند الترددات الصغيرة.
يبين الشكل (7-5-ب) طريقة التجميع.

3-طريقة شدة الصوت:

شدة الصوت هي عبارة عن شعاع له اتجاه معين وقيمة معينة، وتنتج من جداء ضرب ضغط الصوت بسرعة الجزيئات في الوسط. يُقاس ضغط الصوت بسهولة بواسطة ميكرفون واحد أما سرعة الجزيئات تُقاس بواسطة ميكرفونان بينهما مسافة معينة كما هو مبين بالشكل(7-5-ج).



الشكل(7-5) يُظهر طرق العزل[82]

تُحسب القيمة الأنية لشدة الصوت بالاعتماد على المعادلة الرياضية (1-5) (قانون ايلر):

$$I = -\frac{1}{2\rho\Delta r}(p_a + p_b)\int (p_b - p_a)dt \quad (1-5)\ [82]$$

p_b وp_a ضغط الصوت عند النقطتين a,b، Δr المسافة بين الميكرفونان، ρ كثافة الوسط.
وبما أن الصوت ذو طبيعة موجية فإنه يتم تحليل الطيف بإحدى الطرق:

- طريقة الزمن تكون النتائج بدلالة الزمن كما في الشكل(5-14)
- طريقة التردد تكون النتائج بدلالة التردد كما في الأشكال(5-17)(5-18)(5-19)(5-20).

تُستخدم طريقة التردد في تحليل الطيف، لتُعطي شدة أو كثافة الصوت بالمعادلة (5-2):

$$I = -\frac{1}{\rho\omega\Delta r}\,Im(G_{ab}) \qquad (2\text{-}5) \quad [82]$$

تُعتبر هذه الطريقة أفضل من الطرق السابقة بسبب سهولة تركيبها وإمكانية المناورة (التعديل)، من خلال المسافة بين الميكروفونان (يجب أن تكون 20 % من أقصر طول موجة صوت)، ومن خلال معرفة قيمة التردد المطلوب لحدوث التجاوب، تعدل المسافة وبالتالي يكون مجال التردد من 125 هرتز الى 6000هرتز.[82]

5-1-2-3-2 الطرق المستخدمة في كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

1-الطريقة التي تعتمد على مطال الاشارة:

تُعتبر من أبسط الطرق في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً، تعتمد الطريقة على تثبيت قيمة لضغط الصوت أو المسافة أو القوة ...الخ، تُدعى القيمة الحدية (العتبة) وبعد تجاوز هذه القيمة تحدث الاهتزازات المحرضة ذاتياً كما هو مبين في الشكل (5-8)، تكون الصعوبة في هذه الطريقة بالوسيلة المستخدمة في تحديد قيمة العتبة.

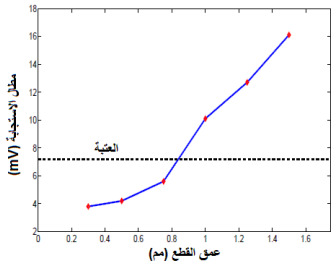
يوجد عدة أساليب لتحديد العتبة، أولها بالاعتماد على time domain يكون بتسجيل قيمة الضغط (مطال الاشارة) في حالة التشغيل المستقر ومقارنتها مع القيمة المسجلة عند التشغيل غير المستقر، وبالتالي يتم الحصول على قيمة تقريبية للعتبة، علي سبيل المثال يبين الشكل (5-9) مقدار إزاحة أداة القطع أثناء عملية التشغيل باستخدام حساس المسافة، حيث يبين الشكل(5-9) مقدار استجابة الحساس في حال التشغيل المستقر وغير المستقر، فمثلاً عند عمق قطع 0.1 mm حتى0.8 mm تكون استجابة الحساس كما في الشكل (5-8)ولكن عند 1 mm تصبح الاستجابة كما في الشكل وبالتالي يشكل 0.8mm عتبة . أسلوب أخر بالاعتماد على طريقة طيف الترددات الاستعانة بطيف الترددات حيث يوجد تردد يكون فيه المطال أعظمي، تُحفظ هذه القيمة، ومن ثم يتم حساب القيمة الوسطية لمطال كافة الترددات باستثناء قيمة مطال القمة، ثم يُضرب الوسطي بمعامل من 6-10 إذا تجاوزت قيمة القمة (أكبر مطال) عندها تكون حالة اهتزازات محرضة ذاتياً، وكذلك تكمن الصعوبة في تحديد مقدار هذا المعامل.

2-الطريقة التي تعتمد على مكونات التردد:

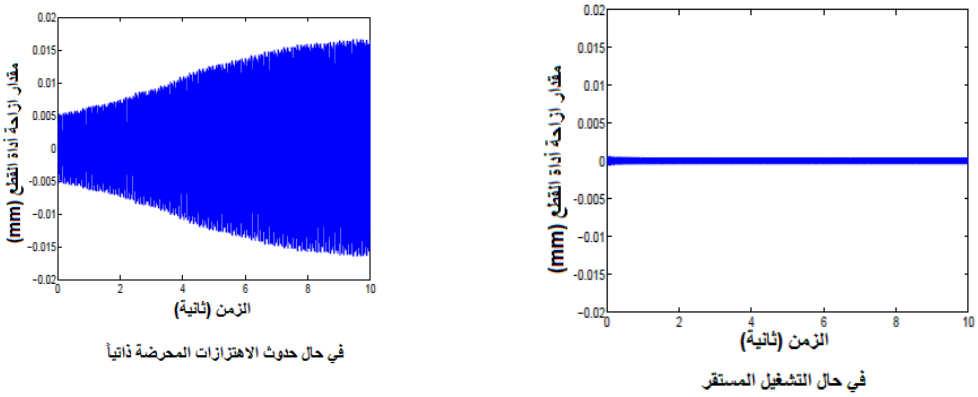
تقوم هذه الطريقة على دراسة طيف الترددات للإشارة (الصوتية)، يتم الحصول على طيف الترددات بإجراء تحويل فورييهFFT.

تعتمد هذه الطريقة على أن مكونات التردد للطيف تختلف في التشغيل المستقر عن غير المستقر. في حال كان التشغيل مستقر فإن القمم التي تظهر على الطيف هي تردد مرور أداة القطع، وتردد سرعة دوران أداة القطع وتوافقاتها(هرموني)، وبعض القمم الناتجة عن ضجيج الآلة المرجعي.

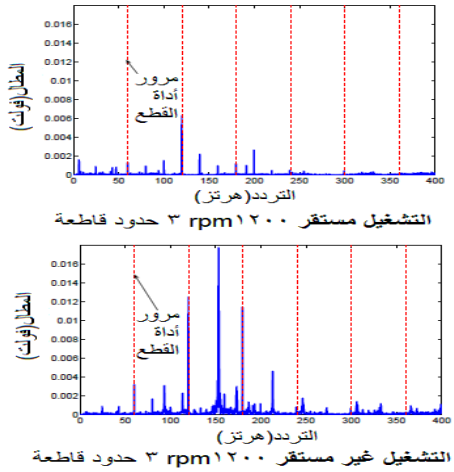
تتطلب هذه الطريقة معرفة سرعة التشغيل وعدد اللقم (الحدود القاطعة) لأداة القطع، أما في حال كان التشغيل غير مستقر فإنه تظهر قمة ذات مطال كبير بالقرب من التردد الذاتي للتركيبة هذه القمة تدل على ظهور الاهتزازات المحرضة كما هو مبين في الشكل (10-5). [86]



الشكل(8-5) يبين الطريقة التي تعتمد على مطال الاستجابة[86]



الشكل(9-5) يبين مقدار إزاحة أداة القطع[86]



الشكل (10-5) يبين الطريقة التي تعتمد على مكونات التردد[86]

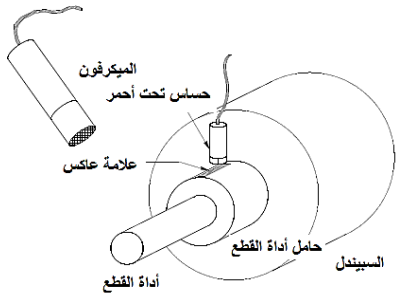
3-الطريقة الإحصائية:

تم اقتراح الطريقة الإحصائية لإنقاص كمية البيانات التي تتم معالجتها حيث يتم تسجيل قيمة ضغط الصوت أو المسافة أو القوة خلال كل دورة للأداة ومعرفة مقدار التباين في القيمة بين كل دورة عن الوسطي. يتم معرفة كل مرور باستخدام حساس تحت أحمر يتحسس لعلامة عاكس تُوضع على أداة القطع كما يبين الشكل (11-5).

يُحسب التفاوت بالعلاقة الرياضية رقم (3-5):

$$\sigma^2=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i^2-x_m^2)}{N-1} \qquad x_m=\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i}{N} \quad (3\text{-}5)\ [85]$$

حيث أن x_i القيمة المسجلة حالياً، x_m القيمة الوسطية، N عدد التجارب. وبتثبيت قيمة التفاوت الحدية والتي بعدها تحصل الاهتزازات المحرضة ذاتياً (عتبة الاستجابة)، يكون التشغيل مستقر طالما كانت قيمة التفاوت أقل من العتبة.



الشكل (11-5) يبين الطريقة الإحصائية[85]

2-5 الإجراء التجريبي:

استخدام الميكرفون في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً ورسم منحني الاستقرار بالاعتماد على طريقة خريطة الصوت.

تم اجراء التجارب في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، وتم اجراء محاولة لكشف هذه الاهتزازات بالامكانات المتوفرة في جامعة دمشق وتم ذلك من خلال طريقتين، الطريقة الأولى باستخدام الليزر وأما الثانية باستخدام الميكرفون، وذلك وفق دراسة حالة case study .ظروف التجربة تم وفق مايلي:

- العينة المستخدمة من معدن الألمنيوم 5456.
- تفريز طرفي هابط.
- التغذية 400mm/min.
- قطر أداة القطع 12mm وبطول حر 4.2cm حدين قاطعين.
- مقدار دخول أداة القطع في الاتجاه القطري 80% من قطر الأداة.
- بدون سائل تبريد.

تم اجراء التجارب على عينة من الألمنيوم باستخدام التحليل الطيفي حيث **نسبة الألمنيوم Al >93.3%** أما باقي العناصر مبينة في الجدول التالي:

Zn	Ni	Mn	Fe	Hg
0.220	0.030	1.00	0.461	0.015
Co	Cd	Bi	Ba	Ag
0.018	0.0001	0.050	0.0050	0.0036
V	Sn	Pb	Na	In
0.015	0.092	0.072	0.0022	0.019
Ti	Aa	Ma	Cu	Si
0.030	0.0036	3.52	0.035	0.237
Ga	Ce	Ca	Bc	B
0.018	0.031	0.0039	0.0023	0.0037
Zr	Sr	Sb	P	Li
0.0049	0.124	0.092	0.001	0.378

وبالتدقيق بالجداول العالمية تبين أن رقم عينة الألمنيوم 5456. تم اجراء اختبار القساوة للعينة

رقم التجربة	1	2	3	4	5	الوسطي
HRA	23.4	23.2	23.1	21.9	23.2	22.96

5-2-1 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الليزر:

تم اختبار الطريقة الضوئية من أجل كشف الاهتزازات المحرضة ذاتيا حيث تم تنفيذ التجربة على طاولة اختبار ضمن المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته ومن ثم نقل التجربة لتطبيقها على آلة التفريز CNC في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية كما يبين الشكل (12-5).

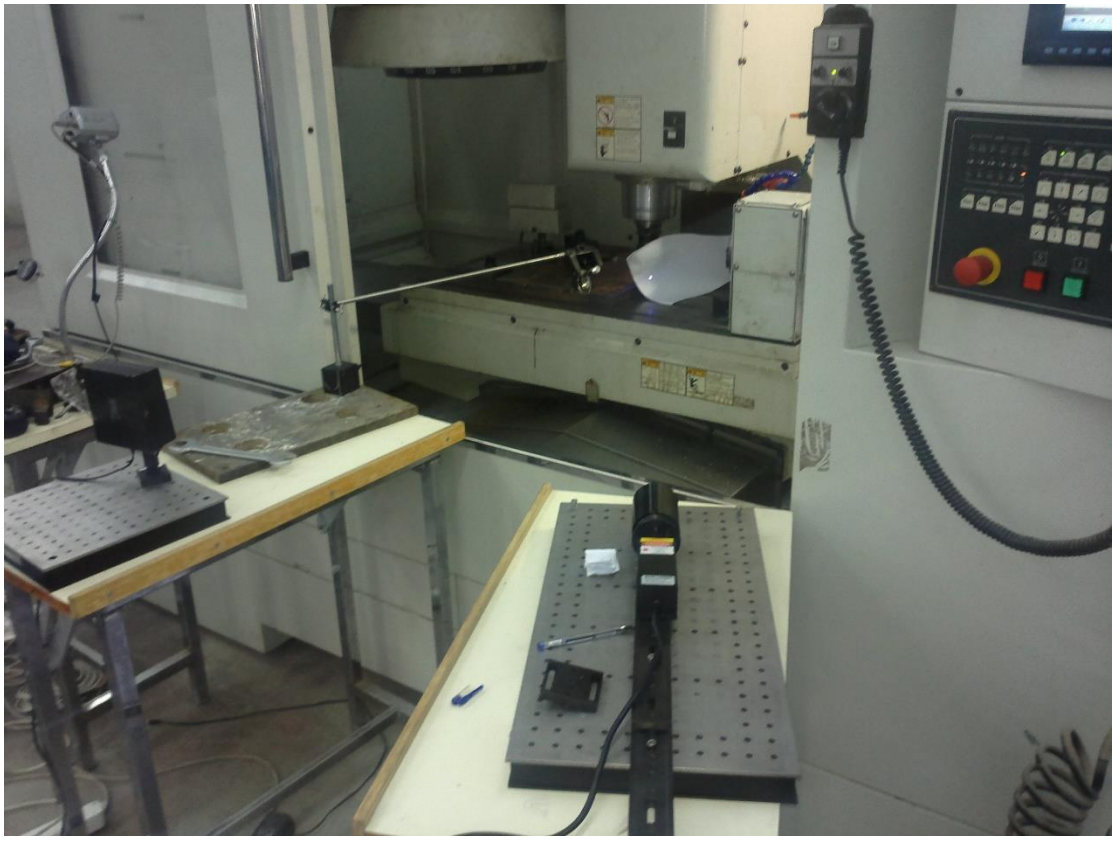
تم اختبار ليزر هيليوم نيون632nm أحمر باستطاعة 5mW وليزر ديود أزرق 405nmباستطاعة155mW، psdحساس قياس مسافة مع دارة معالجة hamatusu، عدسات محدبة ذات أبعاد مختلفة، موسع حزمة.

تهدف التجربة للحصول على مطال الاهتزاز لأداة القطع أثناء عملية التشغيل حيث تتم من خلال ارسال شعاع ليزر بقطر أصغر ما يمكن وأن تكون الحزمة متوازية (مع ملاحظة أن سطح أداة القطع على شكل قوس مما يؤدي لزيادة الانفراج) يتم تجميع الشعاع المرتد عن أداة القطع بواسطة عدسة لمعرفة مقدار الازاحة لأداة القطع أثناء التشغيل باستخدام حساس قياس المسافة PSD. تم اختيار مكونات التجربة بالاستفادة من قانون جودة الليزر

$$\mathrm{d}_0 = \frac{4f\lambda m^2}{\pi D_0} \quad (4-5)$$

λطول موجة ليزر$[\mu m]$ mعامل غاوس[عددثابت]

d_0القطر المطلوب$[mm]$ D_0قطر الليزر الداخل على العدسة$[mm]$ fالبعد المحرقي للعدسة$[mm]$



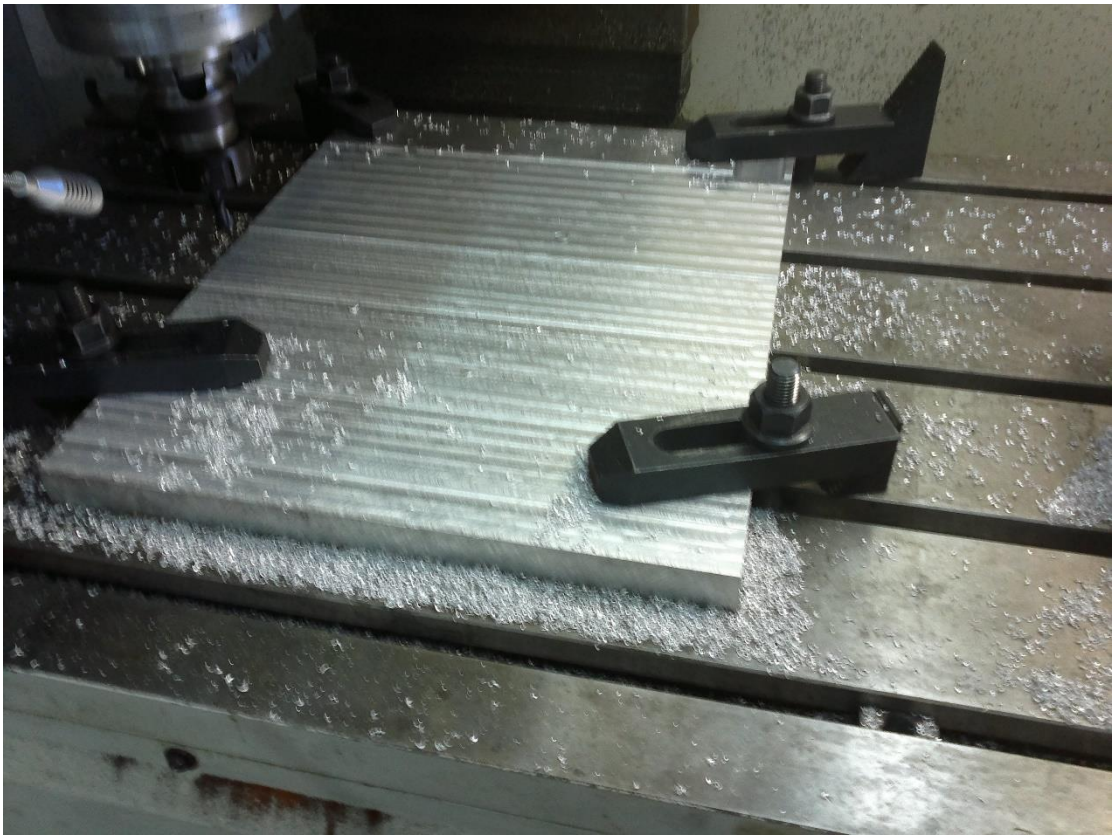
الشكل(12-5) الطريقة الضوئية لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً

يتم الحصول على أصغر قطر لشعاع الليزر بزيادة قطر شعاع الليزر الداخل الى العدسة المحدبة. كما يتطلب الحصول على حزمة متوازية لذلك لابد من استخدام (عدستان محدبتان أو موسع حزمة) بحيث تكون العدسة المحدبة الثانية في محرق العدسة المحدبة الأولى.
تمت معايرة التجربة من خلال رصف العدسات مع الحساس فتم الحصول على نتائج في المعهد العالي لبحوث الليزر ولكن أثناء الانتقال الى بيئة عمل الفارزة CNCالموجودة في كلية الهمك كان

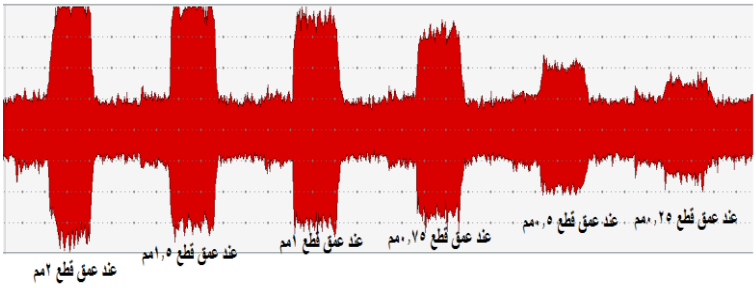
يوجد معوقات حيث لا يمكن الحصول على تعتيم كامل الأمر الذي كان يؤدي الى تشتت كبير في الاستطاعة وحساس المسافة PSD له عتبة استجابة مما تعذر الحصول على النتائج.
لذلك أقترح من أجل الحصول على نتائج وفق هذه الطريقة
توفر جهاز ليزر يعطي حزمة متوازية بقطر أقل من $50\ \mu m$ حيث يكون مزود بحجرة تحتوي على مجموعة من العدسات. توفر عدسات بمزايا تصنيعية عالية تحافظ على الاستطاعة.
ونظراً لعدم تمكن الباحث من الحصول على نتائج بهذه الطريقة تم استخدام الميكرفون كحساس صوتي لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً. [94]

5-2-2 كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الميكرفون:

بشكل موجز تم استخدام الميكرفون في تسجيل الصوت أثناء عملية التشغيل ومن ثم تم معالجة هذا الصوت باستخدام برنامج labview حيث تم تحويل شكل الإشارة من تابعة للزمن time domain كما يبين الشكل(5-14) الى تابعة للتردد frequency domain باستخدام تحويل فورييه FFT وبتطبيق خوارزمية معينة لكشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً سيتم شرحها لاحقاً وتم التحقق من صحة النتائج بقياس خشونة السطح ومقارنتها بالجداول القياسية، تمت هذه الاستراتيجية لكل زوج من القيم لكل من سرعة القطع وعمق القطع وبالاعتماد على طريقة خريطة الصوت تم رسم منحني الاستقرار لمجال محدود من السرعات وعمق القطع بشكل تجريبي، الشكل (5-13) يبين استخدام طريقة تحليل الصوت في كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً.



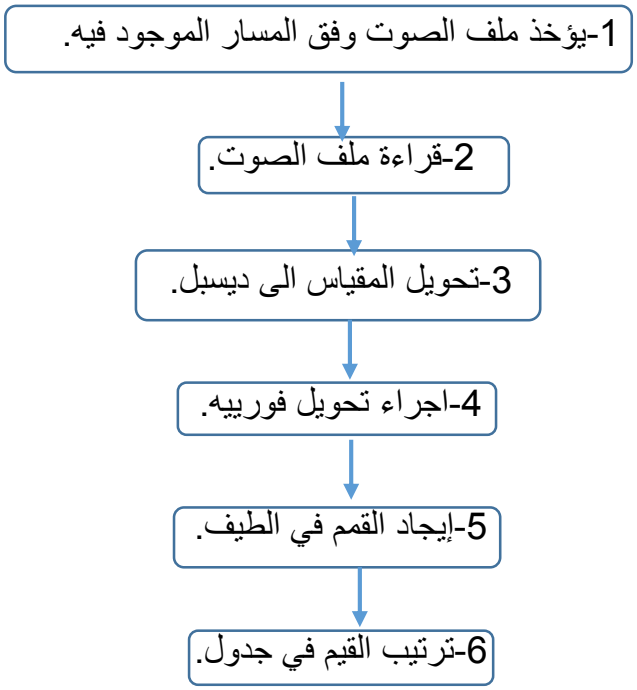
الشكل(5-13) يبين الطريقة الصوتية في كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً



الشكل (5-14) يُظهر التسجيل الصوتي(قبل إجراء تحويل فورييه) مطال الصوت بدلالة الزمن وذلك عند سرعة 3000rpm وأعماق قطع مختلفة حيث يُلاحظ الفرق في المطال قبل بداية التفريز وأثناء التفريز وبعده.

5-2-2-1 استخدام برنامج Labview في تحليل الإشارة الصوتية:

يبين الشكل (5-15) استخدام برنامج labview في معالجة الصوت حيث سيتم تحويل الإشارة الصوتية التي تكون على شكل تسجيل صوتي باللاحقة (wav)هو عبارة عن تابع المطال بالميلي فولط مع الزمن(time domain) الى طيف من الترددات يكون المطال تابع بدلالة التردد (frequency domain) تتم هذه الإجرائية على البرنامج وفق مراحل مبينة:



5-2-2-2 استخدام تقنية خريطة الصوت في رسم منحني الاستقرار:

خريطة الصوت sound map هي عبارة عن مخطط يُستخدم لمعرفة مستوى الضجيج لمنطقة معينة، يتم ذلك بتقسيم المنطقة الى شبكة من النقاط ويُقاس مستوى الصوت عند كل نقطة. يُستفاد من هذه الخريطة عادةً في الدراسات الاجتماعية التي تهتم بدراسة مستوى الضجيج في المدن.

يمكن رسم مخطط الاستقرار stability lobe diagram (SLD) لعملية التفريز باستخدام منهجية طريقة خريطة الصوت كما هو مبين بالشكل(16-5)، يتم تشكيل شبكة من النقاط باعتبار سرعة القطع هي احدى المحاور (المحور الأفقي) والمحور الأخر هو عمق القطع (المحور العامودي) ويتم تسجيل الصوت لكل تجربة باستخدام ميكرفون يتم وضعه داخل آلة التفريز ويشكل مطال الصوت المحور الثالث في حال كان استراتيجية كشف الاهتزازات تعتمد على مطال الإشارة.

من أجل كل سرعة قطع يتم إجراء تجارب لكافة أعماق القطع ويُلاحظ عند قيمة معينة لعمق القطع فإن مطال ضغط الصوت يتجاوز العتبة في حال استخدام استراتيجية مطال الاشارة مما يدل على ظهور الاهتزازات المحرضة ذاتياً. تكرر هذه العملية لكل سرعات القطع وتُسقط على المنحني لتشكيل منحني الاستقرار. يبين الشكل (16-5) الخطوات المستخدمة لرسم منحني الاستقرار حيث تظهر منطقة التشغيل المستقر وغير المستقر في منحني الاستقرار. يكتسب هذا المنحني أهمية خاصة في اتخاذ القرار بحيث يتم الاختيار الأمثل لبارامترات القطع التي تؤدي الى زيادة معدل الإنتاجية MRR [83].

5-2-2-3 الخوارزمية المستخدمة في كشف حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً:

يتم تسجيل الصوت عند كل سرعة وعمق قطع بدون عملية القطع (تتحرك أداة القطع في الهواء دون اجراء عملية تشغيل مع تطبيق البارامترات الموافقة)، إن القمم التي تظهر في هذا التسجيل هي عبارة عن خلفية الضجيج المرجعي ، يتم حذف هذه القمم لأنها لا تمثل تردد الاهتزازات المحرضة ذاتياً وكما أنه يتم حذف القمم الناتجة عن تردد مرور أداة القطع وتوافقيات السرعة، والمعادلات التالية توضح ذلك.

$$F_{dom} \neq F_{bac} \ , F_{dom} \neq R \times F_{tooth}$$

$$F_{tooth} = \frac{NZ}{60} [91]$$

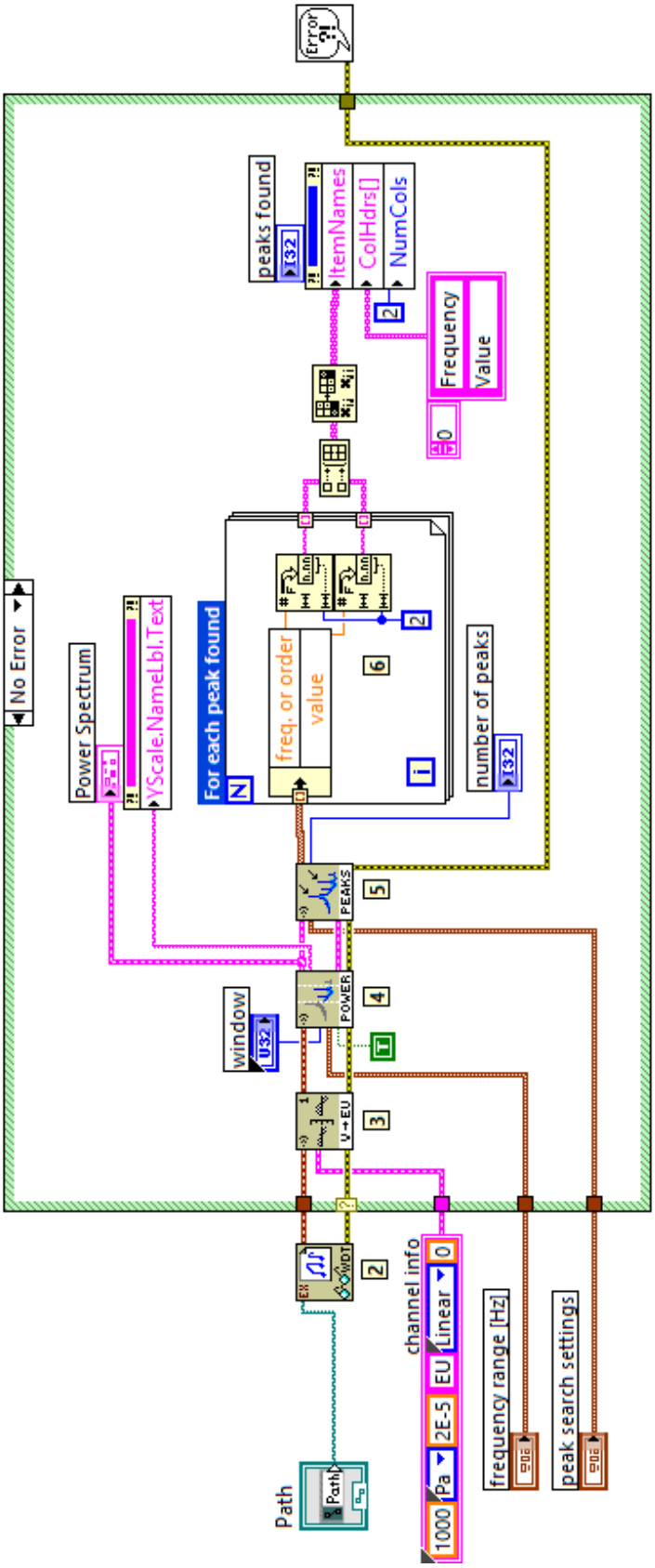
F_{dom} تردد الاهتزازات المحرضة ذاتياً.[Hz]

F_{tooth} تردد مرور أداة القطع. [Hz]

F_{bac} تردد الناتج عن الضجيج. [Hz]

R عدد صحيح، Z عدد الحدود القاطعة، N سرعة القطع[rpm].[91]

عند دراسة طيف الترددات في حال القطع وبعد حذف القمم الناتجة عن تردد مرور أداة القطع والضجيج وفي حال ظهور قمة واضحة فإن هذه القمة تمثل تردد الاهتزازات المحرضة ذاتياً، مما يؤدي الى اعتبار أن البارامترات المستخدمة تُحدث اهتزازات محرضة ذاتياً وفي حال تم ربط الخوارزمية مع آلة التشغيل CNC بطريقة التحكم المباشر DNC يتم تعديل قيم البارامترات بشكل مباشر لتجاوز حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً.



الشكل (5-15) يبين تحليل التسجيل الصوتي باستخدام برنامج Labview

5-2-2-4 دراسة النتائج ورسم منحني الاستقرار بشكل تجريبي:

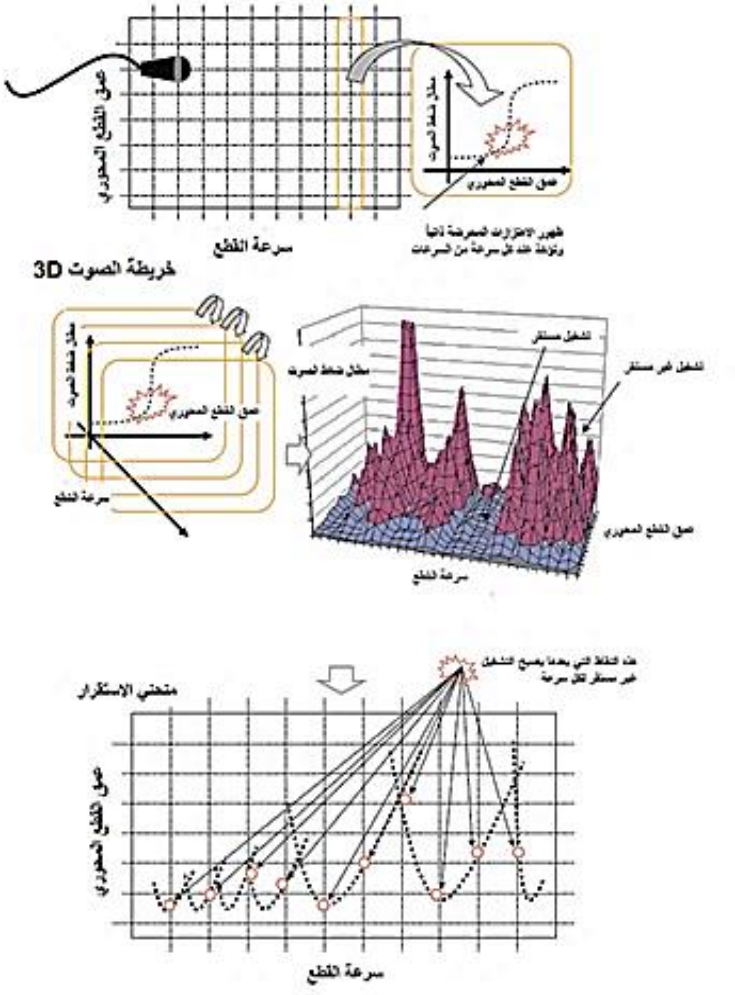
تم تسجيل الصوت لكل تجربة من التجارب وفق السرعات وعمق القطع المرفقة بالجداول، حيث يوجد 8 سرعات و15 عمق قطع ينتج 120 تجربة ومن ثم اجراء تحويل فورييه FFT باستخدام برنامج labview لكل تجربة.

سرعات القطع:

سرعة القطع rpm	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500

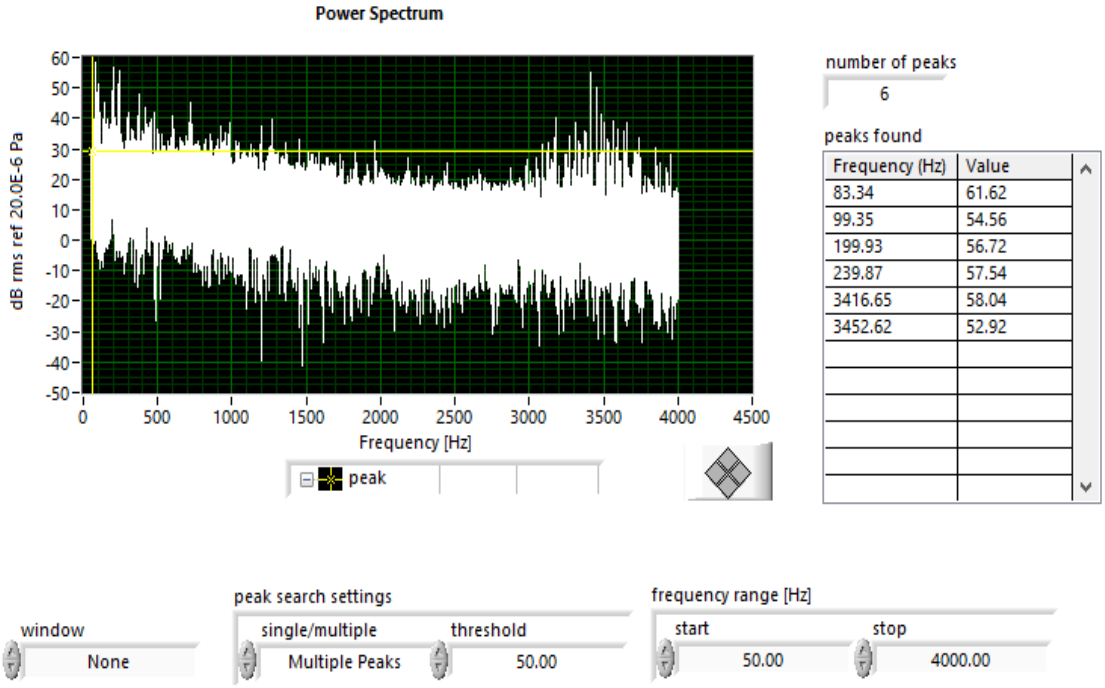
عمق القطع العامودي:

عمق القطع mm	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	
عمق القطع mm	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5
	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	



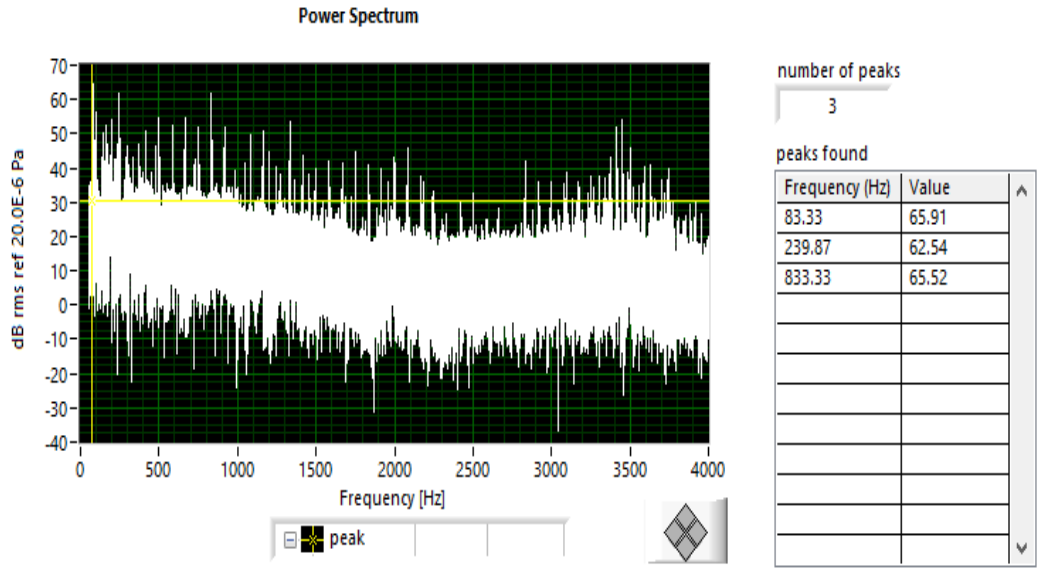
الشكل(16-5) يبين خطوات رسم منحني الاستقرار باستخدام طريقة خريطة الصوت[83]

ونظراً لعدد التجارب الكبير فلقد تم سرد بعض التجارب للتوضيح ومن ثم تجميع كل النتائج ورسم منحني الاستقرار.
على سبيل المثال عند سرعة تشغيل 5000 دورة في الدقيقة تم تسجيل الصوت بدون عملية تفريز وظهرت القمم التالية المبينة في الشكل (17-5).



الشكل(17-5) يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة 5000 دورة في الدقيقة وبدون عملية تفريز.

تم تسجيل الصوت عند شروط عمق القطع 0.5مم والسرعة 5000 دورة في الدقيقة فظهرت القمم التالية المبينة في الشكل(18-5):



الشكل (18-5) يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعه تشغيل 5000 دورة في الدقيقه وعمق قطع 0.5 مم

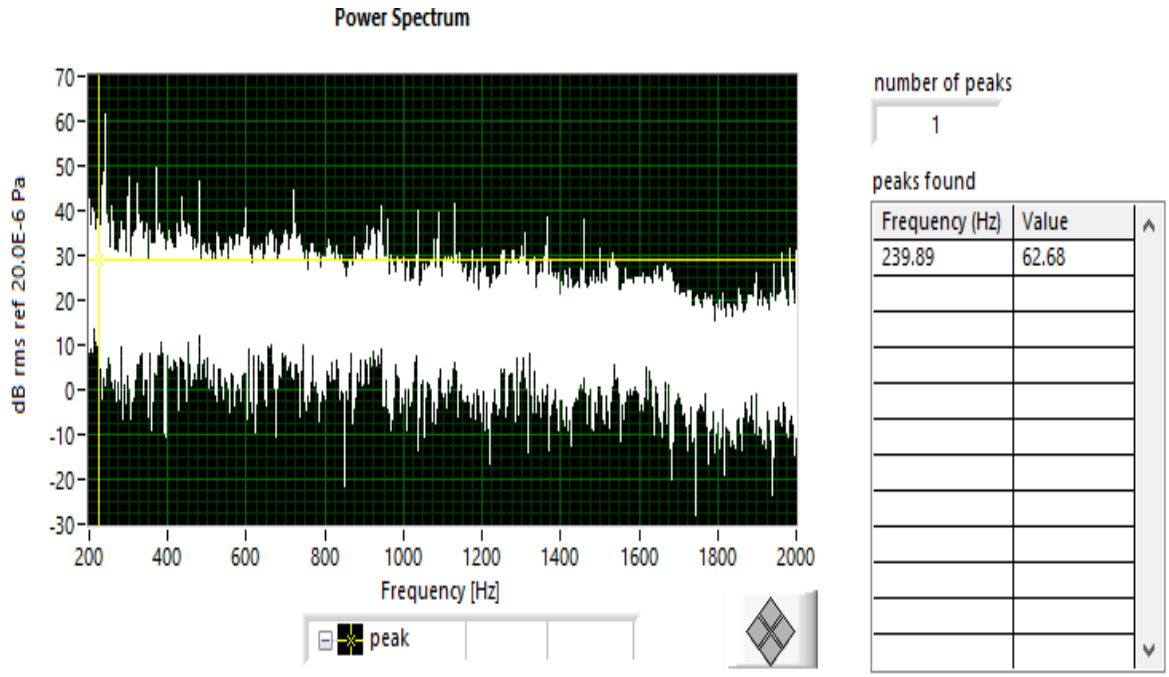
بما أن سرعة القطع 5000 دورة في الدقيقة فإن تردد توافقية السرعة 60/5000 هو 83.33هرتز فإن القمتان الظاهرتين 83.33 و833.33 هي ناتجة عن توافقية السرعة و239 هي ناتجة عن الضجيج لأنها ظهرت في التجربة السابقة، مما يدل على أن ّالتشغيل في هذه الشروط مستقر لعدم ظهور تردد غير تردد التوافقية وتردد الضجيج.

لدى دراسة كل النتائج تبين أن احدى ترددات الاهتزازات المحرضة ذاتياً هو بين 805-820 ، حيث مجرد ظهور هذا التردد في النتائج كان يظهر حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً ويمكن التحقق من ذلك من خلال خشونة السطح الناتج حيث تكون فوق µ6m مايكرومتر وسبب اختيار هذه القيمة مبين في الشكل(5-23)، كان من الأفضل أن يتم تحديد قيمة تردد الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام طريقة (المطرقة الاهتزازية-حساس التسارع) وذلك للتحقق من صحة النتائج، ولكن نظراً للتكلفة العالية لهذه التجهيزات لم يتم تأمينها، وتم الاكتفاء بطريقة الخشونة للتحقق من صحة النتائج.

مثال أخر على ظهور الاهتزازات المحرضة ذاتياً

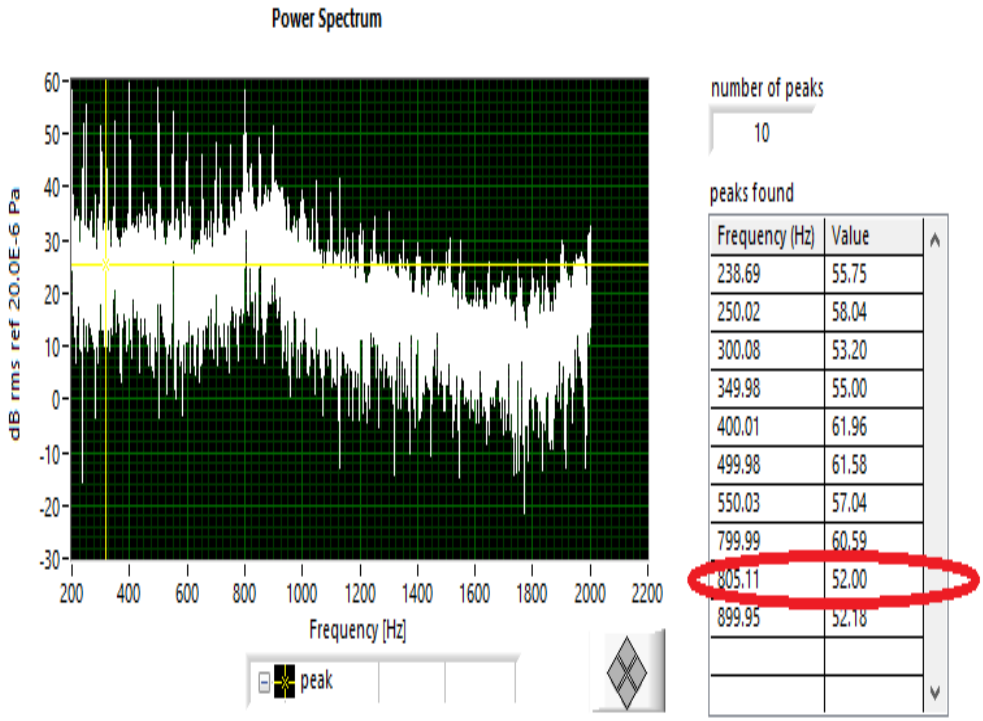
عند سرعة التشغيل 3000 وبدون قطع كما في الشكل(5-19)

يُلاحظ ظهور القمة 239 هي ناتجة عن الضجيج.



الشكل(5-19) يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 3000 دورة في الدقيقة وبدون عملية التفريز.

ولكن عند سرعة 3000 وعمق قطع 2.5مم كما في الشكل (5-20).

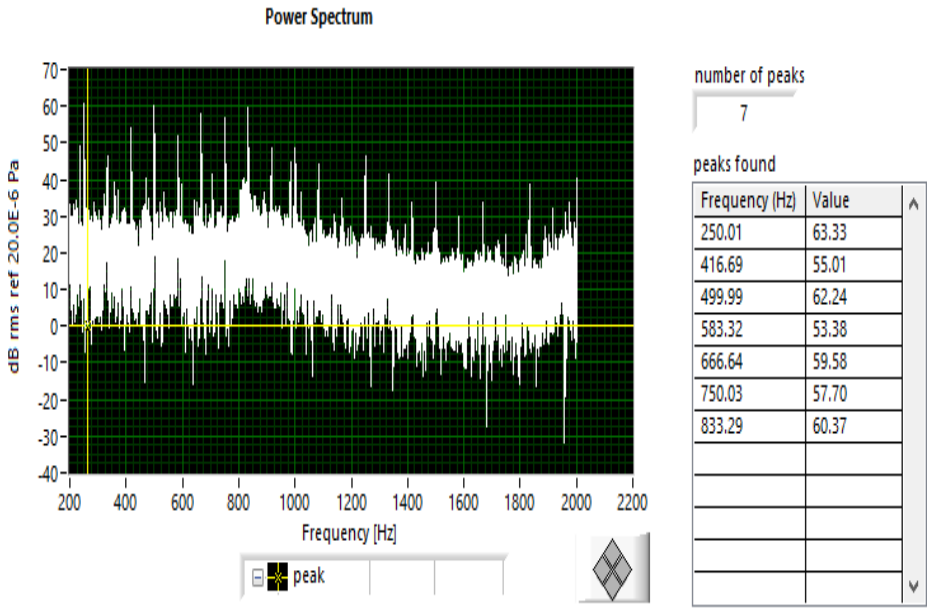


الشكل (5-20) يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 3000 دورة في الدقيقة وعمق قطع 2.5 مم

يُلاحظ أن الترددات التي تظهر هي تردد الضجيج 239 وترددات توافقية السرعة من مرتبة 50هرتز وكما يُلاحظ ظهور التردد 805هرتز وهو يدل على ظهور الاهتزازات المحرضة ذاتياً والذي يزيد التحقق هو خشونة السطح عند هذه البارامترات حيث تجاوزت µ6m مايكرومتر.

مثال أخر عند سرعة تشغيل 5000 وعمق قطع 4.5مم كما في الشكل رقم (5-21).

يُلاحظ عدم ظهور أي قمة عند تردد بين 805-820 لذا التشغيل مستقر كما أن الخشونة أقل من µm 6 كما يبين الشكل(5-24) أن جودة السطوح المنتجة بطريقة التفريز يجب أن تكون بين µm 0.8 حتى µm 6.

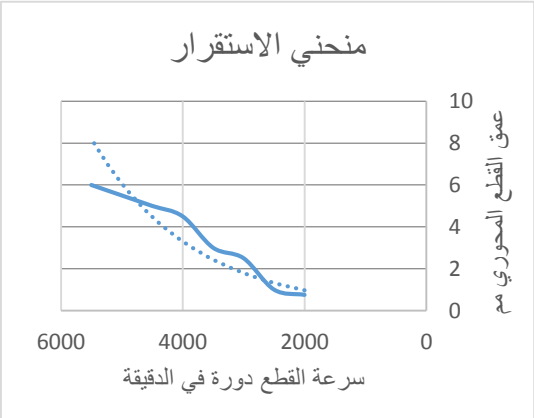


الشكل (5-21) يبين تحليل التسجيل الصوتي عند سرعة تشغيل 5000 دورة في الدقيقة وعمق قطع 4.5 مم

يتم تسجيل الصوت عند كل سرعة من السرعات التي تم اختيارها وعند كافة أعماق القطع الموافقة لسرعة القطع. عند تحليل التسجيل وبالتحقق من الخشونة فإنه يتم الحصول عند كل سرعة من السرعات على عمق القطع الحدي الذي يتحول التشغيل بعد هذه القيمة الى تشغيل غير مستقر ويتم ترتيب القيم في الجدول التالي:

سرعة التشغيل	2000	2500	3000	3500
عمق القطع الحدي	0.75	1	2.5	3
سرعة القطع	4000	4500	5000	5500
عمق القطع الحدي	4.5	5	5.5	6

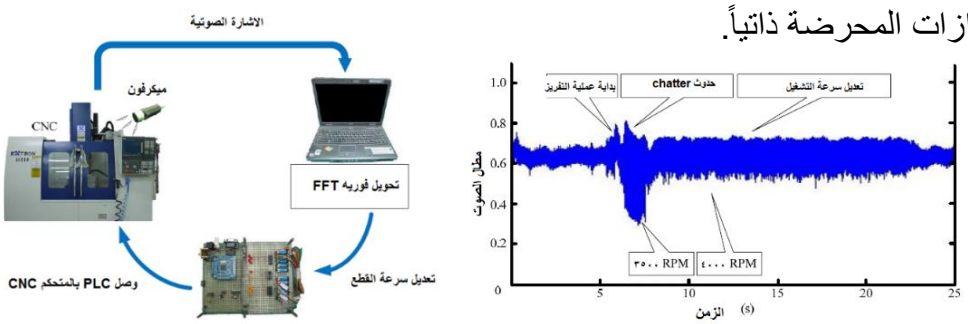
يُستفاد من ذلك برسم جزء من منحني الاستقرار ضمن المجال المدروس كما يبين الشكل (4-22)، وبالاستفادة من طريقة خريطة الصوت ينتج المنحني التالي حيث القيم التي تقع تحت المنحني يكون التشغيل مستقر وفوقه يكون التشغيل غير مستقر.



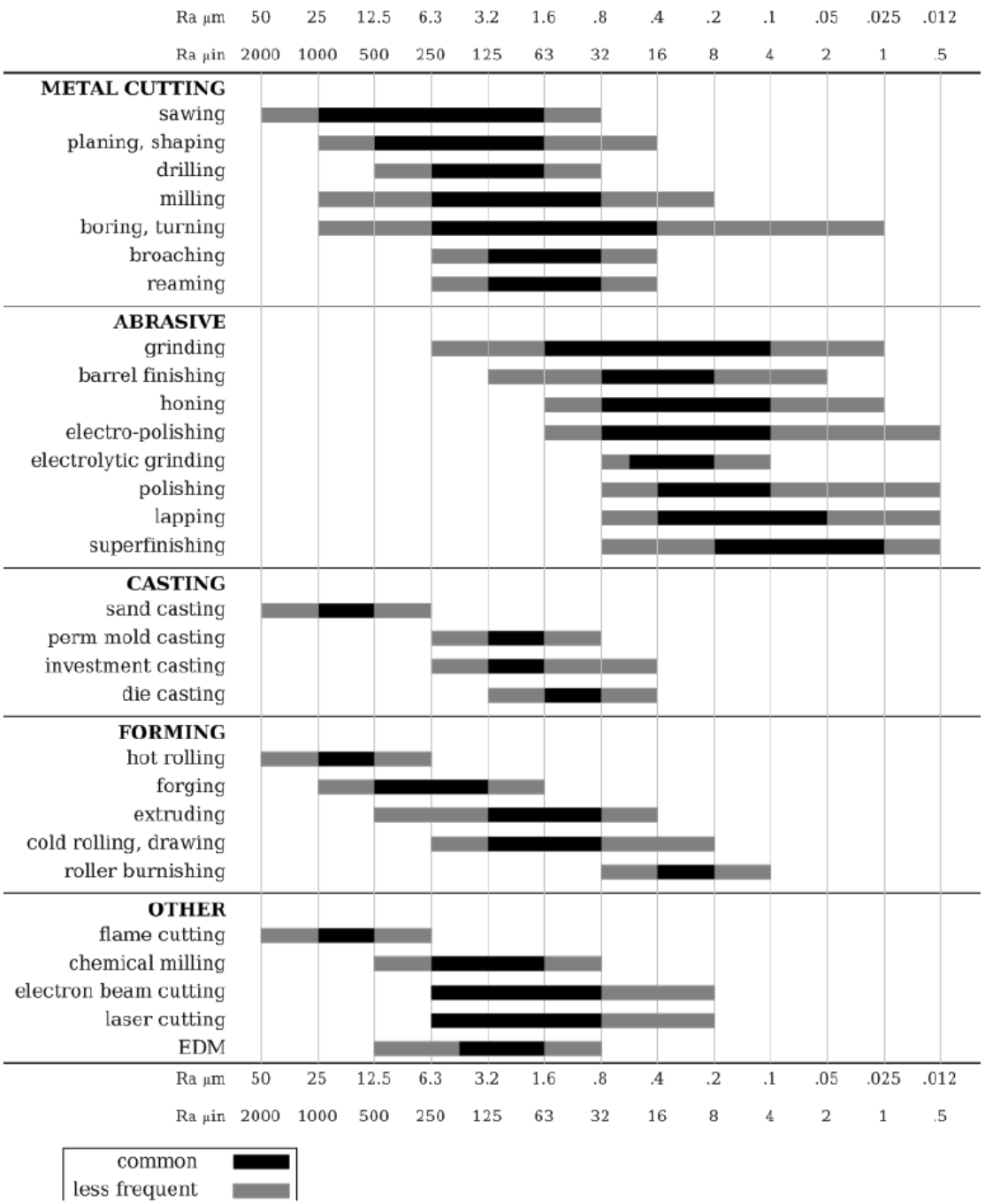
الشكل(22-5) يبين منحني الاستقرار التجريبي

يُلاحظ أنه كلما ازدادت السرعة يمكننا الحصول على عمق قطع أكبر بدون حدوث الاهتزازات المحرضة ذاتياً وبالتالي زيادة معدل الإنتاجية، ونظراً لكون مجال السرعات لآلة التشغيل لا يسمح بتطبيق سرعات أكبر لكي يتم التوسع في رسم منحني الاستقرار كما هو مبين في الشكل (2-7) الذي يمثل منحني الاستقرار بشكل كامل.

يُمكن الاستفادة من المنحني السابق بتخميد الاهتزازات المحرضة ذاتيا والتحكم بعملية التشغيل، يبين الشكل(23-5) استراتيجية التحكم لتخميد الاهتزازات المحرضة ذاتياً، حيث أنه بعد بدء عملية التشغيل وظهور حالة الاهتزازات المحرضة فإنه يمكن وبالزمن الحقيقي ومن خلال معرفة شكل منحني الاستقرار يُمكن اتخاذ القرار المناسب بزيادة سرعة التشغيل أو إنقاصها لتجاوز حالة الاهتزازات المحرضة ذاتياً.



الشكل(23-5) يبين تخميد الاهتزازات المحرضة أثناء عملية التشغيل بالاعتماد على تعديل سرعة القطع[84]



الشكل (24-5) يبين مجال قيم الخشونة الناتجة وفق كل عملية تشغيل[92]

الفصل السادس:

تحديد القيم المثلى لبارامترات التفريز باستخدام طريقة تاكوشي وتحليل التباين واستجابة السطح

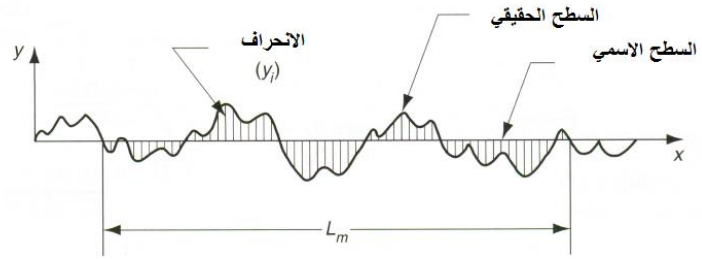
6-1 خشونة السطح:

6-1-1 مفهوم خشونة السطح:

يوجد عدة عناصر تحدد جودة العناصر المنتجة ومنها: دقة الأبعاد، معامل الاحتكاك، مقاومة الصدأ والتآكل، المقاومة الحرارية، المقاومة الكهربائية، مقاومة الاهتراء، التكلفة، ولكن تعتبر خشونة السطح من أهم القيم التي تعبر عن جودة المنتج لما لها من دور في تحسين أداء المشغولة حيث أنها تؤثر على الأمور التالية:

طبيعة الاتصال، معامل الاحتكاك، التآكل، انعكاس الضوء، انتقال الحرارة، التزيت، مقاومة التعب، التغطية [97].

خشونة السطح تنتج عن عملية إزالة الرايش أثناء عملية التفريز بسبب الاهتزازات الناتجة عن الحركة النسبية بين أداة القطع والمشغولة، وعوامل أخرى مما يؤدي حدوث تعرجات على سطح المشغولة يطلق عليها تضاريس السطح. يبين الشكل(6-1) مقدار الانحراف العامودي بين السطح الحقيقي والسطح المثالي[96].



الشكل(6-1) يبين مفهوم الخشونة والفرق بين السطح الحقيقي والاسمي.

حسب المواصفة القياسية ANSI B46.11 يتم تعريف تضاريس السطح وفق الشكل(6-2):

الخشونة roughness: تكون ذات قيمة صغيرة تعبر عن مقدار الانحراف العامودي عن السطح الاسمي، تحدث بسبب عملية التشغيل، وتوصف بقيم عديدة منها $R_{tm}\ R_y\ R_t\ R_z\ R_v\ R_p\ R_a$ R_{vm}.

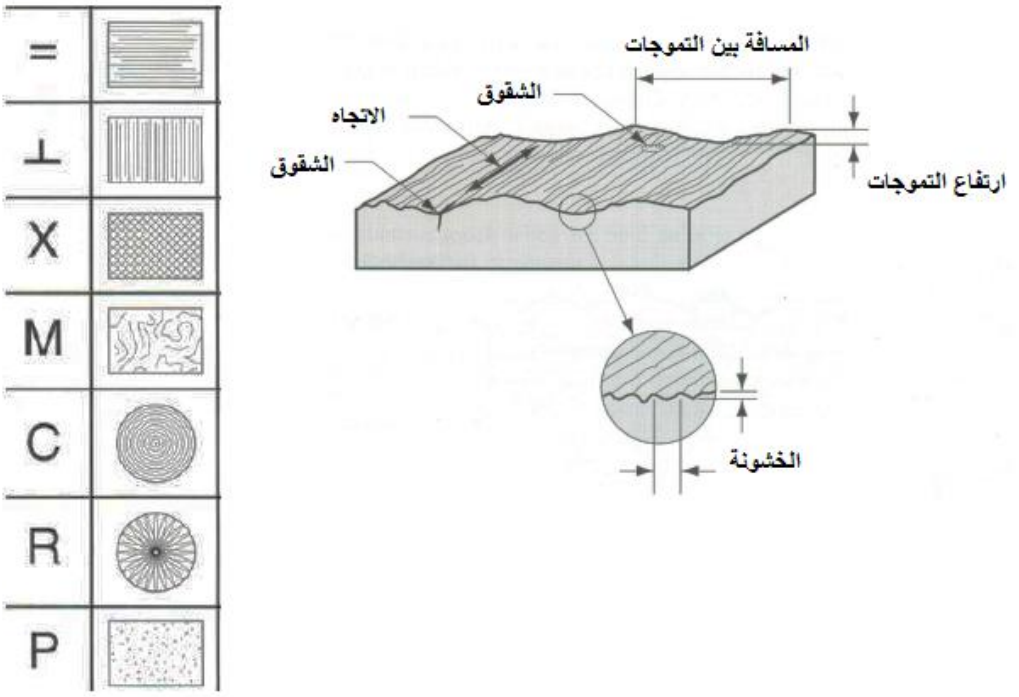
التموج waviness: هي الأمواج التي تحدث على السطح وتتكون بسبب الاهتزازات أثناء عملية التشغيل والمعالجة الحرارية، تتراكب الخشونة على تموجات السطح، توصف بقيم عديدة منها W_a . $W_y\ W_q$

الاتجاه lay: اتجاه السطح وتحدث بسبب طريقة التشغيل وأداة القطع لها علاقة كبيرة في الاتجاه ويبين الشكل(6-2) أنواع الاتجاهات ورمز كل طريقة.

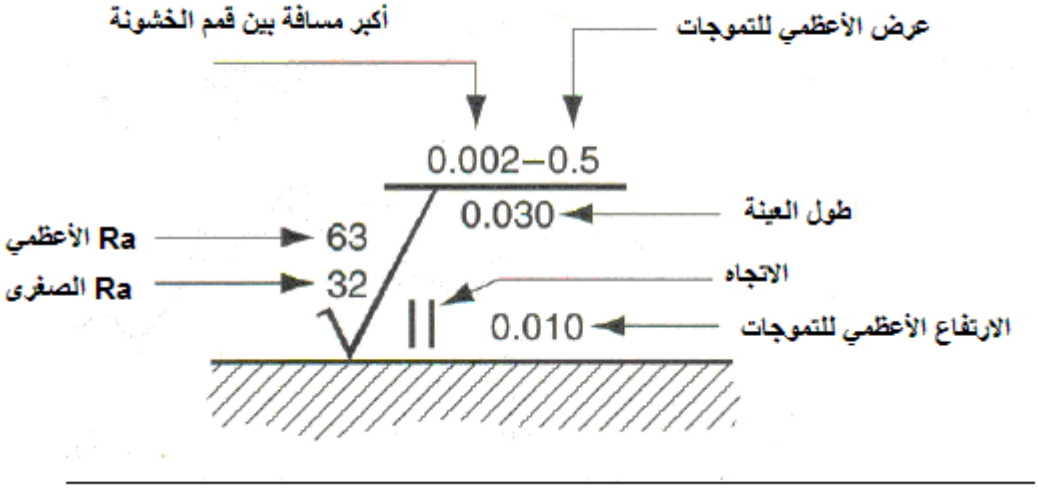
الشقوق flaw: هي عبارة عن حالات شاذة غير نظامية تحدث على السطح مثل الشقوق وغيرها.

يتم تجميع بعض الصفات المميزة للسطح في تعبير هندسي على شكل الجذر التربيعي في الرياضيات ويبين الشكل (6-3) أحدها وتم وضع ما تمثل هذه القيم من صفات.

ويضاف الى هذه القيم المميزة للسطح حسب تعريف Zygo مواصفتان هما المسافة وهي عبارة عن قيمة تحدد بشكل عام عدد قمم الخشونة الموجودة في مسافة معينة ومن القيم التي تصفها هي $S_m \;\; P_c$، شكل قمم الخشونة والتي تصفها $\Delta_a \; R_k \; l_y \; R_{pk} \; \Delta_{tm} \; \Delta_q \; M_r \; t_p \; st_p$ V.



الشكل(6-2) يبين تضاريس سطح التشغيل ورموز الاتجاه [98]



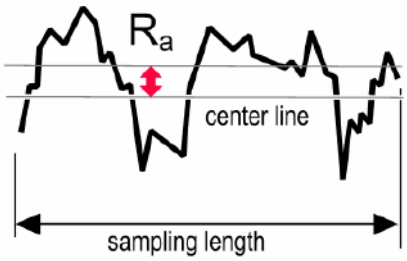
الشكل(6-3) تعبير يمثل قيم الخشونة[98]

هذه الصفات تدعى بنية السطح، ولكن هذه الصفات لا تكفي في وصف بنية السطح لأنه توجد عوامل كثيرة تؤثر على بنية السطح وتجعله غير متجانس مثل تغير القساوة، مناطق التأثير الحراري،

إجهادات متبقية، إعادة التبلور، الشقوق، العيوب السطحية، الهجمات الكيميائية الانتقائية، شوائب، الامتصاص .... الخ،
وهناك مواصفات القياسية وفق (ISO 4286-1996,ISO 4287-1997) حيث تم وضع التعريفات والقواعد والإجراءات التي تحدد بنية السطح.
سيتم شرح بالتفصيل بعض قيم الخشونة التي ستستخدم في الأطروحة :

الخشونة R_a : تعبر عن المتوسط الحسابي لمجموع الانحرافات ومبينة في الشكل رقم(4-5) والعلاقة الرياضية رقم (1-5)

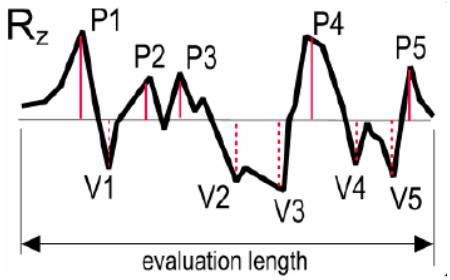
$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |Z(x)|dx \quad (1-6)$$



الشكل(4-6) يبين الخشونة R_a.[99]

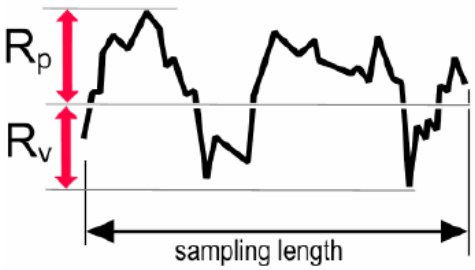
الخشونة R_z: يتم أخذ عشر قيم متتابعة خمسة منها للقمم وخمسة للمنخفضات في تضاريس السطح. يُحسب المتوسط الحسابي للقيم العشرة بالقيمة المطلقة حيث تعبر القيمة الناتجة عن R_z وفق المعادلة (6-2) والشكل(6-5)

$$R_z = \frac{(P_1 + P_2 \dots P_5) - (V_1 + V_2 \dots . V_5)}{5} \quad (2-6)$$



الشكل(5-6) يبين الخشونة R_z. [99]

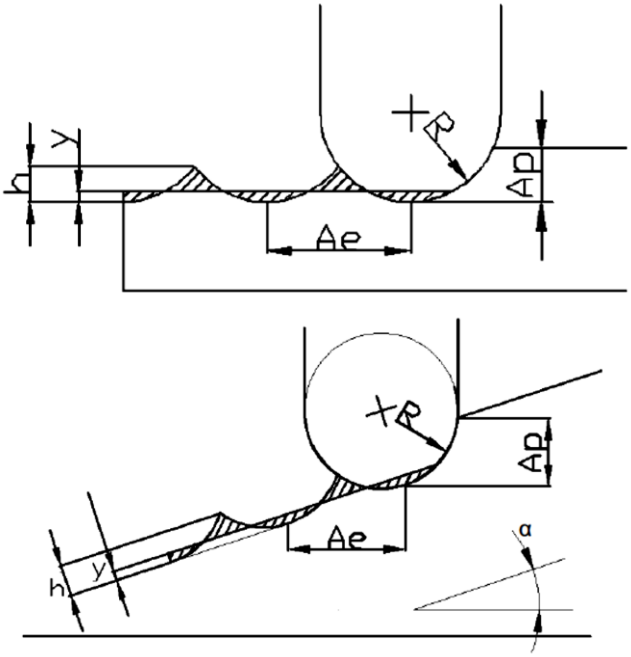
الخشونة R_v:
أعلى قيمة للمسافة بين الخط الوسطي لتعرجات السطح والخط الذي يمر من أكبر قمة منخفضة كما في الشكل(6-6).



الشكل (6-6) يبين الخشونة R_v . [99]

6-1-2 تشكل الخشونة نتيجة عملية التفريز:

في عملية التفريز يتم إزالة المادة الزائدة على شكل رايش متقطع يكون قصير وسماكة الرايش متغيرة، ويحدث الرايش بسبب الحركة النسبية بين أداة القطع والمشغولة.



الشكل(6-7) علاقة الأبعاد الهندسية لأداة القطع في توليد السطح.[100]

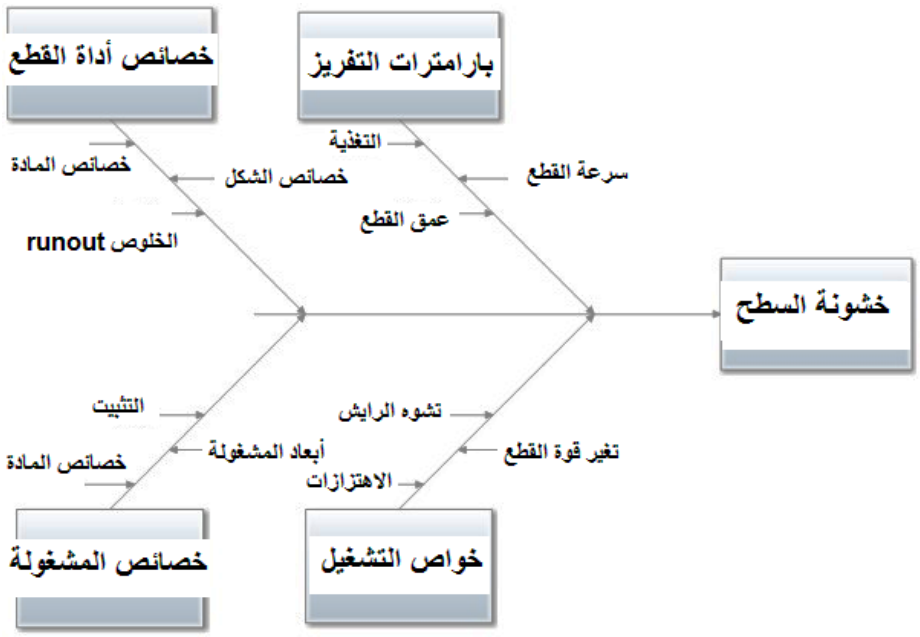
أسباب تشكل تضاريس السطح الناتج عن عملية التفريز وفق المواصفات القياسية DIN4760 يمكن أن تحلل باعتبارها ناتجة عن تراكب عدة مراحل كما في الشكل(6-8)، المرحلة الأولى للانحراف عن السطح الاسمي يشير الى التفاوت (التسامح) عن الاستقامة أو الشكل الدائري، المرحلة الثانية للانحراف يشير الى التموج، الأول والثاني يحدث بسبب أخطاء في أداة القطع، تشوه المشغولة، أخطاء تركيب وتثبيت المشغولة، اهتزازات التركيبة، عدم التجانس في مادة المشغولة، أما المرحلة الثالثة والرابعة تكون على شكل خدود وشقوق دورية وتكون بسبب ميكانزيم تشوه الرايش وكينماتيك عملية التفريز، الخامس والسادس يشير الى تركيبة مادة المشغولة، الذي يتعلق بالخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل الأكسدة والزحف والانتشار و الاجهادات المتبقية...الخ.

3-1-6الطرق المستخدمة في التنبؤ بخشونة السطح:

في عمليات التصنيع تعتبر قيمة الخشونة R_a هي المميز الأساسي المعبر عن جودة السطح، يتم قياس الخشونة بعد انجاز عملية التشغيل، وبالتالي فإن الجودة تُحدد بعد العملية وبالتالي الأجزاء المرفوضة تُسحب من خط الإنتاج مما يزيد من التكلفة والزمن.

الخشونة العالية غير مرغوب بها ولكن عملية التحكم بالخشونة صعبة ومكلفة لأن العملية التي تؤدي الى تناقص الخشونة تؤدي الى زيادة في التكلفة بشكل أسي، والذي يحدد مقدار الخشونة وزيادة التكلفة الضرورية هو التطبيق أو الأداء المطلوب للعملية، فمثلاً في عملية تصنيع القوالب يتطلب الحصول على سطوح ذات خشونة منخفضة لبعض الأجزاء مما يتطلب اجراء عمليات انهاء يدوية لتحسين جودة السطح.

ونظراً للعوامل الكثيرة التي تتعلق بتشكل الخشونة وتضاريس السطح، فقد قام الباحث (Benardos Vosniakos) بتحديد العوامل المؤثرة ووضعها على شكل مخطط السمكة كما هو مبين بالشكل(6-8) ومنها بارامترات عملية التشغيل، مواصفات أداة القطع، مواصفات المشغولة، ظاهرة القطع.



الشكل(6-8) يُظهر مخطط السمكة (السبب-التأثير) لخشونة السطح في عملية التفريز[101]

لأهمية تخمين مقدار الخشونة الناتجة عن عملية التشغيل فإنه تم تصنيف الطرق المتبعة كما في الشكل (6-9).

6-1-3-1-**الحل التقريبي التحليلي**:

الحل التقريبي يعتمد على نظرية التشغيل التي تستخدم لتطوير النماذج التحليلية والخوارزميات الحاسوبية لتمثيل السطح المشغل، في هذه الطريقة نأخذ بعين الاعتبار (النظرية الحركية الكينماتيكية، خصائص أداة القطع، ميكانزم تشوه الرايش).

أول تقريب باستخدام هذه الطريقة تم عن طريق Martellotti حيث وصف عملية التفريز المحيطي بالانطلاق من المعادلات الرياضية التي تصف حركة أداة القطع التي تكون على شكل Trochoid (كحركة نقطة في دولاب عجلة فيرسم قوس) وبمعرفة معادلة الحركة القابلة للاشتقاق وبمعرفة متغيرات القطع وباعتبار أداة القطع جاسئة والمشغولة جاسئة يتم الحصول على معادلة الخشونة، ومن ثم جاء Montgomery and Altintas حيث أوجد النموذج التحليلي مع الأخذ بعين الاعتبار الاهتزازات[102].

من الشكل(6-9) في حالة التفريز لسطح المستقيم وأداة القطع اسطوانية الشكل يمكن كتابة معادلة الخشونة باستخدام هذه الطريقة وفق (6-3):

$$y = \frac{h}{2} + \frac{R}{2} - \frac{R^2}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right) \quad (3-6)[100]$$

$$y = \left[1 - \frac{\sqrt{4 - \left(\frac{A_e}{R}\right)^2}}{4} - \frac{R}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right)\right] \times R$$

$$R_a = \frac{2}{A_e}.\left[R^2.\cos^{-1}\left(\frac{R-y}{R}\right) - \left[(R-y).\sqrt{2.R.y-y^2}\right]\right]$$

$$R_a = \frac{2}{A_e}.\left[R^2.\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{R^2-\frac{A_e^2}{4}}}{2R} + \frac{R}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right)\right) - \left(\frac{R^2}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right) + \frac{\sqrt{R^2-\frac{A_e^2}{4}}}{2}\right).\sqrt{-\frac{2R^3}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right) + 2R^2 - R\sqrt{R^2-\frac{A_e^2}{4}} - \left(-\frac{R^2}{A_e}\sin^{-1}\left(\frac{A_e}{2R}\right) + R - \frac{\sqrt{R^2-\frac{A_e^2}{4}}}{2}\right)^2}\right]$$

6-1-3-2 الحل التقريبي التجريبي :

يتم التركيز في هذه الطريقة على دراسة تأثير العوامل المختلفة على خشونة السطح وذلك بإجراء تجارب وبقيم مختلفة لتلك العوامل.

ألية هذه الطريقة هي تحديد البارامترات التي لها تأثير كبير على قيمة الخشونة الناتجة ومن ثم تحلل هذه النتائج ومعرفة مقدار تأثير كل بارامتر، تتميز هذه الطريقة بالسهولة في إنجازها وتعطي نتائج جيدة[103].

6-1-3-3 الحل التقريبي بالاعتماد على طريقة معينة في تصميم التجربة

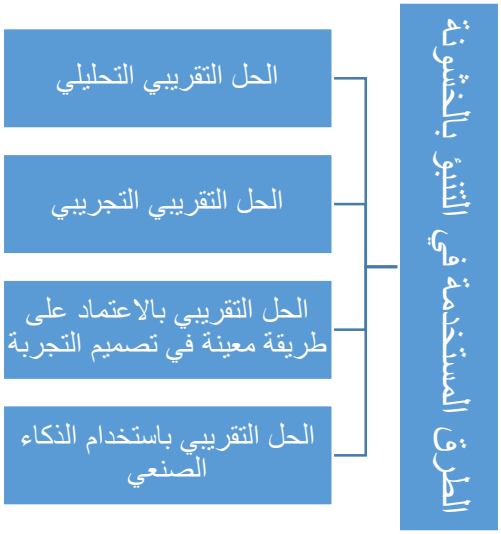
تقوم هذه الطريقة على اجراء تجارب، الاختلاف عن الطريقة السابقة أن التجارب تتم من خلال منهجية تراتبية لخطة تنفيذ التجارب ومن هذه الأدوات التي تعتمد على هذه الطريقة هي طريقة استجابة السطح، تقنية تاكوشي.

6-1-3-4 الحل التقريبي باستخدام طرق الذكاء الصنعي

تقوم هذه الطريقة على استخدام طرق الذكاء الصنعي ومنها الشبكات العصبونية، الهندسة الوراثية، منطق الغموض أو الضبابي، و الأنظمة الخبيرة، وغيرها من الطرق التي تساعد في اتخاذ القرار. طريقة الشبكات العصبونية موديل حاسوبي يتألف من مجموعات متقاطعة من الأعصاب التي تحاكي أعصاب الانسان.

تعتمد طريقة منطق الغموض على أنه ليس كل شيء يكون 0أو1 وانما يمكن أن يكون بين 0و1.

كما قام عدد من الباحثين باستخدام عدة طرق والمقارنة فيما بينهم [104] [105] [106] [107] [108] [109].



الشكل(6-9)

في الاطروحة تم استخدام طريقة تاكوشي مع تحليل التباين وطريقة استجابة السطح لإيجاد معادلات الخشونة.

2-6 طريقة تاكوشي مع تحليل التباين

6-2-1-طريقة تاكوشي:

يتم تحديد عدد التجارب المطلوبة للعملية الإحصائية بطرق تُدعى تصميم التجارب. تعتبر طرق تصميم التجارب التقليدية معقدة وصعبة الاستخدام وتحتاج الى عدد كبير من التجارب ويزداد الأمر تعقيداً كلما ازداد عدد المعاملات ومستوياتها، قام العالم Dr.Genichi Taguchiفي عام 1950بتصميم طريقة إحصائية تهدف الى استخدام الحد الأدنى من المعاملات وجعل عملية التصميم متينة Robust، مرنة قابلة للتكيف بالظروف المحيطة.

تتلخص منهجية طريقة تاكوشي وفق ما يلي:

1-تحديد معاملات الضجيج الظروف المحيطة بالتجربة في الحالة المدروسة (**الاهتزازات**، الحرارة، الرطوبة، ....الخ)

2-تحديد معاملات التحكم مثلاً في عملية تفريز (**سرعة القطع، عمق القطع، التغذية**، عدد الحدود القاطعة لأداة التفريز، سائل التبريد، نوع معدن أداة القطع أو المشغولة...) ومستوى كل معامل (قيمتان أو ثلاثة أو أربعة أو خمسة قيم).

3-تصميم التجربة بالاعتماد على المصفوفات العامودية (L27،L18، L9 .... الخ.).

4-اجراء التجارب وقياس الاستجابة المطلوبة مثلاً في مجال تشغيل المعادن (خشونة السطح، معدل الانتاجية MRR، عمر أداة القطع، زمن التشغيل...).

5-تحليل البيانات وفق طريقة S/N.

6-تحديد مدى تأثير كل معامل في قيمة الاستجابة بالاعتماد على طريقة تحليل التباين ANOVA.

أهم أدوات طريقة تاكوشي هي:

1-نسبة الإشارة الى الضجيج S/N:

يُقصد بالإشارة ، القيمة المرغوب بها لعنصر الاستجابة المدروسة والضجيج وتمثل القيم الغير مرغوب بها لعنصر الاستجابة المدروس.

طريقة تاكوشي تستخدم S/N لقياس انحراف جودة العناصر عن القيمة المرغوب بها.

يوجد عدة مستويات S/N تعتمد على نوع العناصر:

- **أصغر قيمة للاستجابة هي الأفضل:**

تستخدم عندما تكون القيمة الصغرى للاستجابة هي المفضلة مثلاً في الحالة المدروسة (**خشونة السطح**).

يعبر عن ذلك بالمعادلة رقم(4-6).

$$S/N = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (4-6)_{[110]}$$

y: قيمة الاستجابة المدروسة.

- **الاسمي هو الأفضل:**

تستخدم عندما يكون المطلوب أن يكون التغير حول القيمة الاسمية أصغري ويعبر عنه بالمعادلة رقم (6-5).

$$S/N = -10log\left(\frac{\mu^2}{S^2}\right) \qquad (5-6)_{[110]}$$

μ: القيمة المتوسطة S: التباين.

- **الأعظمي هو الأفضل** :

تكون أعلى قيمة للاستجابة المدروسة هي الحالة المثالية مثل **معدل الإنتاجية**.

ويعبر عنها بالمعادلة رقم (6-6).

$$S/N = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (6-6)_{[110]}$$

2-المصفوفات العامودية:

يتم في طرق تصميم التجارب معرفة الاحتمالات الممكنة للربط بين المعاملات المستخدمة في التجارب. في التطبيقات الصناعية تُعد عملية تنفيذ عدد كبير من التجارب عملية مكلفة جداً، مما يعطي أهمية كبيرة في تحديد الربط الأمثل بين هذه المعاملات، وبالتالي قدمت طريقة تاكوشي معايير قياسية للمصفوفات بحيث يتم الحصول على النتائج بأقل عدد ممكن من التجارب. المصفوفات القياسية مبينة في الجدول رقم (6-1) بحسب عدد المعاملات ومستواها ووفق طريقة تاكوشي[110][111][112].

المصفوفات العامودية القياسية المستخدمة في طريقة تاكوشي												
	عدد البارامترات (المعاملات)											
عدد المستويات		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
	2	**L4**	**L4**	**L8**	**L8**	**L8**	**L8**	**L12**	**L12**	**L12**	**L12**	**L16**
	3	**L9**	**L9**	**L9**	**L18**	**L18**	**L18**	**L18**	**L27**	**L27**	**L27**	**L27**
	4	**L16**	**L16**	**L16**	**L16**	**L32**	**L32**	**L32**	**L32**	**L32**		
	5	**L25**	**L25**	**L25**	**L25**	**L25**	**L50**	**L50**	**L50**	**L50**	**L50**	**L50**

جدول(6-1) المصفوفات العامودية القياسية المستخدمة في طريقة تاكوشي[110]

2-2-6 تحليل التباين:

تُعد معرفة مدى تأثير (مشاركة) كل معامل في قيمة الاستجابة المدروسة أمر مهم، لأن المعلومات المستخلصة تفيد في تحديد ألية التحكم التي سيتم استخدامها، كما يُمكن باستخدام طريقة تحليل التباين الحصول على النسبة المئوية لتأثير كل معامل وبالتالي لا يتم إضافة معامل الى عملية التحكم لا يؤثر بنسبة كبيرة في قيمة الاستجابة المدروسة.
أهم العلاقات الرياضية التي تعبر عن هذه الطريقة والتي تنظم في جدول النتائج.
المجموع الكلي لمربع الانحرافات:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{n} (\eta_i - \eta_m)^2 \qquad (7-6)[113]$$

$$\eta_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \eta_i \qquad (8-6)[113]$$

SS_Tيمثل مجموع التربيعات الكلي، η_i متوسط الحسابي S/N لتجربة رقم i، η_m متوسط الحسابي لقيمةs/n الكلي.
n: عدد التجارب، SS_p مجموع التربيعات للانحرافات وفق البارامتر p، k التكرار، j رقم المستوى، SS_E مجموع التربيعات للخطأ، DOF_P درجة الحرية للبارامتر المدروس، A,B,C البارامترات المدروسة(التغذية، سرعة القطع، عمق القطع).

$$SS_p = \sum_{j=1}^{k} \frac{(S\eta_j)^2}{k} - \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} \eta_i\right]^2 \qquad (9-6)[113]$$

$$SS_E = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_C) \qquad (10-6)[113]$$

$$DOF_P = k - 1 \qquad (11-6)[113]$$

$$DOF = \sum DOF_P + DOF_E \qquad (12-6)[113]$$

DOF درجة الحرية الكلية، V_P التفاوت للبارامتر p.

$$V_P = \frac{SS_P}{DOF_P} \qquad (13-6)[113]$$

قيمة F-Value F تحسب من العلاقة(6-14)

$$F_P = V_P / V_E \qquad (14-6)[113]$$

أهم نتيجة من نتائج تحليل التباين هي نسبة المشاركة لكل بارامتر وفق العلاقة(15-6)

$$\rho_P = SS_P/SS_T \quad (15-6)$$[113]

3-2-6 طريقة استجابة السطح:

تجمع هذه الطريقة بين المعادلات الرياضية والطرق الإحصائية، تهدف الى إيجاد الحل الأمثل.

يكون شكل المعادلة المعربة عن تأثير بارامترات العملية على الاستجابة مبنياً على المعادلة التربيعية وفق ما يلي:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j X_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i<} \sum_{j=2}^{k} \beta_{jj} X_i X_j + \varepsilon \quad (16-6)$$[114]

Y الاستجابة، X_j بارامترات الدراسة (بارامترات التشغيل)، k عدد البارامترات، β_0 ثابت، β_j معامل للبارامترات الخطية، β_{jj} معامل للبارامترات التربيعية، β_{jj} معامل للبارامترات المختلطة، ε الخطأ[114].

3-6 الإجراء التجريبي:

تمت التجارب على

- آلة تفريز CNC المتواجدة في مخبرCAD-CAMوآلة التفريز الموجودة في مخبر آلات التشغيل.
- عينة من الألمنيوم 5456.
- لم يتم استخدام سائل تبريد.
- أداة قطع كربيدية بحدين قاطعين بقطر 12 mm.
- تفريز طرفي هابط.

بالنسبة لآلة CNC كانت النتائج وفق مايلي:

الاجراء الأول:

تم تحديد كل من بارامترات التحكم وعنصر الاستجابة المستهدف من الدراسة، فتم اختيار كل من بارامترات (سرعة القطع، عمق القطع، التغذية)، أما الاستجابة فهي خشونة السطح المشغل(Ra,Rz,Rv) ومعدل الإنتاجية MRR تحسب قيمة الخشونة باستخدام جهاز قياس الخشونة يكون شكل مسبار يمرر على سطح القياس كما في الشكل(10-6) يوجد هذا الجهاز في مخبر الاختبارات اللاتلافية ويعطي قيم الخشونة بشكل رقمي.

تم اجراء ثلاث تجارب لقياس الخشونة في ثلاث أماكن مختلفة من السطح الذي يتم قياسه ومن ثم يوجد المتوسط الحسابي، يبين الجدول رقم(2-6) ثلاث بارامترات وثلاث مستويات.

بارامترات التفريز	المستويات		
	المستوى1	المستوى2	المستوى3
سرعة القطع(A)rpm	1000	1500	2000
عمق القطعmm(B)	0.25	0.5	0.75
التغذيةmm/min(C)	200	400	600

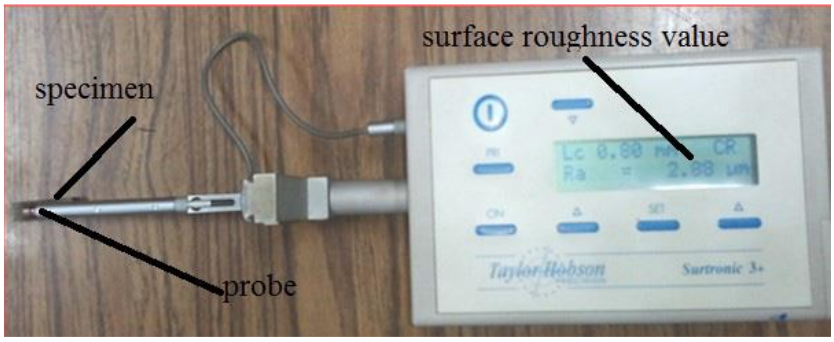
جدول رقم (2-6) يُظهر معاملات التحكم ومستوياتها

الاجراء الثاني:

بما أن عدد المستويات ثلاثة وعدد المعاملات ثلاثة، وكما هو مبين في الجدول (1-6) بالتالي يتم اختيار المصفوفة L9، ثم يتم حساب معامل S/N وترتيب النتائج وفق الجدول رقم (3-6)، يتم اختيار مستوى القيمة الأصغرS/N وفق المعادلة (4-5)Ra,Rz,Rv ، ويتم اختيار مستوى القيمة الأعظمي S/N في حال كانت الاستجابة MRR وفق المعادلة(6-6)، تم استخدام البرنامج الحاسوبي minitab للحصول على تحليل S/N مبينة كما في الجدول رقم(4-6) (5-6)(6-6) والشكل رقم (11-6)(12-6)(13-6)

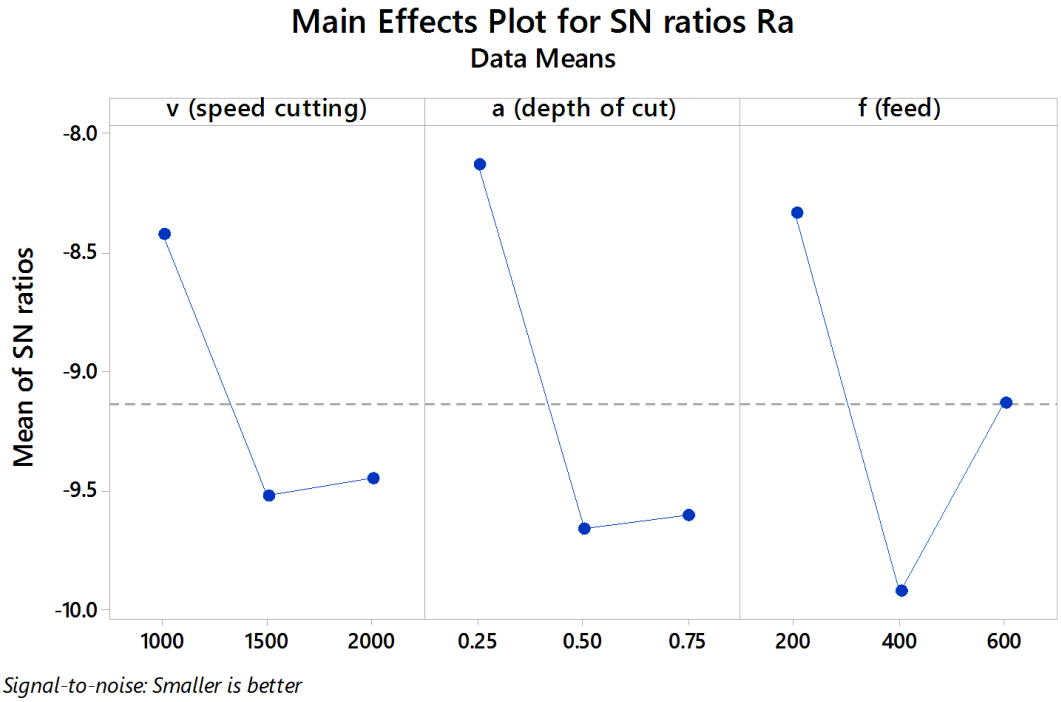
الجدول(6-3) يُظهر قيم S/N لقيم الخشونة (نتائج التجارب المنفذة) وفق مصفوفة L9 للحالة المدروسة

رقم التجربة	المستوى			Ra	S/N	Rz	S/N	Rv	S/N
	A	B	C	الوسطي	Ra	الوسطي	Rz	الوسطي	Rv
1	1	1	1	2.175	-8.6754	13.895	22.857-	7.609	-17.626
2	1	2	2	2.867	-9.1486	14.595	-23.284	6.692	-16.511
3	1	3	3	2.359	-7.4546	12.295	-21.794	6.067	-15.659
4	2	1	2	2.476	-7.875	12.78	-22.13	6.48	-16.231
5	2	2	3	4.002	-12.088	19.17	25.652-	9.774	-19.801
6	2	3	1	2.694	-8.608	14.005	22.925-	7.25	-17.206
7	3	1	3	2.47	-7.8539	12.925	22.228-	6.939	-16.825
8	3	2	1	2.439	-7.7442	12.995	22.275-	6.77	-16.611
9	3	3	2	4..339	-12.747	19.81	-25.937	10.24	-20.206



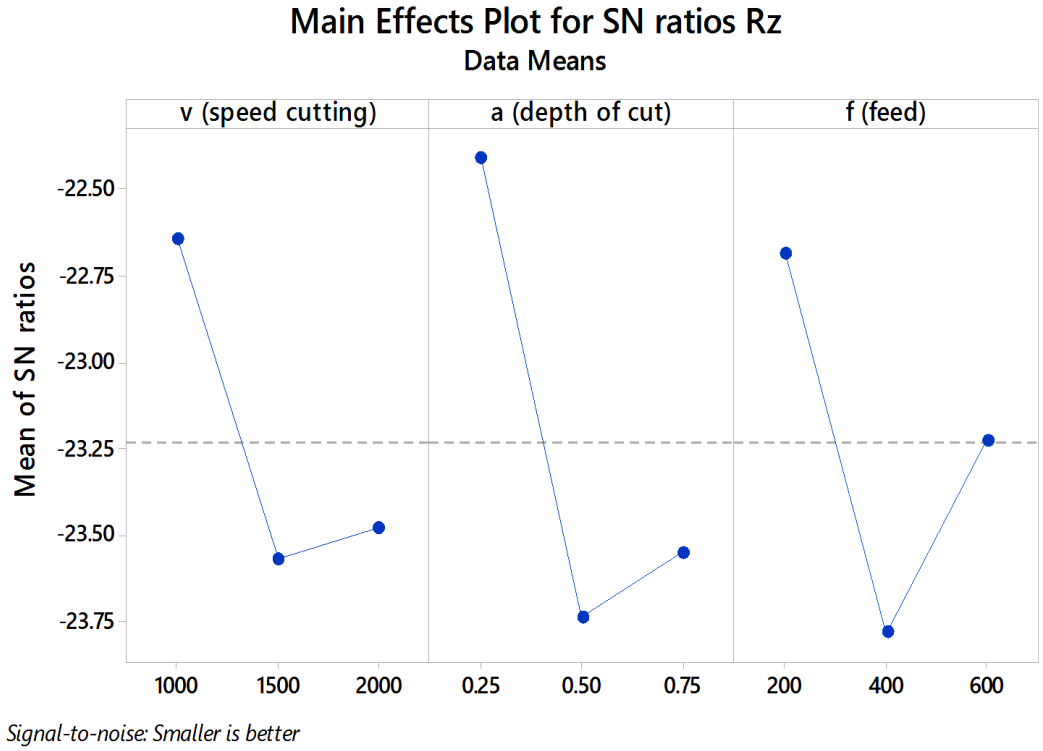
الشكل(6-10) جهاز قياس الخشونة

تحليل تاكوشي بالاعتماد على قيمة S/N للخشونة Ra			
التغذيةmm/min	عمق القطعmm	سرعة القطعrpm	المستوى
-8.34	**-8.14**	**-8.43**	**1**
-9.92	-9.66	-9.52	**2**
-9.13	-9.6	-9.45	**3**
1.581	1.526	1.098	**Delta**
1	**2**	**3**	**Rank**



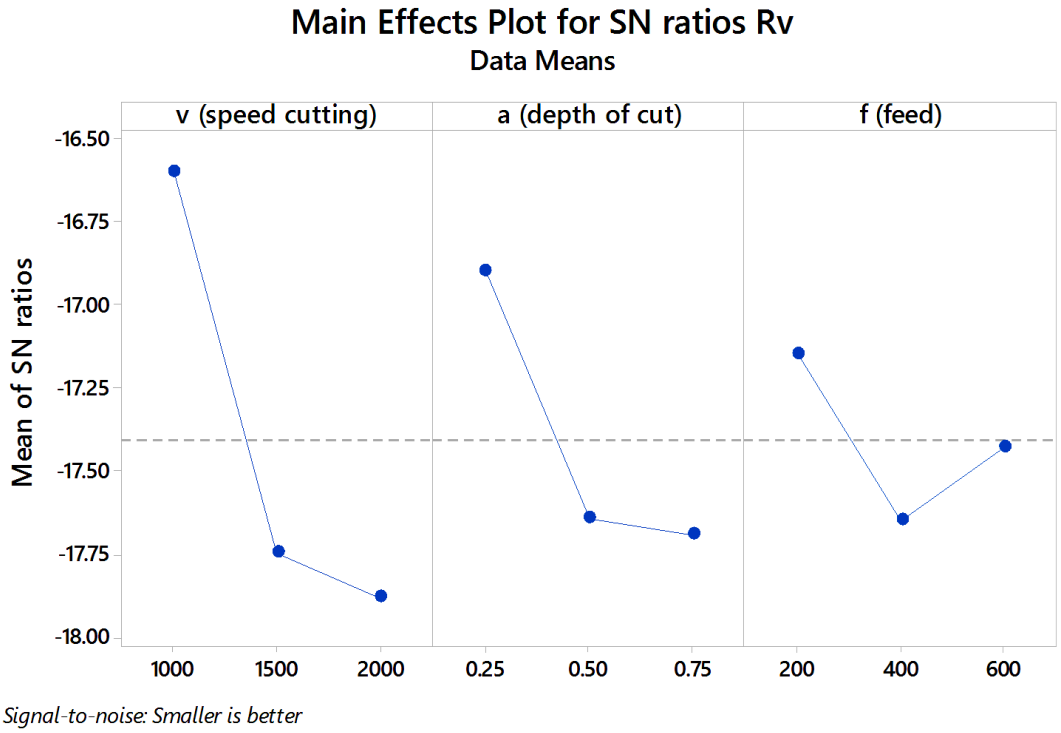
الجدول(4-6) الشكل(11-6) يظهران طريقة تاكوشي Ra

تحليل تاكوشي بالاعتماد على قيمة S/N للخشونة Rz			
التغذيةmm/min	عمق القطعmm	سرعة القطعrpm	المستوى
-22.7	**-22.4**	**-22.7**	**1**
-23.8	-23.7	-23.6	**2**
-23.2	-23.6	-23.5	**3**
1.1	1.33	0.92	**Delta**
2	**1**	**3**	**Rank**



الجدول(5-6) الشكل(12-6) يظهران طريقة تاكوشي Rz

تحليل تاكوشي بالاعتماد على قيمة S/N للخشونة Rv			
التغذيةmm/min	عمق القطعmm	سرعة القطعrpm	المستوى
-17.2	**-16.9**	**-16.6**	**1**
-17.7	-17.6	-17.8	**2**
-17.4	-17.7	-17.9	**3**
0.5	0.8	1.28	**Delta**
3	**2**	**1**	**Rank**



الجدول(6-6) الشكل(6-13) يظهران طريقة تاكوشي Rv

تبين النتائج السابقة أن الحل الأمثل بين المستويات الثلاثة وللمعاملات الثلاث بالنسبة لـ Ra، Rz، Rv هي المستوى الأول من سرعة القطع 1000rpm والمستوى الأول من عمق القطع 0.25mmوالمستوى الأول من التغذية 200mm/min .

يتم اختيار القيمة الأكبر لـ S/N لكل معامل وبالتالي يُحدد المستوى الأفضل.

يُلاحظ أن الحل الأفضل الثاني

الحل الأفضل الثاني			
f3	a3	v3	Ra
f3	a3	v3	Rz
f3	a2	v2	Rv

الاجراء الثالث:

اجراء تحليل التباين ANOVA للتجارب بهدف الحصول على نسبة تأثير كل بارامتر على الاستجابة سواءً كانت Ra,Rv,Rz .

النتائج مبينة في الجداول رقم (7-6)(8-6)(9-6) ونسبة تأثير (نسبة المشاركة) لكل بارامتر على الاستجابة

تحليل التباين Ra لآلة CNC						
نسبة المشاركة%	P	F	MS	SS	DF	Source
7.4	0.898	0.11	1.128	2.256	2	سرعة القطعrpm
14.8	0.815	0.23	2.244	4.488	2	عمق القطعmm
12.3	0.84	0.19	1.875	3.751	2	التغذيةmm/min
65.5			9.879	19.76	2	ERORR
				30.25	8	Total

الجدول(7-6) يظهر تحليل التباين لـ Ra

أي أن بارامتر سرعة القطع يؤثر بنسبة 7.4% في قيمة الخشونة Ra أما التغذية 12.3%وأما عمق القطع14.8% وأما عوامل الأخرى (معاملات الضجيج) يؤثر بنسبة 65.5% من قيمة الخشونة.

تحليل التباين Rz لآلة CNC						
نسبة المشاركة%	P	F	MS	SS	DF	Source
8.3	0.886	0.13	0.78	1.56	2	سرعة القطعrpm
16.7	0.795	0.26	1.562	3.124	2	عمق القطعmm
9.7	0.15	0.15	0.904	1.809	2	التغذيةmm/min
65.3			6.062	12.13	2	ERORR
				18.62	8	Total

الجدول(8-6) يظهر تحليل التباين لـ Rz

تحليل التباين Rv لآلة CNC						
نسبة المشاركة%	P	F	MS	SS	DF	Source
14.9	0.837	0.19	1.49	2.9789	2	سرعة القطعrpm
6	0.928	0.08	0.597	1.194	2	عمق القطعmm
1.9	0.976	0.02	0.189	0.379	2	التغذيةmm/min
77.2			7.657	15.31	2	ERORR
				19.86	8	Total

الجدول(9-6) يظهر تحليل التباين لـ Rv

الاجراء الرابع:

إيجاد العلاقة الرياضية التي تربط البارامترات بالاعتماد على طريقة استجابة السطح RSM وباستخدام برنامج minitab17، العلاقة الرياضية التي تصف الخشونة بحسب طريقة RSM:

$$Ra=2.58+0.00774f+2.54a-0.00306v - 2.80\,a^2 - 0.000011\,f^2$$

$$- 0.00249\,f*a + 0.000002\,f*v + 0.00183\,a*v$$

$$Rz = 5.8 + 0.0395\,f + 6.0\,a - 0.0016\,v$$
$$- 0.000049\,f^2 - 13.8\,a*a - 0.000002\,v^2$$
$$- 0.0089\,f*a + 0.000005\,f*v + 0.01090\,a*v$$

$$Rv = 1.96 + 0.0178\,f + 5.26\,a + 0.00050\,v$$
$$- 0.000022f^2 - 9.70\,a^2 - 0.000001v^2 - 0.00517\,f*a$$

$$+ 0.000002\,f*v + 0.00560\,a*v$$

MRR =+ 10.00 a *f.

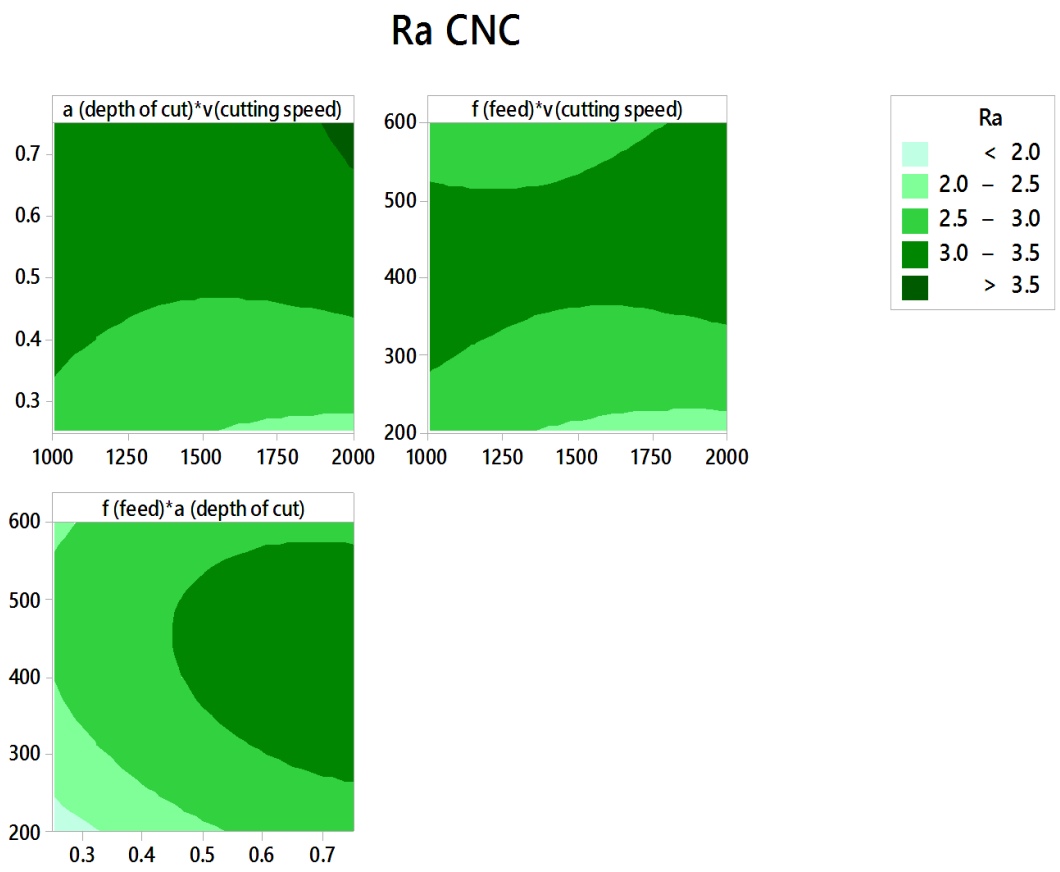
f:التغذية [mm/min] ,a:عمق القطع المحوري [mm] ,v :سرعة القطع[rpm]

للتحقق من صحة المعادلات تم تطبيق على بعض التجارب للخشونة Ra وكانت النتائج التي تبين الخطأ النسبي وفق ما يلي:

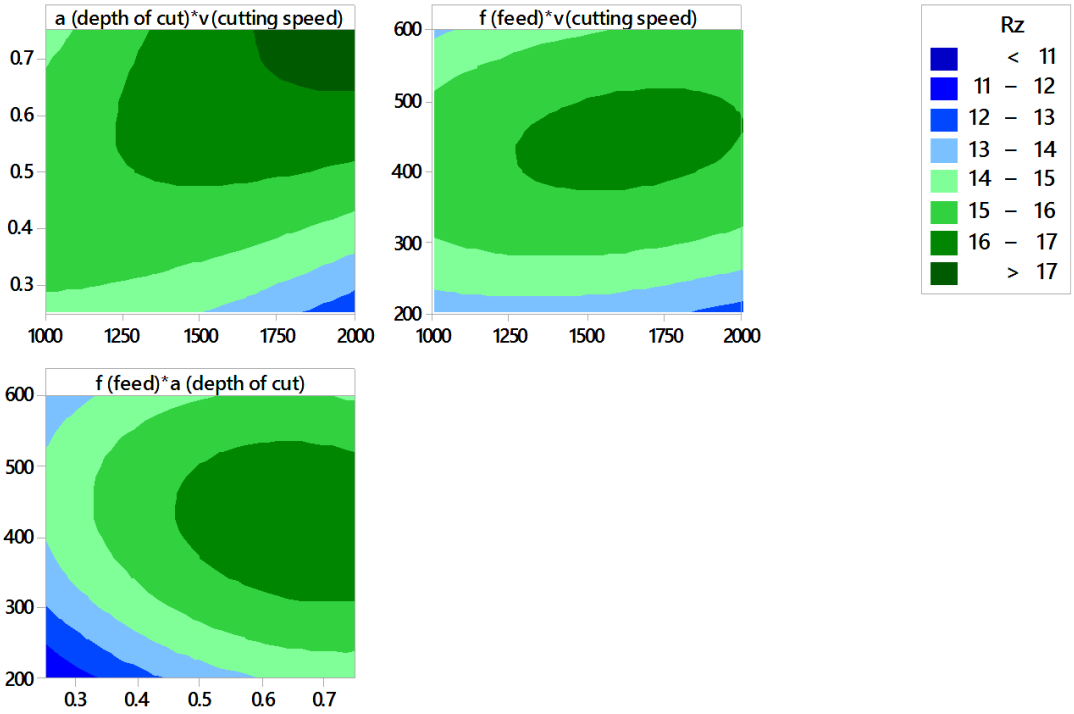
سرعة القطع	عمق القطع	التغذية	Ra المعادلة	Ra القياس	الخطأ النسبي
1000	0.5	200	2.264	2.46	%7.9
1500	0.5	200	1.391	1.816	%23.3
2000	0.5	200	2.439	2.439	%78.8
1000	0.25	200	1.821	2.715	%32.9

الأشكال التالية (6-14) (6-15) (6-16) تعبر عن منحنيات بطريقة المسارات لكل من بارامترات الخشونة بدلالة بارامترات التشغيل لكل زوج من هذه البارامترات حيث تم تميز كل مسار بحسب مجال الخشونة الناتج وتم توضيح ذلك بفرق اللون وتحديد مجال الخشونة للون محدد في جانب كل مخطط.

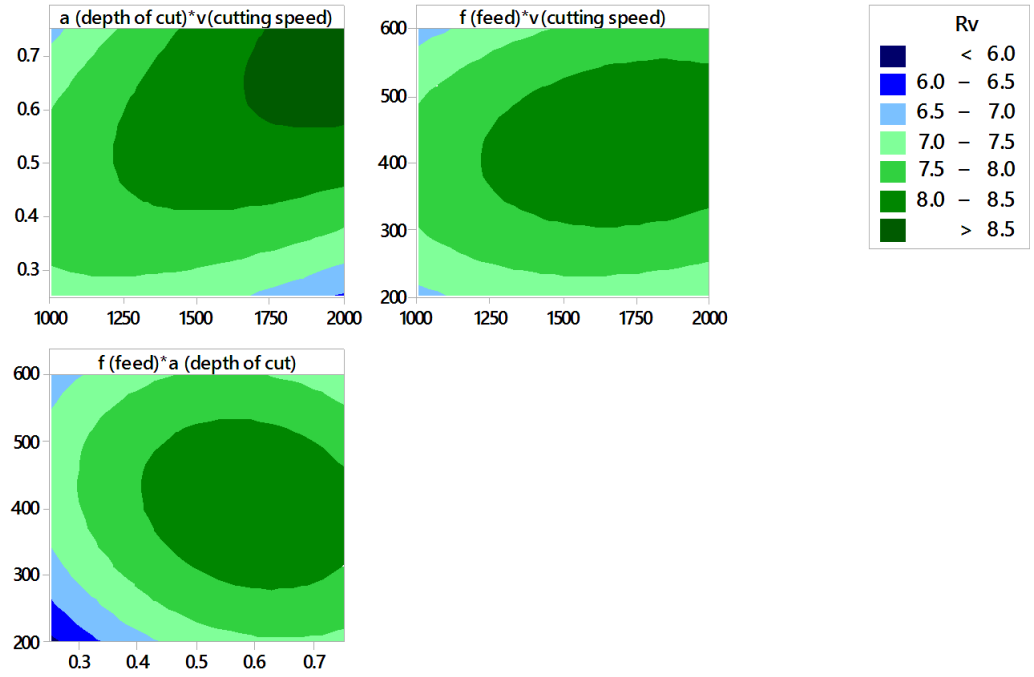
تم الحصول على هذه الأشكال باستخدام طريقة استجابة السطح وبالاستفادة منها تم الحصول على معادلات الخشونة.



الشكل(6-14) يظهر قيم الخشونة Ra لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات



الشكل(6-15) يظهر قيم الخشونة Rz لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات



الشكل(6-16) يظهر قيم الخشونة Rv لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات

بالاستفادة من طريقة استجابة السطح وباستخدام برنامج Minitab يمكن الحصول على الحل الأمثل:

1-إذا كان المطلوب الحصول على منتجات بجودة عالية بغض النظر على معدل إزالة الرايش، فإن الحل الأمثل هو الحصول على أصغر قيمة لكل من Ra,Rz,Rv وقيم البارامترات التي تحقق ذلك هي:

v(سرعة القطع) 2000rpm

a (عمق القطع) 0.25mm

f (التغذية) 200mm/min

2-أما إذا كان المطلوب الحصول على منتجات بجودة عالية مع الأخذ بالاعتبار معدل إزالة الرايش، فإن الحل الأمثل هو الحصول على أصغر قيمة ممكنة لكل من Ra,Rz,Rv وأعلى قيمة ممكنة لمعدل إزالة الرايش وقيم البارامترات التي تحقق ذلك هي:

v(سرعة القطع) 1000rpm

a (عمق القطع) 0.75mm

f (التغذية) 600mm/min

التجارب التي تمت على آلة التفريز الموجودة في الورشات:

الاجراء الأول:
تم تحديد كل من بارامترات التحكم وعنصر الاستجابة المستهدف من الدراسة، فتم اختيار كل من بارامترات (سرعة القطع، عمق القطع، التغذية)، أما الاستجابة فهي خشونة السطح المشغل(Ra,Rz,Rv) ومعدل الإنتاجية MRR

تم اجراء ثلاث تجارب لقياس الخشونة في ثلاث أماكن مختلفة من السطح الذي يتم قياسه ومن ثم يوجد المتوسط الحسابي، يبين الجدول رقم(10-6) ثلاث بارامترات وثلاث مستويات.

بارامترات التفريز	المستويات		
	المستوى1	المستوى2	المستوى3
سرعة القطعrpm(A)	1000	1400	2240
عمق القطعmm(B)	0.25	0.5	0.75
التغذيةmm/min(C)	200	400	600

جدول رقم (10-6) يُظهر معاملات التحكم ومستوياتها

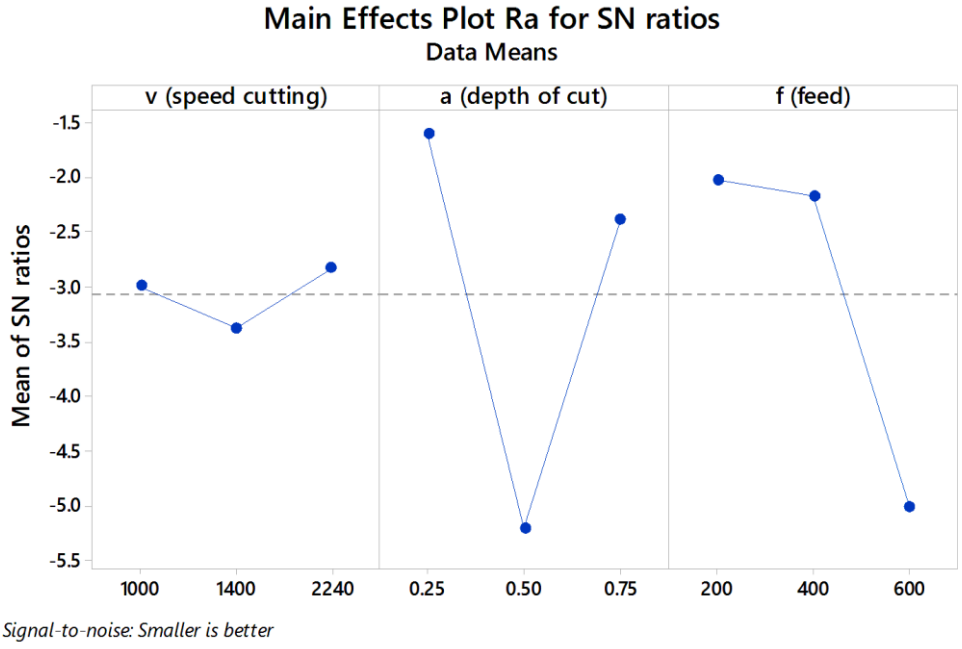
الاجراء الثاني:

استخدام طريقة تاكوشي وتحليل S/N المبين في الجداول (6-11)، (6-12)، (6-13)، (6-14) والأشكال (6-17)، (6-18)، (6-19).

S/N MRR	MRR الوسطي	S/N Rv	Rv الوسطي	S/N Rz	Rz الوسطي	S/N Ra	Ra الوسطي	المستوى C	المستوى B	المستوى A	رقم التجربة
53.9794	500	-4.609	1.7	-13.6049	4.789	-0.23986	1.028	1	1	1	1
66.0206	2000	-8.5139	2.665	-17.5945	7.581	-3.23933	1.452	2	2	1	2
73.0643	4500	-10.0567	3.183	-19.7988	9.771	-5.50162	1.884	3	3	1	3
60	1000	-7.6078	2.401	-16.489	6.675	-2.2521	1.296	2	1	2	4
69.5424	3000	-15.6452	6.057	-23.2064	14.465	-7.21944	2.296	3	2	2	5
63.5218	1500	-9.3699	2.941	-16.3711	6.585	-0.65238	1.078	1	3	2	6
63.5218	1500	-10.2029	3.237	-17.7872	7.751	-2.30555	1.304	3	1	3	7
60	1000	-15.024	5.639	-20.2954	10.346	-5.15837	1.811	1	2	3	8
69.5424	3000	-6.9894	2.236	-16.3023	6.533	-1.01533	1.124	2	3	3	9

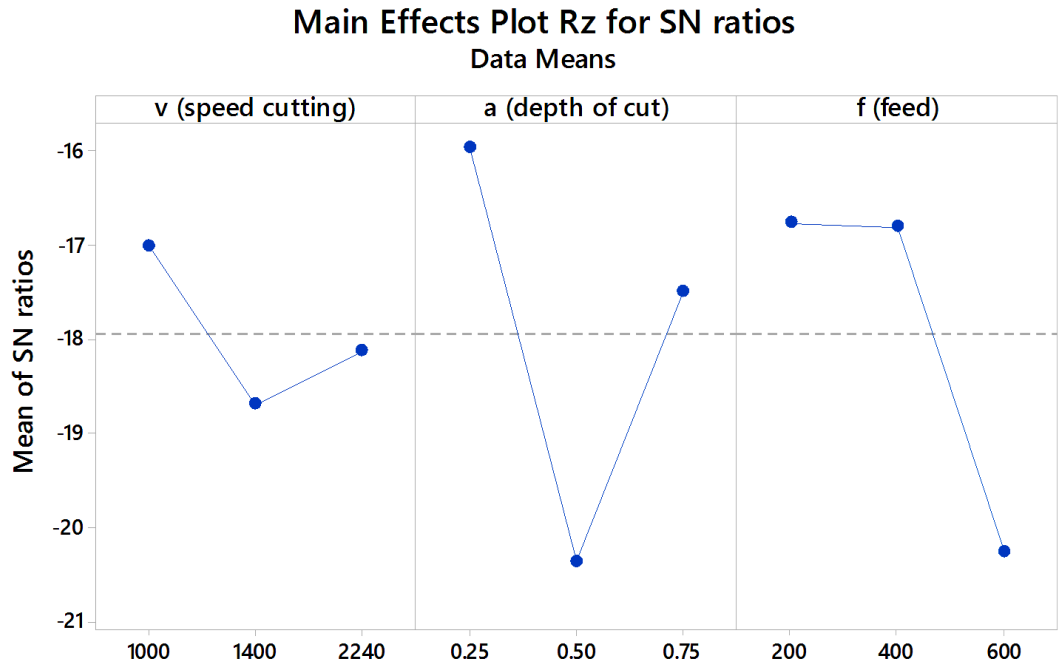
الجدول(6-11) يُظهر قيم S/N لقيم الخشونة وفق مصفوفة L9 للحالة المدروسة

التغذية mm/min	عمق القطعmm	سرعة القطع rpm	Ra
-2.02	**-1.6**	-2.99	1
-2.17	-5.21	-3.38	2
-5.01	-2.39	**-2.83**	3
2.992	3.607	0.548	Delta
2	1	3	Rank



الجدول(6-12) الشكل(6-17) يظهران طريقة تاكوشي Ra

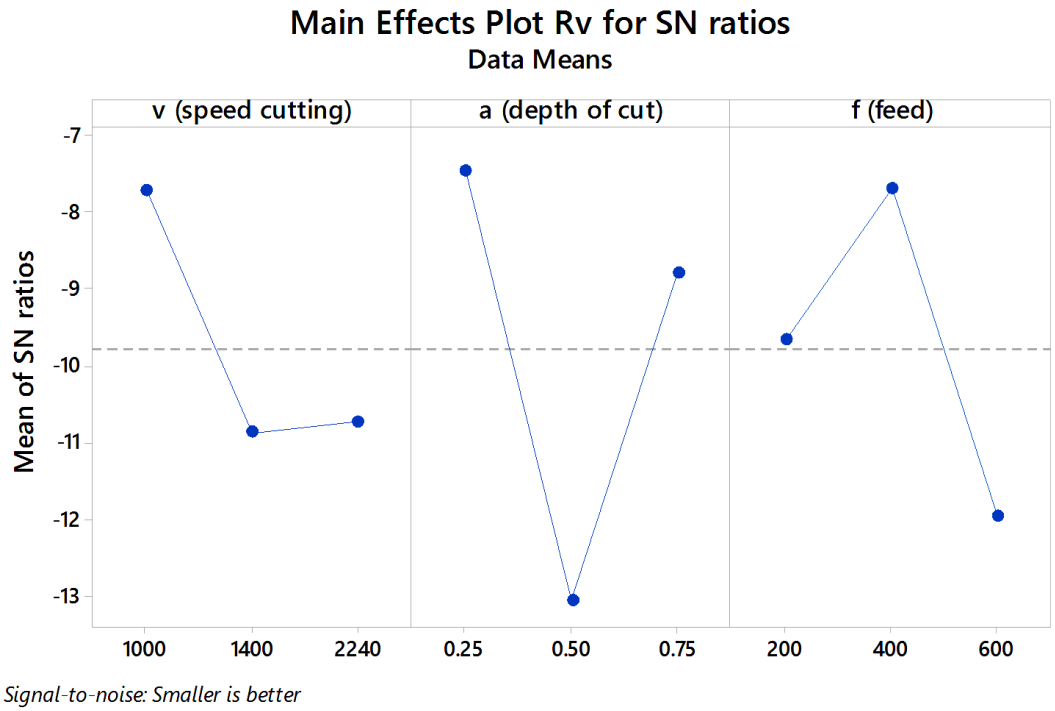
التغذية mm/min	عمق القطع mm	سرعة القطع rpm	Rz
-16.8	**-16**	**-17**	1
-16.8	-20.4	-18.7	2
-20.3	-17.5	-18.1	3
3.51	4.41	1.69	Delta
2	1	3	Rank



Signal-to-noise: Smaller is better

الجدول(6-13) الشكل(6-18) يظهران طريقة تاكوشي Rz

mm/min التغذية	mm عمق القطع	rpm سرعة القطع	Rv
-9.67	**-7.47**	**-7.73**	1
-7.7	-13.1	-10.9	2
-12	-8.81	-10.7	3
4.265	5.588	3.148	Delta
2	1	3	Rank



الجدول(6-14) الشكل(6-19) يظهران طريقة تاكوشي Rv

تبين النتائج السابقة أن الحل الأمثل الأول والثاني

الحل الأمثل بين المستويات الثلاثة وللمعاملات الثلاث بالنسبة لـ Ra

Ra: **v3a1f1** v1a3f2

الحل الأمثل بين المستويات الثلاثة وللمعاملات الثلاث بالنسبة لـ Rz

Rz: **v1a1f1** v3a3f2

الحل الأمثل بين المستويات الثلاثة وللمعاملات الثلاث بالنسبة لـ Rv

Rv: **v1a1f2** v3a3f1

الاجراء الثالث:

اجراء تحليل التباين ANOVA للتجارب بهدف الحصول على نسبة تأثير كل بارامتر على الاستجابة سواءً كانت Ra,Rv,Rz .

النتائج مبينة في الجداول رقم (15-6)(16-6)(17-6) ونسبة تأثير (نسبة المشاركة) لكل بارامتر على الاستجابة.

تحليل التباين Ra						
نسبة المشاركة %	P	F	Adj MS	Seq SS	DF	Source
1	0.943	0.06	0.237	0.474	2	V(سرعة القطع)
46	0.265	2.77	10.78	21.56	2	a(عمق القطع)
36.3	0.313	2.19	8.52	17.04	2	f(التغذية)
16.7			3.887	7.774	2	Residual Error
				46.85	8	Total

الجدول (15-6) يبين تحليل التباين لـRa

تحليل التباينRz						
Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	نسبة المشاركة %
V(سرعة القطع)	2	4.443	2.221	1.07	0.482	**7.06**
a(عمق القطع)	2	30.011	15.005	7.26	0.121	**47.69**
f(التغذية)	2	24.33	12.17	5.88	0.145	**38.66**
Residual Error	2	24.333	2.068			**6.8**
Total	8	62.923				

الجدول(16-6) يبين تحليل التباين لـRz

تحليل التباين Rv						
Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	نسبة المشاركة %
V(سرعة القطع)	2	19	9.5	3.32	0.232	**18.4**
a(عمق القطع)	2	51.109	25.555	8.93	0.101	**49.5**
f(التغذية)	2	27.336	13.668	4.77	0.173	**26.49**
Residual Error	2	5.726	2.863			**5.7**
Total	8	103.17				

الشكل (17-6) يبين تحليل التباين لـRv

أي أن بارامتر سرعة القطع يؤثر بنسبة 18.4% في قيمة الخشونة Rv أما التغذية 26.49%وأما عمق القطع49.5% وأما عوامل الأخرى (معاملات الضجيج) يؤثر بنسبة 5.7% من قيمة الخشونة.

يُلاحظ أن لبارامتر عمق القطع التأثير الأكبر في قيمة الخشونة وكما يُلاحظ أن نسبة مساهمة معاملات الضجيج (الاهتزازات، الرطوبة، الحراراة) أقل من آلة CNC الموجودة في كلية الهمك مما يدل على نتائج آلة التفريز الموجودة في الورشات أفضل من السابقة.

الاجراء الرابع:

معادلات الخشونة باستخدام طريقة استجابة السطح:

$$Ra = -0.39 + 0.00026\ v + 3.12\ a + 0.00319\ f$$
$$- 3.13\ a^2 + 0.000005\ f^2$$
$$+ 0.000690\ v*a - 0.000003\ v*f - 0.00193\ a*f$$

$$Rz = -4.92 + 0.00709\ v + 22.6\ a + 0.0034\ f$$

$$- 0.000001\ v^2 - 19.7\ a^2 + 0.000040\ f^2$$

$$+ 0.00221 v*a - 0.000014 v*f - 0.01255\ a*f.$$

$$Rv = -4.03 + 0.00546\ v + 12.10\ a - 0.00303\ f$$

$$- 0.000001\ v^2 - 8.32\ a^2 + 0.000026\ f^2$$

$$+ 0.00067\ v*a - 0.000007\ v*f - 0.00938\ a*f.$$

$$MRR = + 10.00\ a*f.$$

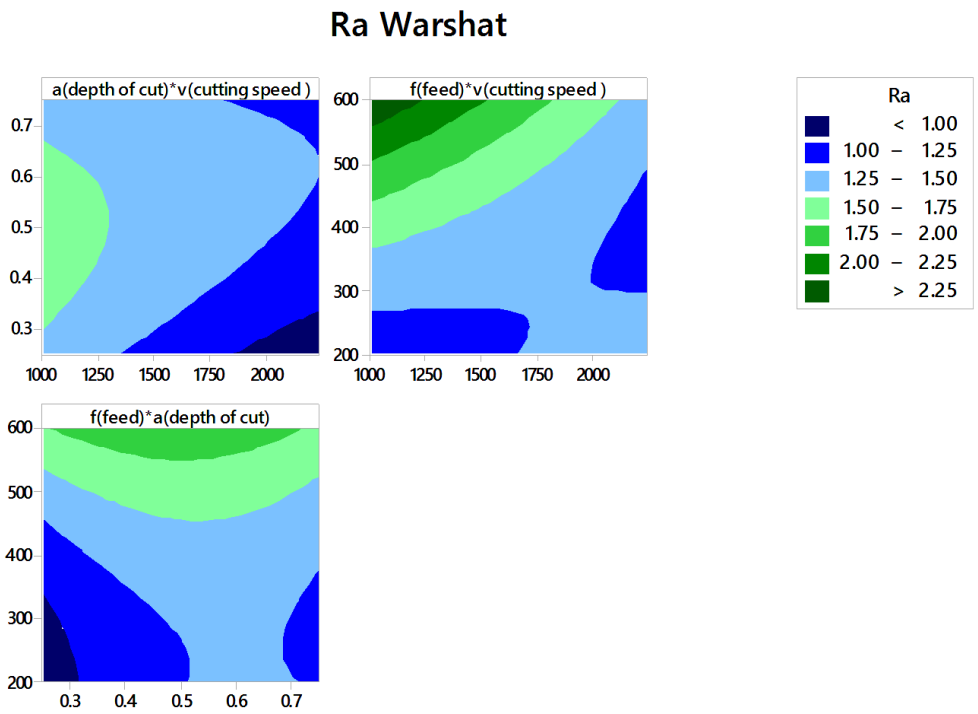
f : التغذية[mm/min] a : عمق القطع المحوري [mm/min] v : سرعة القطع[rpm]

للتحقق من صحة المعادلة Ra :

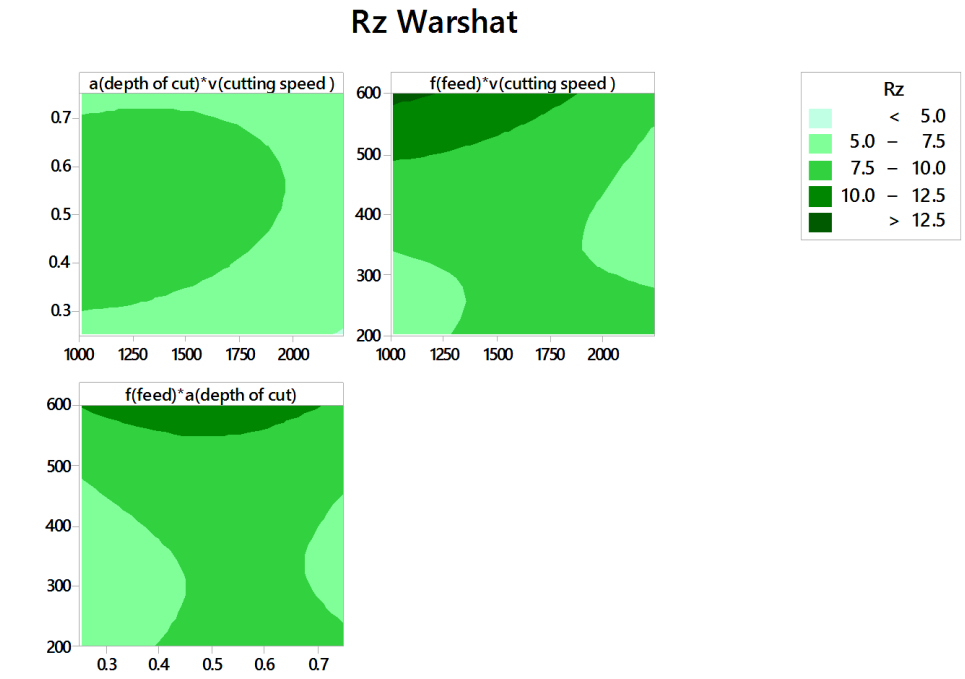
سرعة القطع	عمق القطع	التغذية	Ra المعادلة	Ra القياس	الخطأ النسبي
1000	0.5	400	1.4825	1.4525	%2.06
1000	0.25	400	1.3098	1.61	%18.64
1000	0.75	600	2.0123	1.8845	%6.78
1400	0.5	200	1.039	1.1315	%8.13

الأشكال التالية (6-20) (6-21) (6-22) تعبر عن منحنيات بطريقة المسارات لكل من بارامترات الخشونة بدلالة بارامترات التشغيل لكل زوج من هذه البارامترات حيث تم تميز كل مسار بحسب مجال الخشونة الناتج وتم توضيح ذلك بفرق اللون وتحديد مجال الخشونة للون محدد في جانب كل مخطط.

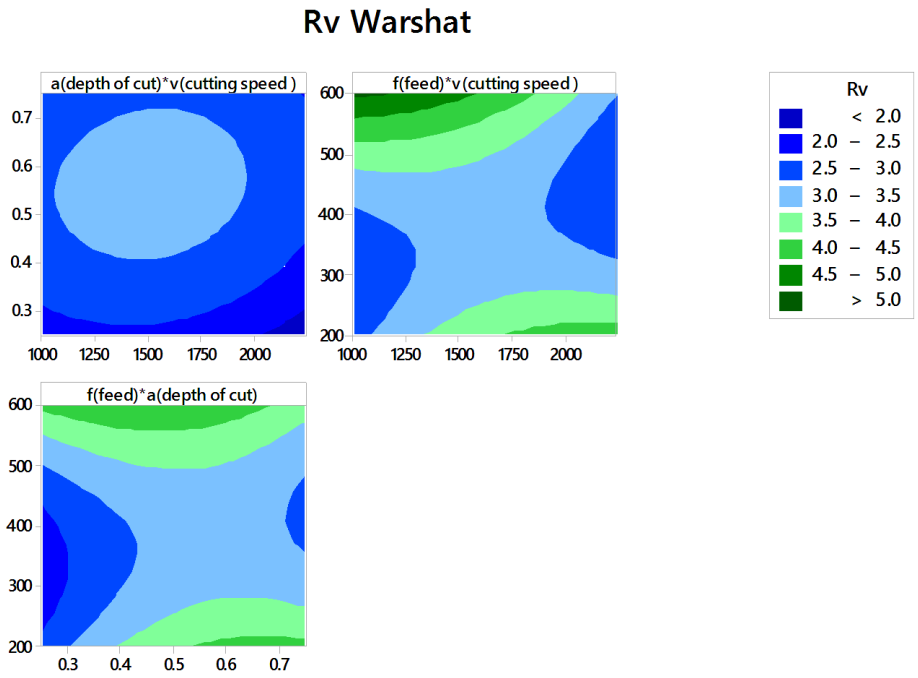
تم الحصول على هذه الأشكال باستخدام طريقة استجابة السطح وبالاستفادة منها تم الحصول على معادلات الخشونة.



الشكل(6-20) يظهر قيم الخشونة Ra لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات



الشكل(6-21) يظهر قيم الخشونة Rz لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات



الشكل(22-6) يظهر قيم الخشونة Rv لكل زوج من البارامترات بطريقة المسارات

يمكن الاستفادة من طريقة RSM للحصول على الحل الأمثل:

1-إذا كان المطلوب الحصول على منتجات بجودة عالية بغض النظر على معدل الإنتاجية، فإن الحل الأمثل هو الحصول على أصغر قيمة لكل من Ra,Rz,Rv وقيم البارامترات التي تحقق ذلك هي:

v(سرعة القطع) 2240rpm

a (عمق القطع) 0.25mm

f (التغذية) 387.969mm/min

2-أما إذا كان المطلوب الحصول على منتجات بجودة عالية مع الأخذ بالاعتبار معدل الإنتاجية، فإن الحل الأمثل هو الحصول على أصغر قيمة ممكنة لكل من Ra,Rz,Rv وأعلى قيمة ممكنة لمعدل الإنتاجية MRR وقيم البارامترات التي تحقق ذلك هي:

v(سرعة القطع) 2240rpm

a (عمق القطع) 0.75mm

f (التغذية) 551.515mm/min

3-أما إذا كان المطلوب الحصول على منتجات بجودة عالية أصغر قيمة ممكنة لـ Ra وقيم البارامترات التي تحقق ذلك هي:

v(سرعة القطع) 2240rpm

a (عمق القطع) 0.25mm

f (التغذية) 345.455mm/min

7-الفصل السابع: المخرجات البحثية "النتائج والتوصيات"

7-1 نتائج الدراسة:

تم في هذه الدراسة الحصول على النتائج التالية:

1- تم إيجاد القيم المثلى بالاعتماد على الطرق الإحصائية (تاكوشي، تحليل التباين، استجابة السطح) وأما كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً تم باستخدام تقنية الميكرفون.
2- تحديد النموذج الديناميكي المعبر عن الحالة المدروسة وإيجاد منحني الاستقرار التنبؤي بطريقة تحليلية، يُعتبر إيجاد منحني الاستقرار ذو أهمية اقتصادية كبيرة لأنه بواسطته يمكن معرفة الحدود الفاصلة بين بارامترات التي يكون فيها التشغيل مستقر والبارامترات التي يكون فيها التشغيل غير مستقر مما يعطي إمكانية في زيادة عمق القطع المسموح به مما يعني زيادة الانتاجية.
3- ايجاد آلية لكشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الميكرفون ورسم منحني الاستقرار التجريبي.
4- إيجاد أفضل قيمة من القيم المقترحة (المجال المدروس) لكل بارامتر بالنسبة للاستجابة المدروسة وتمت الدراسة بحيث تكون الاستجابة المدروسة (Ra,Rv,Rz,MRR) لكل من آلة التفريز CNC الموجودة في مخبر CAD-CAM وآلة التفريز الموجودة في مخبر آلات التشغيل باستخدام طريقة تاكوشي.
5- إيجاد نسبة تأثير كل بارامتر من بارامترات عملية التفريز بالاعتماد على طريقة تحليل التباين لكل من آلة التفريز CNC الموجودة في مخبر CAD-CAM وآلة التفريز الموجودة في مخبر آلات التشغيل مما يساعد في عمليات التحكم بحيث يتم اهمال البارامتر ذو نسبة تأثير ضعيفة والتركيز على البارامتر ذو نسبة تأثير كبيرة.
6- إيجاد المعادلات الرياضية (التجريبية) التي تصف الخشونة بدلالة بارامترات عملية التفريز مما يساعد في التنبؤ بقيمة الخشونة قبل اجراء عملية التفريز باستخدام طريقة استجابة السطح.
7- إيجاد الحل الأمثل لبارامترات التشغيل باستخدام طريقة استجابة السطح بهدف الوصول الى أعلى جودة للعناصر المشغلة وبأعلى إنتاجية ممكنة لكل من آلة CNC والفارزة التقليدية المتواجدتان في مخابر الكلية.
8- زيادة إنتاجية عملية التشغيل مع زيادة عمر أداة القطع والعمر التصميمي لآلة التشغيل وتوفير في الطاقة والزمن.
9- تخطيط عملية التشغيل بحيث يتم توليد المسار الأفضل بحيث يتم تعديل قيم البارامترات مما يضمن عدم حدوث اهتزازات محرضة ذاتياً وبأعلى إنتاجية.
10- انشاء قاعدة بيانات (جداول فنية) لآلة تشغيل معينة وأداة قطع معينة ومادة مشغولة معينة (يستفاد من هذه النتائج في حالة الإنتاج الكمي بشكل خاص) حيث أنه عدم وجود قواعد بيانات متوفرة بشكل مجاني وفي حال وجدت تكون لبارامترين كحد أقصى.
11- اختبار جودة آلة تشغيل معينة بالاستفادة من تجارب الصوت والخشونة وذلك من خلال مقارنتها بالجداول الفنية لآلات تشغيل واتخاذ القرار في حال كانت هذه الآلة تحتاج لعملية صيانة.

2-7 توصيات الدراسة:

- إنشاء مخبر بهدف إيجاد تابع الاستجابة وكل ما يلزم ذلك من (المطرقة الاهتزازية – حساسات التسارع-محلل فورييه) لما له من أهمية في دراسة ديناميك واهتزازات التركيبات الميكانيكية بشكل عام وإيجاد منحني الاستقرار بشكل خاص. مع العلم أنه تم المحاولة في تأمينها ولكن الظروف التي تمر بها بلدنا وعدم وجود تجهيزات بديلة ذات منشأ غير أوروبي وكون هذه التجهيزات قد يُستفاد منها في التصنيع العسكري لم نتمكن من تأمينها.
- الاستفادة من خوارزمية كشف الاهتزازات المحرضة ذاتياً باستخدام الميكرفون في التحكم الرقمي المباشر DNC بحيث يتم تجاوز الاهتزازات المحرضة ذاتياً بشكل مباشر بتعديل سرعة القطع.
- استخدام طرق الذكاء الصنعي (منطق الغموض-الشبكات العصبونية) للتنبؤ بقيم الخشونة بدلالة البارامترات ومقارنتها بالنتائج التي تم الوصول اليها بالطرق الإحصائية (طريقة تاكوشي-تحليل التباين-استجابة السطح).
- انشاء مخبر لبرنامج Minitab لما له من أهمية في التطبيقات الصناعية.
- توسيع الدراسة بحيث يتم إضافة معاملات(بارامترات) أخرى مثل (خواص أداة القطع(مادة أداة القطع- عدد الحدود القاطعة-عمر أداة القطع)، مقدار الدخول القطري لأداة القطع، تأثير سوائل التبريد، مادة المشغولة، نوع التفريز (الطرفي-الوجهي...)،نوع التفريز(هابط، صاعد)) باستخدام طريقة تاكوشي وتحليل التباين واستجابة السطح.
- دراسة الاهتزازات المحرضة ذاتياً في عمليات (الخراطة-التثقيب...) كون هذه الاهتزازات تحدث في معظم عمليات التشغيل التي تعتمد على مبدأ إزالة الرايش.
- استخدام أدوات قطع ذات خطوة متغيرة ومقارنتها مع أدوات القطع ذات الخطوة المنتظمة من حيث تأثيرها على تجاوز الاهتزازات المحرضة ذاتياً.
- استخدام طريقة تغيير السرعة بشكل منشاري أو جيبي ومقارنتها في حال سرعة قطع منتظمة ثابتة من حيث تأثيرها على تجاوز الاهتزازات المحرضة ذاتياً.
- إجراء عملية صيانة لآلة التفريز CNC الموجودة في مخبر CAD-CAM من خلال:
  1- تثبيت آلة التفريز بالأساس .
  2- زيادة جساءة عمود الدوران الرئيسي من خلال تعيير المحامل في حال كانت من النوع القابل للعيار أو تبديلها.

المصادر والمراجع:

[1] د. محمد رشيد شربجي، ديناميك الآلات والاهتزازات، كتاب جامعي، جامعة دمشق 1998.

[2] د. خليل عزيمة، نظرية القطع، نوطة، جامعة دمشق

[3] د. غسان حداد، هندسة الإنتاج، كتاب جامعي، جامعة دمشق.

[1] W.W.Seto, Mechanical Vibration Theory and Practice (Teorı´a y Problem as de Vibrations Meca´nicas), McGraw-Hill, Panama´, 1970.
[2] S.A.Tobias, Machine Tools Vibrations (Vibracionesen Ma´ quinas-Herra-mientas), URMO, Spain, 1961.
[3] F.W. Taylor, On the art of cutting metals, Transactions of ASME 28 (1907) 31,248,404.
[4] Guillem Quintana, Chatter in machining processes: A review, Elsevier, 2011.
[5] S.A. Tobias, W. Fishwick, Theory of regenerative machine tool chatter, The engineer,1958.
[6] N.H. Hanna, S.A. Tobias, Theory of nonlinear regenerative chatter, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME 96 Ser B(1) (1974) 247–255.
[7] H.E.Merrit, Theory of self-excited machine-tool chatter-contribution to machine tool chatter research1, ASME Journal of Engineering for Industry (1965) 447–454.
[8]Gurbachan S Sekhon, MONITORING AND CONTROL OF MACHINING OPERATIONS, The University of British Columbia(2013)5-20.
[9] R.P.H.Faassen, Chatter prediction and control for high-speed milling: modelling and experiments, Technische Universite it Eindhoven; Thesis (2007).
[10] M.Wiercigroch, A.M.Krivtsov, Frictional chatter in orthogonal metal cutting, Philosophical Transactions :Mathematical, Physical and Engineering Sciences(SeriesA)359(1781)(2001)713–738.
[11] M.Wiercigroch, E.Budak, Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting, Philosophical Transactions of the Royal Society London (2001)663–693, 359-264.
[12] J.Tlusty, M.Polacek, The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining, International Research in Production Engineering (1963) 465–474.
[13] J.Tlusty, Upper saddle river, Prentice-Hall,NJ,2000.
[14] L.R.Foulds, K.Neumann, A network flow model of group technology. Mathematical and Computer Modelling (2003)623–635.
[15] Schulz, H. (1995). High-speed milling of dies and moulds - cutting conditions and
Technology. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 44(1), 35-38.
[16] Schulz, H., and Moriwaki, T. (1992). High-speed machining. CIRP Annals Manufacturing Technology, 41(2), 637-645.
[17] https://www.linkedin.com/pulse/prototype-part-designing-cnc-machining-james-murphy.

[18] R.P.H.Faassen, N.vandeWouw, J.A.J.Oosterling,H.Nijmeijer, Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling, International JournalofMachineToolsandManufacture43(14)(2003/11) 1437–1446
[19] Toufic WEHBE, Gilles DESSEIN, Lionel ARNAUD, EXPERIMENTAL STUDY OF THIN PART VIBRATION MODES IN MACHINING,2012.
[20] (Mechanical engineering series) Clarence W. de Silva-Vibration and Shock Handbook-Taylor & Francis (2005).
[21] Allan Piersol, Thomas Paez (editors)-Harris' Shock and Vibration Handbook-McGraw-Hill Professional (2009)
[22] S. GRAHAM KELLY, Mechanical Vibrations THEORY AND APPLICATIONS, S I,2011.
[23] Y. ALTINTAS, METAL CUTTING MECHANICS,MACHINE TOOL VIBRATIONS,AND CNC DESIGN,2012, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
[24] William S. Levine, Control System Fundamentals,2013.
[25] Dr Michael Sek, Frequency Response Function (FRF), Victoria university,2010
[26] +uc-sdrl-rja,Frequency Response Function Measurements,2001.
[27] Robert Stengel, Transfer Functions and Frequency Response Aircraft Flight Dynamics,MAE 331, 2014.
[28] T.Insperger, B.P.Mann, T.Surmann, G.Ste´pa´ n, On the chatter frequencies of milling processes with runout, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(10)(2008)1081–1089.
[29] L.Vela-Martı´nez, J.C.Ja´ uregui-Correa, E.Rubio-Cerda,G.Herrera-Ruiz, A. Lozano-Guzma´ n, Analysis of compliance between the cutting tool and the workpiece on the stability of a turning process, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(9)(2008)1054–1062.
[30] A.J. Tang, Z.Q. Liu, Effect of helix angle and normal rake angle on stability in end milling, Advanced Materials Research 69-70 (2009) 394–3982111.
[31] M.Zatarain,J.Mun˜oa, G.Peigne,InspergerT.,Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability, CIRPAnnals—Manufacturing Technology 55(1)(2006)365–368.
[32] K. Ahmadi, F. Ismail, Machining chatter in flank milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture 50 (1) (2010) 75–85.
[33]I.Garitaonandia,M.H.Fernandes,J.Albizuri,J.M.Herna´ ndez, D.Barrenetxea, A new perspective on the stability study of center less grinding process, International JournalofMachineToolsandManufacture50(2)(2010) 165–173.
[34]M. Sajjadi, M.R. Movahhedy, Simulation of chatter vibrations in reaming, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition Proceedings 3 (2008) 441–447.
[35] G. Quintana, J. Ciurana, D. Teixidor, A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48 (15) (2008) 1637–1645.
[36] G. Totis, RCPM-A new method for robust chatter prediction in milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (3-4) (2009) 273–284.

[37] K.R. Kotaiah, J. Srinivas, K.J. Babu, Prediction of optimal stability states in inward-turning operation using genetic algorithms, International Journal of Machining and Machinability of Materials 7 (3-4) (2010) 211–225.
[38] S. Khachan, F. Ismail, Machining chatter simulation in multi-axis milling using graphical method, International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (2) (2009) 163–170.
[39] M. Mahnama, M.R. Movahhedy, Prediction of machining chatter based on FEM simulation of chip formation under dynamic conditions, International Journal of Machine Tools and Manufacture 50 (7) (2010) 611–620.

[40] S. Seguy, F.J. Campa, L.N.L. de Lacalla, L. Arnaud, G. Dessein, G. Aramendi, Toolpath dependent stability lobes for the milling of thin-walled parts, International Journal of Machining and Machinability of Materials 4 (4) (2008) 377–392.

[41 O.Gonzalo,G.Peigne´ , D.Gonza´ lez, UniversityofMetz(Eds.),Highspeed machining simulation of thin-walled components, in :Proceeding softhe Fifth International ConferenceonHighSpeedMachining,14–16March, Metz,France,2006.
[42] Q.H. Song, Y. Wan, S.Q. Yu, X. Ai, J.Y. Pang, Stability prediction during thin- walled workpiece high-speed milling, Advanced Materials Research 69–70 (2009) 428–4322110.
[43] A. Tang, Z. Liu, Three-dimensional stability lobe and maximum material removal rate in end milling of thin-walled plate, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 43 (1-2) (2009) 33–39.
[44] M. Rahman, Y. Ito, Detection of the onset of chatter vibration, Journal of Sound and Vibration 109 (2) (1986) 193–205.
[45] Y.S. Liao, Y.C. Young, A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36 (5) (1996/5) 651–660.
[46] OKUMA.Machining Navi,MacNavi. Availableat: /http://www.okuma.co.jp/ english/onlyone/process/index.htmlS.
[47] I.N. Tansel, M. Li, M. Demetgul, K. Bickraj, B. Kaya, B. Ozcelik, Detecting chatter and estimating wear from the torque of end milling signals by using Index Based Reasoner (IBR), International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010) 1–10.
[48] E. Kuljanic, G. Totis, M. Sortino, Development of an intelligent multi sensor chatter detection system in milling, Mechanical Systems and Signal Processing 23 (5) (2009) 1704–1718.
[49] C.A. Suprock, B.K. Fussell, R.B. Jerard, R.Z. Hassan, A low cost wireless tool tip vibration sensor for milling, ASME MSEC 2008, MSEC_ICMP2008-72492, 2008.
[50] Vela-Martı´nez L.,CarlosJauregui-CorreaJ.,RodriguezE.,Alvarez-RamirezJ. Using detrended fluctuation analysis to monitor chattering in cutter tool machines. International Journal of Machine Tools and Manufacture.

[51] Z. Yao, D. Mei, Z. Chen, On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine, Journal of Materials Processing Technology 210 (5) (2010) 713–719.
[52] J.H.Wang,K.N.Lee ,Suppression of chatter vibration of a CNC machine centre—an example,MechanicalSystemsandSignalProcessing10(5) (1996/9) 551–560.
[53] E. Marui, S. Ema, M. Hashimoto, Y. Wakasawa, Plate insertion as a means to improve the damping capacity of a cutting tool system, International Journal of Machine Tools and Manufacture 38 (10-11) (1998/10) 1209–1220.
[54] S.E. Semercigil, L.A. Chen, Preliminary Computations For Chatter Control In End Milling, Journal of Sound and Vibration 249 (3) (2002/1/17) 622–633.
[55] N.H. Kim, D. Won, J.C. Ziegert, Numerical analysis and parameter study of a mechanical damper for use in long slender endmills., International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (5) (2006/4) 500–507.
[56] M.H.Migue´ lez, L.Rubio,J.A.Loya,J.Ferna´ndez-Sa´ez Improvementofchatter stability in boring operations with passive vibration absorbers .International Journal of Mechanical Science.
[57] A.R. Yusoff, S. Turner, C.M. Taylor, N.D. Sims, The role of tool geometry in process damped milling, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010) 1–13.
[58 J.L. Dohner, J.P. Lauffer, T.D. Hinnerichs, N. Shankar, M. Regelbrugge, C. Kwan, et al., Mitigation of chatter instabilities in milling by active structural control., Journal of Sound and Vibration 269 (1–2) (2004/6) 197–211.
[59] C. Chiou, M. Hong, K.F. Ehmann, The feasibility of eigenstructure assignment for machining chatter control, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (15) (2003/12) 1603–1620.
[60] S.Huyanan,N.D.Sims ,Active vibration absorbers for chatter mitigation during milling, in: Institution of Mechanical Engineers 9th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery,vol.1,2008,pp.125–140.
[61] H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, Tuneable vibration absorber design to suppress vibrations: An application in boring manufacturing process, Journal of Sound and Vibration 318 (1-2) (2008) 93–108.
[62] E. Al-Regib, J. Ni, S. Lee, Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (12) (2003/9) 1229–1240.
[63] M.Zatarain,I.Bediaga,J.Mun˜oa, R.Lizarralde, Stability of milling processes with continuous spindle speed variation :analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation.,CIRPAnnals—Manufacturing Technology 57(1)3793-84.
[64] H.H. Zhang, M.J. Jackson, J. Ni, Spindle speed variation method for regenerative machining chatter control, International Journal of Nano manufacturing 3 (1-2) (2009) 73–99.
[65] S.Seguy,T.Insperger,L.Arnaud,G.Dessein,G.Peigne´ , On the stability of high-speed milling with spindle speed variation, International Journal of Advanced ManufacturingTechnology48(9-12)(2010)883–895.

[66] I.Bediaga,J.Mun˜oa, J.Herna´ ndez, L.N.Lo´ pez deLacalle,An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling, International JournalofMachineToolsandManufacture4;49(5)(2009) 384–394.
[67] D.Barrenetxea,J.I.Marquinez,I.Bediaga,L.Uriarte,Continuousworkpiece speed variation(CWSV):Model based practical application to avoid chatter in grinding, CIRPAnnals—Manufacturing Technology58(1)(2009) 319–322.
[68] A.Ganguli,A.Deraemaeker,M.Horodinca,A.Preumont ,Active damping of chatter in machine tools—demonstration with a 'hardware-in-the-loop' simulator, Proceeding softheI MECHEPartI:JournalofSystemsand Control Engineering219(5)(2005)359–369253.
[69] M. Wang, T. Zan, Y. Yang, R. Fei, Design and implementation of nonlinear TMD for chatter suppression: An application in turning processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture 50 (5) (2010) 474–479.
[70] Shamoto E., Mori T., Nishimura K., Hiramatsu T., Kurata Y. Suppression of regenerative chatter vibration in simultaneous double-sided milling of flexible plates by speed difference. CIRP Annals Manufacturing Technology
[71]C.Brecher,D.Manoharan,U.Ladra,H.-K¨opken, Chatter suppression with an active workpieceholder,ProductionEngineering4(2)(2010)239–245.
[72]D. Sathianarayanan, L. Karunamoorthy, J. Srinivasan, G.S. Kandasami, K. Palanikumar, Chatter suppression in boring operation using magnetorheological fluid damper, Material Manufacturing .Process 23 (4) (2008) 329–335.
[**73**] Y.Altintas, Manufacturing automation, metal cutting mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design,2000,Cambridge UniversityPress, USA, 2000.
[74]Merchant, M. E. (1944). Basic mechanics of the metal-cutting process. ASME Joournal of Applied Mechanics, 168-175
[75Adem, Khaled A.M , EFFECTS OF MACHINING SYSTEM PARAMETERS AND DYNAMICS ON QUALITY OF HIGH-SPEED MILLING,2013.
[76] Y.Altintas, E.Budak, Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Annals—Manufacturing Technology;1995.
[77] Y.Altintas,M.Weck, Chatter stability of metal cutting and grinding,CIRP Annals—Manufacturing Technology53(2)(2004)619–642.
[78] Brian Stone, Chatter and Machine Tools, springer,2014.
[79] López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., and (Eds). (2008). Machine tools for high performance machining.
[80]Kalpakjian, S., and Schmid, S. R. (2001). Manufacturing engineering and technology (4th ed.).New Jersey U.S.A: Prentice Hall.
[81] T.Insperger,G.Ste´pa´ n, Semi-discretization method for delayed systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering55(5)(2002) 503–518.
[82]-T. Delio, J. Tlusty, S. Smith, Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control, University of Florida,1992
[83]-Guillem Quintana, JoaquimCiurana, Ine´ s Ferrer, CiroA.Rodrı´guez, Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes, Elsevier,2009
[84]-Chao-Ching Ho, Jin-Chen Hsu, Chih-Hao Lien, Ping-Yen, Hsieh, In situ chatter suppression in milling machines using microphone, SPIE - International Society for Optical Engineering,2013

[85]- T.L. Schmitz, K. Medicus, B. Dutterer, Exploring once-per-revolution audio signal variance as a chatter indicator, Machining Science and Technology 6 (2) (2002) 215–233.
[86]-Edouard Rivi´ere_ ,V. Stalon_, O. Van den Abeele_, Enrico Filippi_ , Pierre Dehombreux_,Chatter detection techniques using microphone, Facult´e Polytechnique de Mons,,2006
[87]- W.L. Weingaertner, R.B. Schroeter, M.L. Polli, J. de Oliveira Gomes, Evaluation of high-speed end-milling dynamic stability through audio signal measurements, Journal of Materials Processing Technology 179 (1-3) (2006) 133–138.
[88]- Y. Altintas, M. Weck,Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding,2010
[89]- T.L. Schmitz, Chatter recognition by a statistical evaluation of the synchronously sampled audio signal [2], Journal of Sound and Vibration 262 (3) (2003) 721–730.
[90]-ManufacturingAutomationLaboratoriesInc.CUTPRO8.0.Availableat: /http://www.malinc.com/index.htmlS.
[91]-Hayhurst, David R.; Hinduja, S.; Atkinson, J.; Burdekin, M.; Hannam, R. G.; Li, L.; Labib, A W, Monitoring of Chatter in High Speed End milling Using Audio Signals Method, Springer-Verlag,2000
[92]Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., and Ryffel, H. H. (2004). Machinery's handbook(27th edition) & guide to machinery's handbook (27th ed.). New York; Brighton Eng.: The Industrial press; The Machinery publishing co., ltd.
[93]-K.S. Smith, Automatic Selection of the Optimum Spindle Speed in High Speed Milling, Ph.D. thesis, University of Florida,Gainesville, 1987.
[94]Andras Eppel, Eniko T. Enikov, Tamas Insperger,and StepaGabor, FEASIBILITY STUDY OF OPTICAL DETECTIONOF CHATTER VIBRATION DURING MILLING, Taylor & Francis Group,2010
[95] vibration and shock handbook, Instrumentation and Testing ch25, Regenerative Chatter in Machine Tools ch35, Instrumentation ch40,Taylor & Francis Group.
[Kalpakjian, S., and Schmid, S. R. (2001). Manufacturing engineering and technology (4th ed.).
New Jersey U.S.A: Prentice Hall.
[97]Lou, M. S., Chen, J. C., and Li, C. M. (1998). Surface roughness prediction technique for CNC end milling. Journal of Industrial Technology, 15(1).
[98]Groover, M. P., and Society of Manufacturing Engineers. (2004). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (2nd ed.). New York: John Wiley and Sons.
[99] ZYGO, Surface Texture Paramaters,2015.
[100] G. Quintana, J. de Ciurana, J. Ribatallada, Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations,2011.
[101]Benardos, P. G., and Vosniakos, G. (2003). Predicting surface roughness in machining: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43 (8), 833-844.
[102]Martellotti, M. E. (1941). An analysis of the milling process. Transactions of ASME, 63, p.667.

[103] Coker, S. A., and Shin, Y. C. (1996). In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36(3), 411-422.
[104] Tsai, Y., Chen, J. C., and Lou, S. (1999). An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39(4), 583-605.
[105] Risbood, K. A., Dixit, U. S., and Sahasrabudhe, A. D. (2003). Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. Journal of Materials Processing Technology, 132(1-3), 203-214.
[106]Ozel, T., and Karpat, Y. (2005). Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. International Journal of Machine Toolsand Manufacture, 45(4-5), 467-479.
[107]Brezocnik, M., and Kovacic, M. (2003). Integrated genetic programming and genetic algorithm approach to predict surface roughness. Materials and Manufacturing Processes, 18(3), 475-491.
[108]Ramesh, S., Karunamoorthy, L., and Palanikumar, K. (2008). Fuzzy modeling and analysisof machining parameters in machining titanium alloy. Materials and Manufacturing Processes, 23(4), 439-447.
[109]Samanta, B., and Nataraj, C. (2008). Surface roughness prediction in machining using computational intelligence. International Journal of Manufacturing Research, 3(4), 379-392.
[110]- Ranjit K. Roy, Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement, John Wiley & Sons,2001.
[111]. Ross, P.J Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. 2nd edition, New york, McGraw-Hill. (1996).
[112]. Roy, R.K. A primer on Taguchi method. Von Nostrad Reinhold, New York. 1990
[113]. Lindman H, Analysis of variance in experimental design, (Springer-Verlag, New York, 1992).
[114]Z.Z. Chowdhury, Application of Response Surface Methodology (RSM) for Optimizing Production Condition for Removal of Pb (II) and Cu (II) Onto Kenaf Fiber Based Activated Carbon,2012.

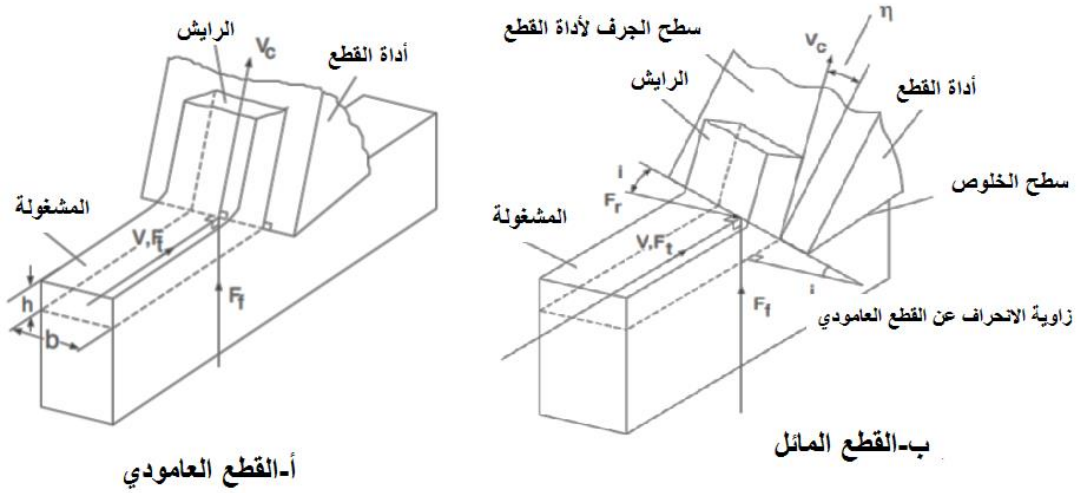
الملاحق:

الملحق 1: نظرية القطع وأنواع عملية التفريز

1-1 نظرية القطع:

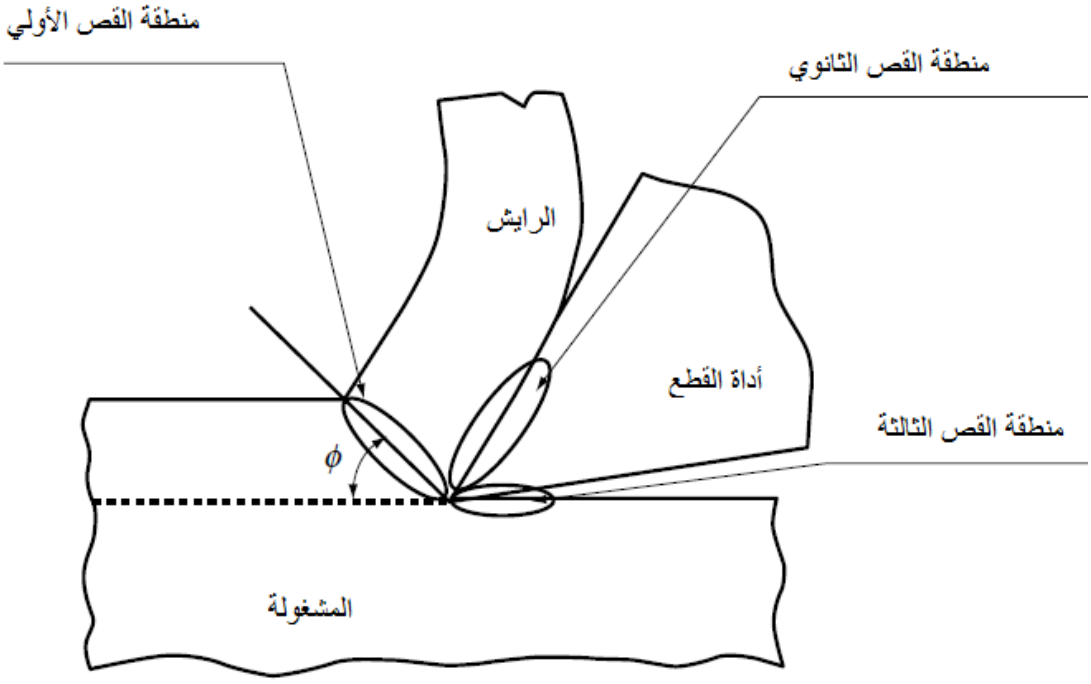
1-1-1 تعريف نظرية القطع:

عملية القطع تتم نتيجة التأثيرات الديناميكية بين عناصر التركيبة (أداة القطع-الألة-المشغولة).
إن الوصف الرياضي لظاهرة القطع يجب أن يأخذ بالاعتبارات التالية: علم الحركة للتركيبة، ديناميك التركيبة، شكل تشوه الرايش، والخصائص الميكانيكية للمشغولة، الخصائص التيرموديناميكية في منطقة التشغيل. معرفة ميكانزيم (ألية تشكل الرايش) له دور في تطور تقنيات التشغيل. ولكن تعتبر ألية تشكل الرايش معقدة ويعود السبب الى الظواهر الفيزيائية التالية: التشوهات اللدنة-المرنة في منطقة القطع، الاحتكاك المتغير بين أداة القطع –الرايش-المشغولة، الحرارة الناتجة وانتشارها، الالتصاق، انتشار المادة، مادة التركيبة، التحولات الطورية في مادة التركيبة. [73]
على الرغم من أن معظم عمليات قطع المعادن تكون ثلاثية الأبعاد والأشكال الناتجة معقدة، ولكن عادةً يتم تبسيط عملية القطع الى محورين كما اقترح Altintas ويطلق على التبسيط القطع العامودي أو المائل كما هو مبين في الشكل (1).
الفرق بين العامودي والمائل أن سرعة القطع تكون عامودية على الحد القاطع لأداة القطع في القطع العامودي بينما في المائل تكون هنالك زاوية أقل من 90 درجة بالنسبة للمستوي.



الشكل (1) يبين أ-القطع العامودي orthogonal ب-القطع المائل oblique [23]

يمكن التمييز بين ثلاث مناطق للتشوه في عملية تشكل الرايش كما في الشكل (2).



الشكل(2) يبين الظواهر الفيزيائية المتشكلة في منطقة القص[11]

الظواهر الفيزيائية التي تظهر في كل منطقة وفق ما يلي:

1- منطقة القص الأولي: عندما تضغط أداة القطع على المشغولة فإنه يتشكل منطقة قص أولي تؤدي الى بدء تشكل الرايش.

الظواهر الفيزيائية التي تظهر في هذه المنطقة هي:

- تشوهات لدنة-مرنة.
- تولد حرارة.
- تحول طوري للمادة.

2- منطقة القص الثانوي: تقع بين سطح الجرف لأداة القطع والرايش المتشكل الذي يتحرك ويتشوه على طول سطح الجرف لأداة القطع.

الظواهر الفيزيائية التي تظهر في هذه المنطقة هي:

- تشوهات لدنة.
- تولد حرارة.
- الاحتكاك.
- الالتصاق وانتشار المادة.

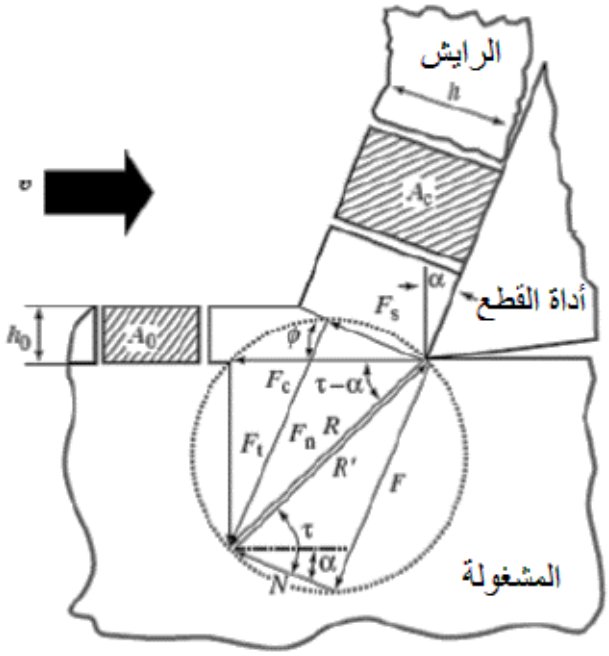
3- منطقة القص الثالثة: منطقة الاحتكاك بين سطح الخلوص لأداة القطع وسطح المشغولة الجديد.

الظواهر الفيزيائية التي تظهر في هذه المنطقة هي:

- تشوهات لدنة.
- تولد حرارة.

- الاحتكاك[11].

الباحثون لا يزالون يحاولون أن تطوير نموذج مكافئ لعملية إزالة الرايش ولكن كان الباحثون يركزون في دراستهم لنظرية القطع على تخمين الأمور التالية: شكل الرايش، قوى عملية القطع، الحرارة المتشكلة.



الشكل (3) يبين توزع قوة القطع في كل منطقة من مناطق القص الثلاثة وفق نموذج Merchant[74]

أول من وضع نموذج لتشوه الرايش ومخطط قوى القطع في حالة القطع العامودي قام به العالم Merchant عام 1944 كما هو مبين في الشكل(3)[74].

تمثل القوى المبينة في الشكل (3) v:سرعة القطع، F_c: قوة القطع، F_t :قوة الدفع أو المحورية، F_s :قوة القص F: قوة الاحتكاك، F_n: قوة العامودية على اتجاه قوة القص، N : القوة العامودية بالنسبة لسطح الجرف، R : محصلة قوة القطع المؤثرة على الرايش والمشغولة، R' : محصلة قوة القطع المؤثرة على أداة القطع، Φ: زاوية القص،α : زاوية الجرف،τ: زاوية الخلوص،t:عرض الرايش، h_0 :عمق القطع الابتدائي.

منطقة القص الأولي يؤثر زوج من القوى F_n F_s والمحصلة R.

منطقة القص الثانوي يؤثر زوج من القوى N F و المحصلة R'.

منطقة القص الثالثة يؤثر زوج من القوى $F_t F_c$ والمحصلة R.

بارامترات عملية القطع مثل التغذية وسرعة القطع وعمق القطع لها تأثير على ميكانزيم تشوه الرايش، حيث أي تغيير في هذه البارامترات تعدل القيم الأنية للقوة N وF و v وتؤثر على ديناميك التركيبة وفق المعادلات التالية:

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\tau \qquad (1) \quad [11]$$

حيث μ: معامل الاحتكاك بين الرايش وأداة القطع.

$$R = R' = \sqrt{{F_c}^2 + {F_t}^2} \qquad (2) \quad [74]$$

$$F = F_t \cos\alpha + F_c \sin\alpha \qquad (3) \quad [74]$$

$$F_s = F_c \cos\Phi - F_t \sin\Phi \qquad (4) \quad [74]$$

بالحل التقريبي ل Merchant وبمعرفة زاوية القص وبعض ثوابت عملية التشغيل يمكن حساب محصلة القوى:

$$R = \frac{F_s}{\cos(\tau - \alpha + \Phi)} \qquad (5) \quad [74]$$

$$F_s = \sigma_s A_s \qquad (6) \quad [74]$$

بحيث A_s: المقطع العرضي لمستوي القص، σ_s : اجهاد القص، α وτ زوايا الجرف والاحتكاك بالترتيب، والمقطع العرضي لمستوي القص يعطى بالعلاقة التالية :

$$A_s = \frac{wh_0}{\sin\Phi} \qquad (7) \quad [74]$$

$$R = \frac{\sigma_s w h_0}{\cos(\tau - \alpha + \Phi)\sin\Phi} \qquad (8) \quad [74]$$

وبالتالي فإن قوة القطع وقوة الدفع:

$$F_c = R\cos(\tau - \alpha) = \frac{\sigma_s w h_0 \cos(\tau - \alpha)}{\cos(\tau - \alpha + \Phi)\sin\Phi} \qquad (9) \quad [74]$$

$$F_t = R\sin(\tau - \alpha) = \frac{\sigma_s w h_0 \sin(\tau - \alpha)}{\cos(\tau - \alpha + \Phi)\sin\Phi} \qquad (10) \quad [74]$$

يفترض الحل التقريبي ل Merchant أن الحل يعتمد على زاوية القص

تحسب زاوية القص وفق نظرية استخدام الطاقة الأصغري : Minimum Energy Principle:

$$\Phi = \frac{1}{4}\pi - \frac{\tau}{2} + \frac{\alpha}{2} \qquad (11) \quad [74]$$

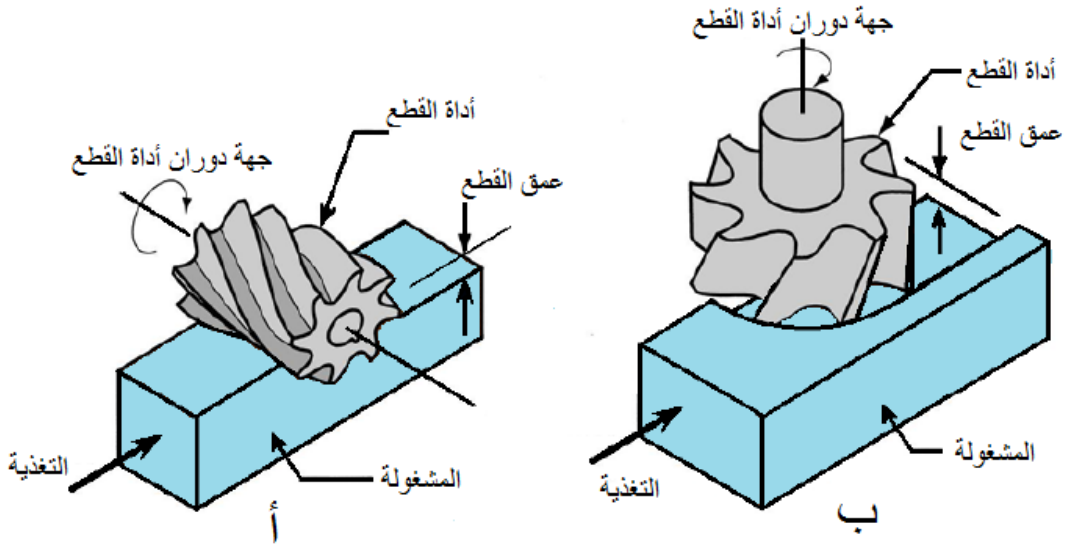
وتحسب زاوية القص وفق نظرية اجهاد القص الأعظمي: Maximum Shear Stress Principle

$$\Phi = \frac{1}{4}\pi - \tau + \alpha \qquad (12) \quad [74]$$

ملاحظة: ان المعادلات السابقة تعبر على القطع العامودي وفي هذا البحث سيتم دراسة عملية التفريز وبالتالي فلا حاجة لذكر المعادلات المعبرة عن القطع المائل.

2-1 عملية التفريز:

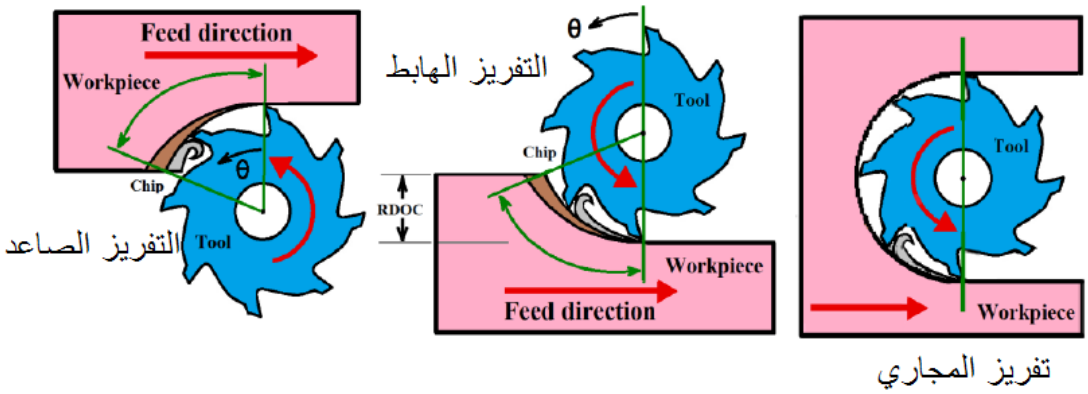
تعتبر عملية التفريز من أهم العمليات التي تعتمد على ازالة الرايش حيث يتم ازالة المادة بواسطة دوران أداة القطع (حد قاطع واحد أو متعددة الحدود القاطعة)؛ عادةً توضع أداة القطع على عمود الدوران بينما يتم تثبيت المشغولة على طاولة التشغيل؛ تتحرك المشغولة بشكل خطي باتجاه أداة القطع وبالتالي تتم عملية القطع.
تقسم عملية التفريز الى نوعين أساسيين كما هو مبين في الشكل (4):



الشكل (4) يبين أنواع التفريز الرئيسية أ-تفريز محيطي ب-تفريز وجهي أو طرفي [75]

إذا كان محور أداة القطع يوازي السطح المشغل يدعى تفريز محيطي، تتم عملية القطع بواسطة أسنان (الحدود القاطعة) التي تكون على المحيط الخارجي لأداة القطع، حيث أنه يمكن أن تكون الأسنان مستقيمة (عدل) أو محلزنه وبالتالي يكون القطع عامودي أو مائل.
أما إذا كان محور أداة القطع عامودي على سطح المشغولة فيكون التفريز وجهي أو طرفي، سيتم في هذه الدراسة استخدام الطرفي.

وتقسم عملية التفريز بحسب طريقة التشغيل جهة دوران أداة القطع والتغذية الى تسلقي هابط وتقليدي صاعد كما هو مبين في الشكل **(5)**.



الشكل (5) أنواع التفريز بحسب طريقة التشغيل. [75]

الهابط (التسلقي):

- التغذية ودوران أداة القطع بنفس الجهة.
- الحد القاطع لأداة القطع يبدأ بالقطع بعمق أعظمي وثم يتضاءل بشكل تدريجي وبالتالي تكون عملية القطع لها صفة الصدم الفجائي.
- شكل الرايش يشبه نصف هلال
- تتميز هذه الطريقة بالحصول على سطوح جيدة التشغيل حيث أداة القطع تضغط على المشغولة مما يعزز تثبيتها في المثبتات.

تستخدم هذه الطريقة إذا كانت المشغولة رقيقة ويصعب تثبتها على الطاولة، عندما يكون مطلوب الحصول على سطوح جيدة التشغيل، عندما تكون آلة التفريز مقاومة للاهتزازات والصدمات أي آلة التفريز ذات جساءة عالية لأن هذه الطريقة تحرض اهتزازات بسبب طبيعتها الصدمية.

أما التقليدي الصاعد:

- تكون جهة التغذية وجهة دوران أداة القطع بجهتين متعاكستين.
- الحد القاطع يبدأ القطع بعمق القطع الأصغر وينتهي بعمق القطع الأعظمي وبالتالي تتدرج قوة القطع على كل من المشغولة والحد القاطع دون حدوث عملية الصدم.
- الرايش على شكل نصف هلال.
- يبدأ الحد القاطع لأداة القطع التفريز بعملية القطع على ثلاث مراحل انزلاق مقطع التفريز على المشغولة، ضغط أداة التفريز على المشغولة، بدء عملية القطع.
- وبصورة عامة السطوح الناتجة لا تكون جيدة التشغيل لأن أداة القطع تحاول نزع المشغولة من مثبتاتها.

على الرغم من مساوئ هذه الطريقة ولكنها هي أكثر شيوعاً في حالة سهولة عملية التثبيت وعندما لا يكون مطلوب سطح جيد الاستواء وفي آلات التفريز غير المؤمنة من الاهتزازات.

في حالة تفريز المجاري slot تدخل أداة القطع بقطرها الكامل كما هو مبين في الشكل(5-4) [73] [74] [75] [79] [80].

2-1 نظرية الرواسب:

2-1-1 شكل تابع الاستجابة في حال تركيبة ذات درجة حرية واحدة وبعد اجراء لابلاس (1)"

$$h(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1/m}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)" \text{ [23]}$$

حيث أن حل المعادلة $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n$ تحتوي جذرين عقدين وفق ما يلي:

$$s_1 = -\zeta\omega_n + i\omega_d \quad , \quad s_1^* = -\zeta\omega_n - i\omega_d$$

باستخدام نظرية الرواسب يمكن أن يُكتب تابع الاستجابة بطريقتين وفق المعادلة (2)"

$$h(s) = \frac{r}{s - s_1} + \frac{r^*}{s - s_1^*} = \frac{\alpha + \beta s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)"\text{[23]}$$

$r = \sigma + iv$, $r^* = \sigma - iv$ حيث الراسب (باقي القسمة)

$\alpha = 2(\zeta\omega_n\sigma - \omega_d v)$, $\beta = 2\alpha$ والبارامترات

تُستخدم نظرية الرواسب في تجارب الحصول على تابع الاستجابة حيث يتم الحصول على قيم α, β و تشكل هذه القيم نتيجة لهذه الطريقة *modal test*.

2-1-2 شكل تابع الاستجابة في حالة كانت التركيبة تملك عدة درجات حرية:

معادلة الحركة في تركيبة ذات عدة درجات حرية.

$$([M]s^2 + [C]s + [K])\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (3)"\text{[23]}$$

تابع الاستجابة على شكل مصفوفة في حال درجتين حرية:

$$[H(s)] = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & h_{12}(s) \\ h_{21}(s) & h_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$h_{11}(s) = \left[\frac{r_{11.1}}{s - s_1} + \frac{r_{11.1}^*}{s - s_1^*}\right]_{mode1} + \left[\frac{r_{11.2}}{s - s_2} + \frac{\boldsymbol{r_{11.2}^*}}{\boldsymbol{s - s_2^*}}\right]_{\boldsymbol{mode2}}$$

$$h_{11}(s) = \left[\frac{\alpha_{11.1} + \beta_{11.1}s}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n.1} + \omega_{n.1}^2}\right]_{mode1} + \left[\frac{\alpha_{11.2} + \beta_{11.2}s}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n.2} + \omega_{n.2}^2}\right]_{mode2} \quad (4)"$$

يتم الحصول على مصفوفة تابع الاستجابة التي تتكون من العناصر $h_{12}(s)$و$h_{11}(s)$ تجريبياً من خلال القياسات التجريبية في حال كانت التركيبة بدرجتان حرية ويتم تحريضها بواسطة القوة F

$$\{F\} = \{F_1 \quad F_2\}$$

على سبيل المثال، حساس التسارع يوضع عند النقطة 1والتركيبة تضرب بواسطة المطرقة عند النقطة 1 فقط لقياس h_{11} وتضرب عند النقطة 2 لقياسh_{12}، وفي حال وضع حساس التسارع عند النقطة 2 وضرب عند النقطة 1 يصبح h_{21} وفي حال الضرب عند النقطة 2 h_{22} ، تابع الاستجابة المقاس يخزن بدلالة التردد frequency domain بواسطة محلل البيانات وتكون على شكل مكونات حقيقية وتخيليلة عند كل تردد، تمثل المعادلة (5)" تابع الاستجابة التجريبي العام.

$$h_{il} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\propto_{il.k} + \beta_{il.k}s}{s^2 + 2\zeta_k\omega_{n.k}s + \omega_{n.k}^2}$$

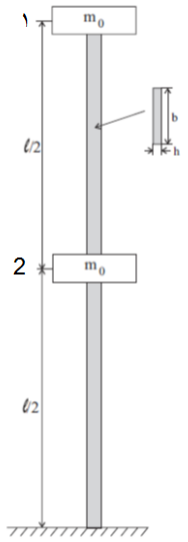
$$[H(s)] = \sum_{k=1}^{n} \frac{[R]_k}{s^2 + 2\zeta_k\omega_{n.k}s + \omega_{n.k}^2} \quad (5)"[23]$$

من شكل منحني تابع الاستجابة وباستخدام محلل البيانات يتم الحصول على قيم الترددات الطبيعية ومعامل التخميدζ والرواسب التقديرية لكل مود شكل (توضع عقد الاهتزاز) وفق المعادلة (5)".

2-2 مثال عددي:

في حال تركيبة درجتين حرية كما هو مبين بالشكل(1)" وهي عبارة عن كتلتين واحدة في الوسط والأخرى في الطرف العلوي اذا اعتبرنا كل منهما $m_0 = 0.76kg$ الكثافة النوعية للفولاذ $\rho = 7,860\,kg/m^3$وأبعاد الجائز $l = 450mm\ , b = 25.4mm\ , h = 5mm$ كتلة الجائز$m_b = bhl\rho = 0.45kg$ حساس التسارع يُستخدم لقياس الاهتزازات والمطرقة الاهتزازية مع محول القوة الكهروضغطية تُستخدم لتحريض التركيبة، المحولات تتصل مع مضخم ووحدة تغذية لتحول الاشارة المقاسة الى مضخم الفولط، خط اشارة القوة المضخمة تُوصل الى قناة الدخل، واشارة حساس التسارع المضخم تُوصل الى قناة الخرج لمحلل فوريه معاملات التعيير لكل الحساسات تُدخل الى محلل فوريه لتعطي القيمة الحقيقية بوحدات القياس المستخدمة، تابع التحويل h_{11} يُحصل عليه من ضرب المطرقة عند النقطة الأولى حيث يكون مركب حساس التسارع

التجربة تعاد عشر مرات وايجاد المتوسط الحسابي للطيف بواسطة محلل الفوريه و h_{12} يتم الضرب بالمطرقة عند النقطة 2 وحساس التسارع عند النقطة 1 وهذه القيم تحول الى الحاسب لمعالجتها



القيم الناتجة:

Estimated	Mode 1	Mode 2
ω_d (rad/s)	53.0041	349.9659
ζ	0.0113	0.0047
ω_n (Hz)	8.433	55.677
Residues for h_{11} (m/N)	$1.8303 \times 10^{-3} - j6.9526 \times 10^{-3}$	$1.1546 \times 10^{-5} - j1.4518 \times 10^{-4}$
Residues for h_{12} (m/N)	$2.0721 \times 10^{-4} - j3.0926 \times 10^{-3}$	$4.6012 \times 10^{-5} + j3.7015 \times 10^{-4}$

الشكل(1)" يبين أبعاد الجائز ونتائج تجربة المطرقة الاهتزازية-حساس التسارع

بالملاحظة أنه عندما تتم بواسطة حساس التسارع، فإن الراسب يقاس بالنسبة لوحدة المسافة قبل المعالجة (بتقسيم الرواسب على $\omega_d^2 e^{i\pi}$ لكل مود (تردد ذاتي)) باستبدال

$$\alpha = 2(\zeta\omega_n\sigma - \omega_d v) \quad , \beta = 2\sigma$$

$$h_{11}(s) = \frac{0.7392 + 0.00366s}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2} + \frac{0.1017 + 2.3092e-05s}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}$$

$$h_{12}(s) = \frac{0.3281 + 4.1442e-04s}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2} + \frac{-0.2589 + 9.2024e-05s}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}$$

بتبديل $s = i\omega$ و من خلال الرواسب فإن شكل الاهتزاز مود الشكل عند التردد الذاتي الأول:

$$u_{11} = \sqrt{\alpha_{11.1} + \beta_{11.1}s}\Big|_{s=i\omega_{d1}} = \sqrt{0.7392 + i0.00366 * 53.0041}$$
$$= 0.8670 + i0.1119$$

$$u_{21} = \frac{\alpha_{12.1} + \beta_{12.1}s}{u_{11}}\Big|_{s=i\omega_{d1}} = \frac{0.3281 + i4.1442e-04 * 53.0041}{0.8670 + i0.1119}$$
$$= 0.3754 - i0.0231$$

و شكل الاهتزاز عند التردد الذاتي الثاني :

$$u_{12} = \sqrt{\alpha_{11.2} + \beta_{11.2} s}\Big|_{s=i\omega_{d2}}$$
$$= \sqrt{-0.2589 + i2.3092e-05 * 349.9659}$$
$$= 0.3191 + i0.0127$$

$$u_{22} = \frac{\alpha_{12.2} + \beta_{12.2} s}{u_{12}}\Big|_{s=i\omega_{d2}}$$
$$= \frac{-0.2589 + i9.2024e-05 * 349.9659}{0.3191 + i0.0127}$$
$$= -0.8062 + i0.1329$$

المصفوفة *modal* العقدية الناتجة من أجل وحدة *modal* الكتلة:

$$[U] = \begin{bmatrix} \{0.8670 + i0.1119\} & \{0.3191 + i0.0127\} \\ \{0.3754 - i0.0231\}_1 & \{-0.8062 + i0.1329\} \end{bmatrix}$$

الكتلة بطريقة *modal* $m_{q.1} = m_{q.2} = 1$

وبالتالي المرونة بطريقة *modal*

$$k_{q.1} = \omega_{n.1}^2 = 53.0041^2 = 2.809\, N/m$$

$$k_{q.2} = \omega_{n.2}^2 = 349.9659^2 = 122.480\, N/m$$

ثوابت المخمد بطريقة *modal*

$$c_{q.1} = 2\zeta_1 \omega_{n.1} = 2 \times 0.0113 \times 53.0041 = 1.1928\, N/ms^{-1}$$

$$c_{q.2} = 2\zeta_2 \omega_{n.2} = 2 \times 0.0047 \times 349.9659 = 3.2741\, N/ms^{-1}$$

تابع التحويل للترددين الطبيعيين:

$$\Phi_{q.1} = \frac{1}{m_{q.1}s^2 + c_{q.1}s + k_{q.1}} = \frac{1}{s^2 + 1.1928s + 2809}$$

$$\Phi_{q.2} = \frac{1}{m_{q.2}s^2 + c_{q.2}s + k_{q.2}} = \frac{1}{s^2 + 3.2741s + 122480}$$

وبالتالي مصفوفة تابع التحويل:

$$\begin{Bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11}^2\Phi_{q.1} + u_{12}^2\Phi_{q.2} & u_{11}u_{21}\Phi_{q.1} + u_{12}u_{22}\Phi_{q.2} \\ u_{11}u_{21}\Phi_{q.1} + u_{12}u_{22}\Phi_{q.2} & u_{21}^2\Phi_{q.1} + u_{22}^2\Phi_{q.2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \end{Bmatrix}$$

مصفوفات الكتلة والمرونة والمخمد بطريقة *local* :

من تابع التحويل العكسي باستخدام مصفوفة *modal*

$$[M_x] = [U]^{-T}[I]U^{-1} = \begin{bmatrix} 1.1797 & -0.1018 \\ -0.1018 & 1.2732 \end{bmatrix}(kg)$$

كتلة الجائز m_b تتوزع من نقطة 1الى 2 :

$$m_1 = m_0 + m_b/4 = 0.76 + 0.45/4 = 0.873\ kg$$

$$m_2 = m_0 + m_b/2 = 0.76 + 0.45/2 = 0.985\ kg$$

فالكتلة بالطريقة التحليلية تعطي قيم دقيقة 0.985و0.873 أما من مصفوفة الكتلة يلاحظ أن النتيجة1.1797و1.2732 تختلف بشكل بسيط ولكن النسبة نفسها، الاختلاف يعود الى أخطاء المقياس، الضجيج، دقة التردد، حساس التسارع، حساس القوة والقيم الغير صفرية في المصفوفة ذات القيم الصغيرة بسبب مشاركة تأثيرات الديناميكية لبعض القارنات.

$$[C_x] = [U][C_q]U^{-1} = \begin{bmatrix} 1.8447 & -1.1320 \\ -1.1320 & 3.8524 \end{bmatrix} N/ms^{-1}$$

$$[K_x] = [U][K_q]U^{-1} = \begin{bmatrix} 0.2847e+05 & -0.5839e+05 \\ -0.5839e+05 & 1.3776e+05 \end{bmatrix} N/m$$

قيم المرونة مقبولة وهي تعبر عن نقص التثبيت للجائز عن الأرض.

Abstract:

Chatter is a form of self-excited, unstable vibration during metal cut. To increase the quality of product surface finish, it is necessary to minimize the probability of occurrence of chatter phenomenon. The prediction of chatter vibrations between the cutter and workpiece is important as a guidance to the machine tool users for an optimal selection of depth of cut and spindle speed, resulting in maximum chip removal rate without this undesirable tool vibration. This can be done by generating the stability lobe diagrams, which can be used to select the right machining parameters to insure the cut is stable and avoid tool chatter.

The stability lobe diagrams are created using the analytical method to determine whether the cut is stable or unstable.

A microphone is used as chatter detection sensor, and the applications of Taguchi and response surface methodologies (RSM) are used to minimize the surface roughness in the end milling process. Taguchi's method for optimum selection of the milling process parameters is applied based on the signal to noise ratio and ANOVA analysis of the surface finish. A second-order model contains quadratic terms that have been created between the cutting parameters and surface roughness using response surface methodology (RSM). Surface roughness of the machined surfaces are measured and used to identify the optimum levels of the milling parameters. Based on Taguchi, ANOVA, and RSM analyses, the end milling process can be optimized to improve surface finish quality and machining productivity.

Key Words: RSM, Taguche Method, ANOVA, chatter, stability lobes diagram, milling, FRF frequency response function, microphone.

Damascus University
Faculty of Engineering
Department of Mechanical
Design Engineering

Determine the optimum values for parameters of milling Process by chatter avoidance

Thesis is submitted
For the Master Degree in Mechanical Engineering

Prepared by
E. Ramy Shiekha

Under the Supervision of

Dr.Eng. Mehieddin Al Rifai

2017