

تقنيات تحليل الصوت: نحو تشخيص غير جراحي لاضطرابات الغدة الدرقية

د. رنيم كناع *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٢/١٩ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/٥/١٣)

□ ملخص □

يتناول هذا البحث إمكانية تطوير نهج غير جراحي لتشخيص اضطرابات الغدة الدرقية من خلال تحليل الصوت باستخدام تقنيات معالجة الإشارات واستخراج الميزات الطيفية، مما قد يساهم في تحسين الكشف المبكر وتقليل الحاجة إلى الفحوصات الطبية التقليدية. تم استخدام قاعدة بيانات Saarbruecken Voice Database ، والتي تضم تسجيلات صوتية لـ 1002 متحدث يعانون من اضطرابات صوتية و 851 متحدثاً سليماً، تم اختيار مجموعة فرعية تحتوي على 173 تسجيلاً لمرضى و ٥٣ تسجيلاً لأشخاص أصحاء. تم استخراج خمس ميزات طيفية رئيسية باستخدام لغة بايثون وبالتحديد مكتبات Librosa و PySoundFile و NumPy، وهي المركز الطيفي و التدفق الطيفي والانتشار الطيفي والانخفاض الطيفي والتجانف الطيفي.

تم حساب مركز النقل الطيفي (Spectral Gravity Center) لكل مجموعة، وتم استخدام المسافة الإقليدية لتحديد مدى قرب العينات الجديدة من المجموعتين (السليمة والمصابة)، مما مكّننا من بناء نموذج تصنيف بسيط لكنه فعال. حقق النموذج دقة تصنيف بلغت ٩٠%، حيث أظهر أداءً قوياً في تمييز الأصوات السليمة عن المصابة. أظهرت الميزات الطيفية اختلافات واضحة بين الفئتين، مما يعزز إمكانية استخدامها كأداة تشخيصية غير جراحية. ومع ذلك، أظهرت النتائج بعض الأخطاء في تصنيف العينات المصابة، مما يشير إلى إمكانية تحسين النموذج عبر تقنيات تعلم الآلة المتقدمة.

تثبتت الدراسة أن تحليل الصوت يمكن أن يكون نهجاً فعالاً للتشخيص غير الجراحي لاضطرابات الغدة الدرقية . يُوصى بتحسين النموذج باستخدام تقنيات تصنيف أكثر تطوراً مثل الشبكات العصبية أو SVM ، وزيادة حجم العينة للحصول على نتائج أكثر دقة. كما يمكن تطوير تطبيق ذكي لتحليل الصوت آلياً ومساعدة الأطباء في التشخيص المبكر.

الكلمات المفتاحية: تحليل الصوت، الميزات الطيفية، اضطرابات الغدة الدرقية، التشخيص غير الجراحي، المسافة الإقليدية.

*مدرس ، قسم هندسة النظم الحاسوبية والالكترونية ، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس، طرطوس، سوريا

raneem.knaj@gmail.com

Voice Analysis Technologies: Towards Non-Invasive Diagnosis of Thyroid Disorders

Dr. Eng. Raneem Knaj *

(Received 19/2/2025 . Accepted 13/5/2025)

□ ABSTRACT □

This study aims to develop a non-invasive approach for diagnosing thyroid disorders through voice analysis using signal processing techniques and spectral feature extraction. This method could contribute to early detection and reduce the need for traditional medical examinations. The Saarbruecken Voice Database was used, which contains voice recordings of 1,002 speakers with voice disorders and 851 healthy speakers. A subset of 173 recordings from patients and 53 recordings from healthy individuals was selected for analysis.

Five key spectral features were extracted using Python, specifically the Librosa, PySoundFile, and NumPy libraries: Spectral Centroid, Spectral Flux, Spectral Spread, Spectral Rolloff, Spectral Kurtosis. The Spectral Gravity Center (SGC) was calculated for each group, and the Euclidean distance was used to determine the proximity of new samples to the two groups (healthy and affected). This approach enabled the construction of a simple yet effective classification model. The model achieved a classification accuracy of 90%, demonstrating strong performance in distinguishing between healthy and affected voices. The spectral features showed clear differences between the two categories, reinforcing their potential as a non-invasive diagnostic tool. However, some misclassifications were observed, suggesting the possibility of improving the model using advanced machine learning techniques.

This study confirms that voice analysis can be an effective method for non-invasive thyroid disorder diagnosis. It is recommended to enhance the model using more advanced classification techniques such as neural networks or Support Vector Machines (SVM) and to increase the dataset size for more accurate results. Additionally, developing an intelligent application for automated voice analysis could assist doctors in early diagnosis.

Keywords: Voice Analysis, Spectral Features, Thyroid Disorders, Non-Invasive Diagnosis, Euclidean Distance.

*Teacher of computer and electronic systems engineering, Faculty of Information and Communication Engineering, Tartus University, Tartus, Syria. raneem.knaj@gmail.com.

١. مقدمة:

١- المعلومات المستخلصة من الإشارة الصوتية [1,2]:

الإشارة الصوتية للكلام تحمل العديد من المعلومات التي يمكن استخلاصها باستخدام تقنيات التحليل الصوتي. تشمل هذه المعلومات المعلومات الفسيولوجية والعاطفية والطبية والصحية والتقنية والتطبيقات. وبالتالي تحليل الإشارة الصوتية ليس مجرد استخراج نص من الكلام، بل هو عملية غنية بالمعلومات تمتد إلى فهم المشاعر، الهوية، والحالة الصحية للمتحدث.

٢- تقنيات تحليل الكلام في المجال الطبي [3,4]:

تحليل الكلام في المجال الطبي يساعد في التشخيص المبكر، تحسين العلاج، وتطوير تقنيات مساعدة للأشخاص ذوي الإعاقات النطقية. بفضل الذكاء الاصطناعي والتعلم العميق، أصبح بالإمكان اكتشاف الأمراض العصبية والنفسية من خلال أنماط الكلام، مما يفتح آفاقاً جديدة في الرعاية الصحية. فتقنيات تحليل الكلام في المجال الطبي تعتمد على معالجة الإشارة الصوتية والذكاء الاصطناعي لاستخلاص معلومات تساعد في التشخيص والعلاج.

3- اضطرابات الغدة الدرقية [5] :

اضطرابات الغدة الدرقية تشير إلى مجموعة من الحالات التي تؤثر على وظيفة الغدة الدرقية، وهي غدة صغيرة على شكل فراشة تقع في الجزء الأمامي من الرقبة. تلعب الغدة الدرقية دوراً مهماً في تنظيم عمليات الأيض في الجسم من خلال إفراز الهرمونات الدرقية (T3 و T4). تشمل اضطرابات الغدة الدرقية القصور والفرط.

٤- حدود الدراسة:

يركز هذا البحث على كشف الاضطراب الصوتي باستخدام الميزات الطيفية، دون أن يهدف إلى تحديد السبب المرضي بدقة. صحيح أن بعض الاضطرابات قد تكون ناتجة عن أسباب غير درقية، لكن الهدف الأساسي هو رصد **نمط صوتي** شاذ يمكن أن يكون مؤشراً مبكراً يستدعي فحصاً طبياً. منهجية "مركز الثقل الطيفي" تتيح تصنيفاً أولياً فعالاً، يمكن لاحقاً تطويره ضمن نظام أوسع يدمج معلومات سريرية لتحديد السبب الدقيق.

٢. أهمية البحث

تكمن أهمية هذا البحث في عدة جوانب رئيسية:

- التشخيص غير الجراحي والمبكر: يوفر تحليل الصوت طريقة غير جراحية (Non-invasive) لاكتشاف اضطرابات الغدة الدرقية، مما يقلل الحاجة إلى الفحوصات التقليدية مثل تحليل الدم أو الخزعات.
- سهولة التطبيق وقابلية التوسع: يمكن استخدام تقنيات تحليل الصوت عبر الهواتف الذكية أو الأجهزة الطبية المحمولة، مما يجعلها وسيلة مريحة وسهلة التطبيق حتى في البيئات محدودة الموارد.
- الكشف المبكر وتحسين جودة الحياة: يتيح التشخيص المبكر التدخل العلاجي السريع، مما يساعد في تقليل المضاعفات طويلة المدى المرتبطة باضطرابات الغدة الدرقية، مثل القصور أو فرط النشاط.

- تقليل التكاليف الطبية: مقارنة بالاختبارات التقليدية، يمكن أن يوفر تحليل الصوت بديلاً أقل تكلفة للفحص الأولي، مما يخفف العبء على الأنظمة الصحية.

٣. أهداف البحث:

يمكن تحديد أهداف هذا البحث على النحو التالي:

- تحليل تأثير اضطرابات الغدة الدرقية على الصوت: دراسة كيفية تأثير التغيرات الفسيولوجية المرتبطة باضطرابات الغدة الدرقية (مثل القصور أو فرط النشاط) على خصائص الصوت، مثل التردد، الشدة، والتشوهات الصوتية.
- تطوير منهجية لتحليل الصوت طبيياً: اقتراح أو تحسين تقنيات تحليل الإشارات الصوتية للكشف عن أنماط صوتية مميزة لدى المرضى المصابين باضطرابات الغدة الدرقية.
- استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي: توظيف خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحديد العلاقة بين خصائص الصوت والتشخيص الطبي، وتحسين دقة النماذج التنبؤية.
- تقييم دقة التشخيص غير الجراحي: مقارنة أداء تقنيات تحليل الصوت بوسائل التشخيص التقليدية مثل اختبارات الدم والتصوير الطبي، لتحديد مدى فعاليتها وإمكانية اعتمادها كأداة مساعدة في التشخيص.
- إمكانية تطبيق التقنية في الأنظمة الصحية: دراسة كيفية دمج تقنيات تحليل الصوت في التطبيقات الطبية، مثل الهواتف الذكية أو الأجهزة الطبية المحمولة، لتسهيل التشخيص المبكر في البيئات السريرية أو الاستخدام الشخصي.

٤. قاعدة البيانات الصوتية المعتمدة في البحث

تمّ الاعتماد في هذا البحث على قاعدة البيانات الصوتية "Saarbruecken Voice Database (SVD)" ، وهي واحدة من أكثر قواعد البيانات استخداماً في تحليل اضطرابات الصوت [6]. تحتوي هذه القاعدة على تسجيلات صوتية لأفراد يعانون من اضطرابات صوتية مختلفة، بما في ذلك اضطرابات مرتبطة بالغدة الدرقية، إضافة إلى تسجيلات لأشخاص أصحاء، مما يسمح بإجراء مقارنات بين الفئات المختلفة. تتضمن قاعدة البيانات تسجيلات لنطق الجملة الألمانية "Guten Morgen, wie geht es Ihnen?" في ظروف تسجيل موحدة، مما يضمن اتساق العينات الصوتية. تتميز البيانات بأنها مسجلة بمعدل أخذ عينات يبلغ ١٦ كيلو هرتز وبدقة ١٦ بت، مما يوفر جودة عالية للتحليل الطيفي والسمات الصوتية الأخرى. تم تحميل البيانات الصوتية من الموقع الرسمي للقاعدة Saarbruecken Voice Database وهي تضم تسجيلات لـ 1002 متحدث يعانون من مجموعة متنوعة من الاضطرابات الصوتية (٤٥٤ ذكور و ٥٤٨ إناث)، بالإضافة إلى 851 تسجيلاً لأشخاص أصحاء 423 ذكور و ٤٢٨ إناث. تم استخدام مجموعة فرعية من هذه القاعدة تضم 173 تسجيلاً لمرضى يعانون من اضطرابات صوتية و 53 تسجيلاً لأشخاص أصحاء، حيث كانت مدة التسجيلات المرضية حوالي ثانية واحدة، بينما كانت مدة تسجيلات الأشخاص الأصحاء حوالي ثلاث ثوانٍ.

٥. السمات الصوتية المستخدمة في تشخيص اضطرابات الغدة الدرقية

عند اختيار سمات صوتية معينة لدراساتها في تشخيص اضطرابات الغدة الدرقية، يجب أن تستند مبررات الاختيار إلى الأدبيات السابقة فالعديد من الدراسات السابقة أثبتت وجود اختلافات ملحوظة في السمات الصوتية بين الأشخاص الأصحاء والمصابين باضطرابات الغدة الدرقية والعديد من الأبحاث [7,8] تشير إلى أن Jitter, Shimmer, F0, HNR, و MFCCs تظهر تغييرات ملحوظة عند المرضى مقارنة بالأصحاء، كما يجب أن يستند التبرير إلى الفروقات الفسيولوجية الناتجة عن الاضطراب، وتأثيراته على الحبال الصوتية وآلية إنتاج الصوت. حيث يحدث اضطراب الغدة الدرقية تغيرات في التوتر العضلي للحبال الصوتية، مما يؤدي إلى عدم استقرار الصوت وزيادة التذبذب وعدم الانتظام في الذبذبات الصوتية، وهو ما ينعكس بشكل مباشر على سمات مثل Jitter و Shimmer بالإضافة إلى ذلك، فإن التغيرات الهرمونية قد تؤثر على جودة الصوت [9,10]، مما يؤدي إلى انخفاض نسبة الضجيج إلى الهارمونيك (HNR) وزيادة التباين في التردد الأساسي (F0). واستناداً إلى التبريرات السابقة تمّ استخلاص السمات الصوتية التالية للعينات الصوتية:

- المركز الطيفي (Spectral Centroid) المركز الطيفي هو مقياس لموضع "مركز الكتلة" للطيف الصوتي. يعكس مكان تركيز الطاقة الطيفية في الصوت. إذا كان المركز الطيفي قريباً من الترددات العالية، فإن الصوت يبدو حاداً. وإذا كان المركز قريباً من الترددات المنخفضة، فإن الصوت يبدو أقل حدة. الأشخاص المصابون باضطرابات الغدة الدرقية قد يظهرون تغيراً في المركز الطيفي بسبب تأثير الهرمونات على الحبال الصوتية. يمكن أن يكون المركز الطيفي أكثر تحركاً نحو الترددات المنخفضة إذا كانت هناك تغيرات في مرونة الحبال الصوتية، وتُعطى معادلة المركز الطيفي على النحو التالي [11]:

$$\text{Spectral Centroid} = \frac{\sum f \cdot X(f)}{\sum X(f)} \quad (1)$$

حيث f هو التردد لكل نقطة في الطيف، $X(f)$ هي سعة الإشارة، \sum تعني "مجموع على جميع الترددات".

- التدفق الطيفي (Spectral Flux) التدفق الطيفي يقيس التغير في الطيف الصوتي بين الإطارات الزمنية المتتالية. يشير إلى سرعة التغير في الترددات المختلفة في الصوت. إذا كانت الإشارة الصوتية تتغير بسرعة، سيكون التدفق الطيفي مرتفعاً. قد يظهر التدفق الطيفي مرتفعاً في الأشخاص المصابين باضطرابات الغدة الدرقية بسبب التذبذب غير المنتظم في الصوت، وتُعطى معادلة التدفق الطيفي على النحو التالي [12]:

$$\text{Spectral Flux} = \sum_{f=0}^{N-1} (|X_t(f)| - |X_{t-1}(f)|)^2 \quad (2)$$

حيث $X_t(f)$ و $X_{t-1}(f)$ هما أطيايف الإطارين الحالي والسابق.

- الانتشار الطيفي (Spectral Spread) الانتشار الطيفي يقيس "تشتت" الطاقة الصوتية عبر الترددات. إذا كان الصوت يحتوي على مكونات ترددية متعددة، فإن الانتشار الطيفي سيكون أكبر. يمكن أن يحدث انخفاض في الانتشار الطيفي في بعض الحالات بسبب التشوهات الصوتية الناتجة عن ضعف في التحكم في التوتر العضلي للأحبال الصوتية، وتُعطى معادلة الانتشار الطيفي على النحو التالي [13]:

$$SS = \sqrt{\frac{\sum_{f=0}^{N-1} (f - SC)^2 \cdot |X(f)|}{\sum_{f=0}^{N-1} |X(f)|}} \quad (3)$$

$|X(f)|$ القيمة المطلقة لسعة الإشارة عند التردد f

N عدد النقاط في الطيف، $(f-SC)^2$ الفرق المربع بين التردد الحالي والمركز الطيفي

- الانخفاض الطيفي (Spectral Rolloff) الانخفاض الطيفي هو التردد الذي تقع عنده نسبة معينة من الطاقة الطيفية، يعكس ذلك التغير في الطيف الصوتي عند الترددات العليا. قد يشير انخفاض الانخفاض الطيفي إلى زيادة في الطاقة عند الترددات المنخفضة، مما قد يكون نتيجة لعدم استقرار الصوت أو اضطرابات في نغمة الصوت، وتُعطى معادلة الانخفاض الطيفي على النحو التالي [14]:

$$Rolloff(f) = \min \left(f: \sum_{i=0}^f |X(i)| \geq p \cdot \sum_{i=0}^{N-1} |X(i)| \right) \quad (4)$$

- التجانف الطيفي (Spectral Kurtosis) التجانف الطيفي هو مقياس يعكس "حدة" التوزيع الطيفي، يساعد في تحديد ما إذا كان الطيف يتجمع حول الترددات العالية أو المنخفضة أو يتشتت، يمكن أن يكون التجانف الطيفي مرتفعاً في الحالات التي يكون فيها الصوت غير منتظم أو غير طبيعي، وتُعطى معادلة التجانف الطيفي على النحو التالي [15]:

$$SK = \frac{\sum_{f=0}^{N-1} (f - SC)^4 \cdot |X(f)|}{\left(\sum_{f=0}^{N-1} |X(f)| \right) \cdot SS^4} \quad (5)$$

حيث: f التردد و SC المركز الطيفي و SS الانتشار الطيفي $(f - SC)^4$ رفع الفرق بين التردد والمركز الطيفي للقوة الرابعة.

٦. استنتاج المعيار وتصميم مركز الثقل:

- مركز الثقل يُمثل النقطة المركزية التي تعبر عن التوزيع المتوسط للقيم في مساحة متعددة الأبعاد. في هذه الدراسة، تمثل مراكز الثقل القيم الطيفية المتوسطة للأصوات السليمة والمصابة، وتُستخدم كمحور لتحديد معيار التمييز. يُحسب مركز الثقل لكل مجموعة (سليمة أو مصابة) باستخدام المعادلة التالية [16]:

$$C_G = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

- حيث: C_G مركز الثقل و F_i قيمة الميزة و w_i الوزن النسبي المرتبط بالميزة i و n عدد الميزات الطيفية.
- تطبيق المعادلة في الدراسة: لكل من الأصوات السليمة والمصابة، تم حساب مركز ثقل الميزات الطيفية الخمس المميزة.

المراكز الناتجة تُعتبر نقاط مرجعية تُستخدم في عملية التصنيف.

- أهمية النتائج: مراكز الثقل كمعيار للتصنيف حيث يتم تحديد حالة أي عينة جديدة بناءً على قربها من مركز ثقل الحالات السليمة أو المصابة، ويُحسب القرب باستخدام المسافة الإقليدية (Euclidean Distance) كما في المعادلة التالية [17]:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i^{sample} - C_G^{group})^2} \quad (7)$$

حيث d المسافة الإقليدية و F_i^{sample} القيمة الطيفية للميزة i في العينة و c_G^{group} مركز ثقل المجموعة و n عدد المميزات.

- النتيجة: تم تحديد مركز الثقل للأصوات السليمة ومركز الثقل للأصوات المصابة بشكل منفصل. هذه المراكز تُعد معياراً يُمكن استخدامه لتمييز الحالات بناءً على قرب العينات الجديدة من أي من المركزين.
- أهمية المرحلة في الدراسة: مركز الثقل يُستخدم لاحقاً كمرجع في عملية التصنيف، حيث يتم قياس المسافة بين العينة الجديدة ومراكز الثقل لتحديد حالتها (سليمة أو مصابة).

٧. تقييم الأداء باستخدام مصفوفة الارتباك

- مصفوفة الارتباك (Confusion Matrix): تُعد مصفوفة الارتباك أداة أساسية لتحليل أداء أي خوارزمية تصنيف وتعطي المصفوفة نظرة تفصيلية حول عدد العينات المصنفة بشكل صحيح وغير صحيح عبر فئات البيانات.
- تعريف مصفوفة الارتباك: مصفوفة الارتباك هي مصفوفة ثنائية 2×2 تحتوي على العناصر التالية في حالة التصنيف الثنائي (سليم ومصاب):

- ✓ True Positive (TP): عدد الحالات المصابة المصنفة بشكل صحيح كمصابة.
- ✓ True Negative (TN): عدد الحالات السليمة المصنفة بشكل صحيح كسليمة.
- ✓ False Positive (FP): عدد الحالات السليمة المصنفة بشكل خاطئ كمصابة.
- ✓ False Negative (FN): عدد الحالات المصابة المصنفة بشكل خاطئ كسليمة.

- المقاييس المستخلصة من مصفوفة الارتباك

- ✓ الدقة (Accuracy): تقيس نسبة التصنيفات الصحيحة إلى العدد الكلي للعناصر، وتُعطى

معادلة الدقة على النحو التالي [18]:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (8)$$

- ✓ الدقة الإيجابية (Precision): تقيس نسبة العناصر المصنفة بشكل صحيح كمصابة إلى جميع

العناصر التي تم تصنيفها كمصابة، وتُعطى معادلة الدقة الإيجابية على النحو التالي [19]:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (9)$$

- ✓ مقياس F1 (F1-Score): يُعتبر مقياساً مشتركاً يجمع بين الدقة الإيجابية والرجوع، وتُعطى

المعادلة المعبرة عنه على النحو التالي [20]:

$$F1, Score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (10)$$

٨. النتائج والمناقشة

٨-١ استخراج السمات:

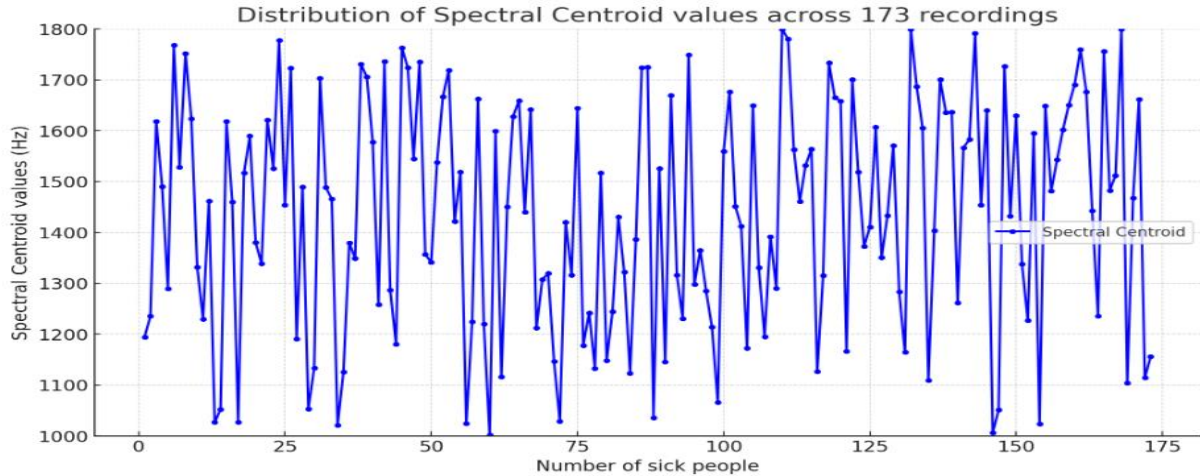
لتحليل العينات الصوتية بشكل عملي واستخراج سمات المركز الطيفي (Spectral Centroid) والتدفق الطيفي (Spectral Flux) الانتشار الطيفي (Spectral Spread) والانخفاض الطيفي (Spectral Rolloff) والتجانف الطيفي (Spectral Kurtosis) ، استخدمنا بعض المكتبات البرمجية في Python حيث استخدمنا Librosa وهي مكتبة شهيرة لتحليل الصوتيات واستخراج السمات الصوتية، و PySoundFile للتعامل مع قراءة وتخزين الملفات الصوتية، و NumPy لحسابات رياضية ومتجهات.

٨-١-١ القيم الناتجة لسمة المركز الطيفي:

المركز الطيفي (Spectral Centroid) هو مقياس يحدد المكان الذي يتم فيه تركيز أكبر قدر من الطاقة في الطيف الصوتي. بعبارة أخرى، هو التردد الذي يساهم بشكل أكبر في إنتاج الصوت، ويعكس نوعية الصوت بشكل جيد، خاصة فيما يتعلق بالوضوح والحدة. والقيم الناتجة للمركز الطيفي بناءً على حالة الصوت:

✓ المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية:

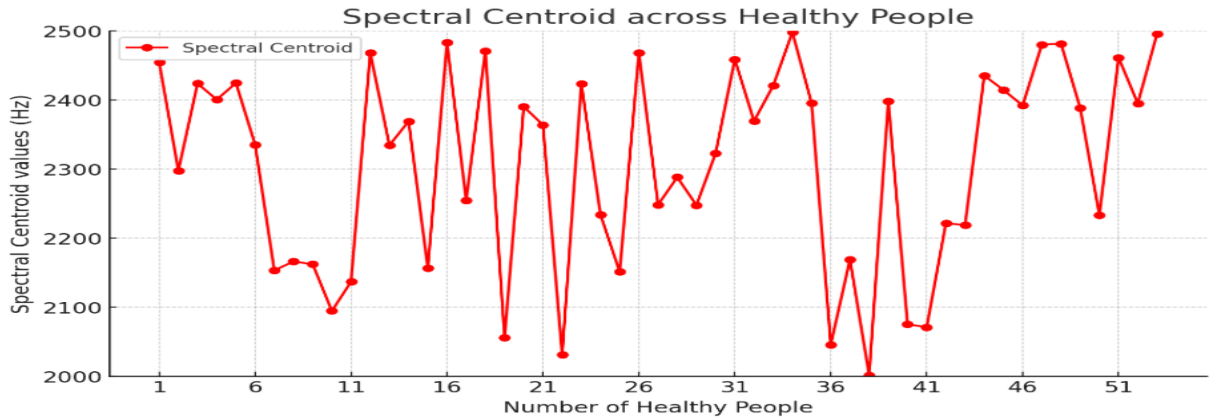
في الأشخاص الذين يعانون من اضطرابات صوتية أو مشاكل في الغدة الدرقية، قد يحدث تغير في طبقة الصوت التي يتميز بها الشخص. هذه الاضطرابات قد تتسبب في تشتت الطاقة الصوتية نحو الترددات المنخفضة، مما يؤدي إلى انخفاض المركز الطيفي. فالقيم الناتجة للمركز الطيفي: ١٠٠٠ هرتز - ١٨٠٠ هرتز، حيث يكون الصوت أكثر غموضاً وأكثر انخفاضاً في الترددات العالية، كما يظهر الشكل (١) التالي:



الشكل (١) القيم الناتجة لسمة المركز الطيفي للمرضى

✓ الأشخاص الأصحاء:

في الأشخاص الأصحاء، يتوزع الصوت عادةً بشكل متوازن بين الترددات المنخفضة والعالية، حيث يعكس الصوت الطبيعي توزيع الطاقة في الطيف بشكل أكثر وضوحاً في الترددات العالية. فالقيم الناتجة للمركز الطيفي: ٢٠٠٠ هرتز - ٢٥٠٠ هرتز، حيث تكون الطاقة الصوتية مركزة في الترددات الأعلى التي تعكس الصوت الحاد والواضح، كما يظهر الشكل (2):



الشكل (2) القيم الناتجة لسمة المركز الطيفي للأصحاء

الشرح:

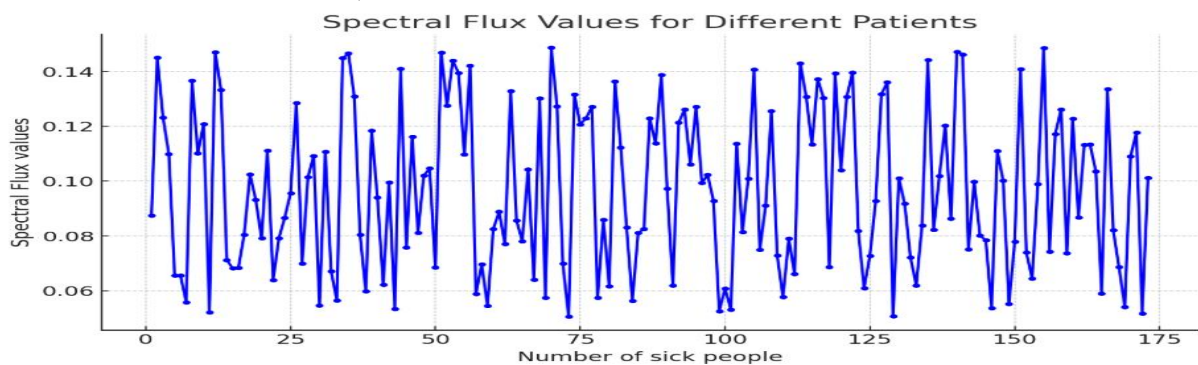
- ✓ المرضى: القيم الأقل من ١٨٠٠ هرتز تعني أن الصوت أكثر غموضاً، مع تركيز الطاقة في الترددات المنخفضة. هذا يشير إلى ضعف في وضوح الصوت، وهو أمر شائع في اضطرابات الصوت الناتجة عن مشاكل في الغدة الدرقية.
- ✓ الأشخاص الأصحاء: القيم أعلى من ٢٠٠٠ هرتز تدل على وضوح الصوت وتوزيع الطاقة الصوتية بشكل أكبر على الترددات الأعلى، ما يشير إلى صوت أكثر حدة ووضوحاً.

٨-١-٢ القيم الناتجة لسمة التدفق الطيفي:

التدفق الطيفي (Spectral Flux) هو مقياس يشير إلى التغير في الطيف الصوتي عبر الزمن. يتم حسابه من خلال قياس الفرق بين طيف الإشارة في اللحظات الزمنية المختلفة، مما يعكس مدى التغيرات السريعة في الصوت. يمكن أن يعكس هذا المقياس حدة أو تقلبات الصوت ويكون مفيداً في تحليل الاضطرابات الصوتية. والقيم الناتجة للتدفق الطيفي بناءً على حالة الصوت:

- ✓ المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية:

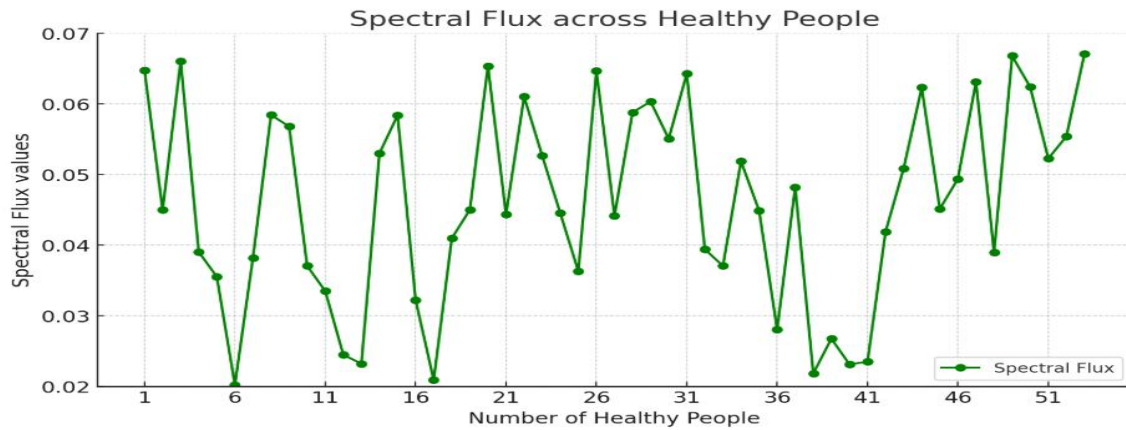
في الأشخاص الذين يعانون من اضطرابات في الصوت أو الغدة الدرقية، يكون الصوت عادة أقل استقراراً وأكثر تقلباً، مما قد يؤدي إلى زيادة التدفق الطيفي. هذا بسبب تذبذب الصوت أو وجود تغيرات مفاجئة في الطاقة الصوتية عبر الزمن نتيجة لوجود مشاكل في الحبال الصوتية أو ضعف التحكم الصوتي. فالقيم الناتجة للتدفق الطيفي تكون أعلى من الأشخاص الأصحاء، تتراوح عادةً بين ٠,٠٥ - ١٥,٠ (حسب السعة الزمنية والتقلبات الصوتية في التسجيل)، كما يظهر الشكل (3):



الشكل (٣) القيم الناتجة لسمة التدفق الطيفي للمرضى

✓ الأشخاص الأصحاء:

في الأشخاص الأصحاء، يكون الصوت عادة أكثر استقراراً وأقل تقلباً، مما يؤدي إلى تدفق طيفي أقل. مع ثبات الصوت، تكون التغيرات في الطيف أكثر سلاسة وتدرجية، لذا يكون التدفق الطيفي أقل. فالقيم الناتجة للتدفق الطيفي تتراوح عادةً بين ٠,٠٢ - ٠,٠٧، حيث يكون التغيير في الطيف أكثر انتظاماً وثباتاً، كما يظهر الشكل (4) التالي:



الشكل (4) القيم الناتجة لسمة التدفق الطيفي للأصحاء

الشرح:

✓ المرضى: بسبب اضطراب الصوت والتغيرات المفاجئة التي قد تحدث نتيجة مشاكل في الحبال الصوتية أو وظائف الغدة الدرقية، التدفق الطيفي سيكون أعلى، ما يعني تغييرات أكبر في طيف الصوت عبر الزمن.

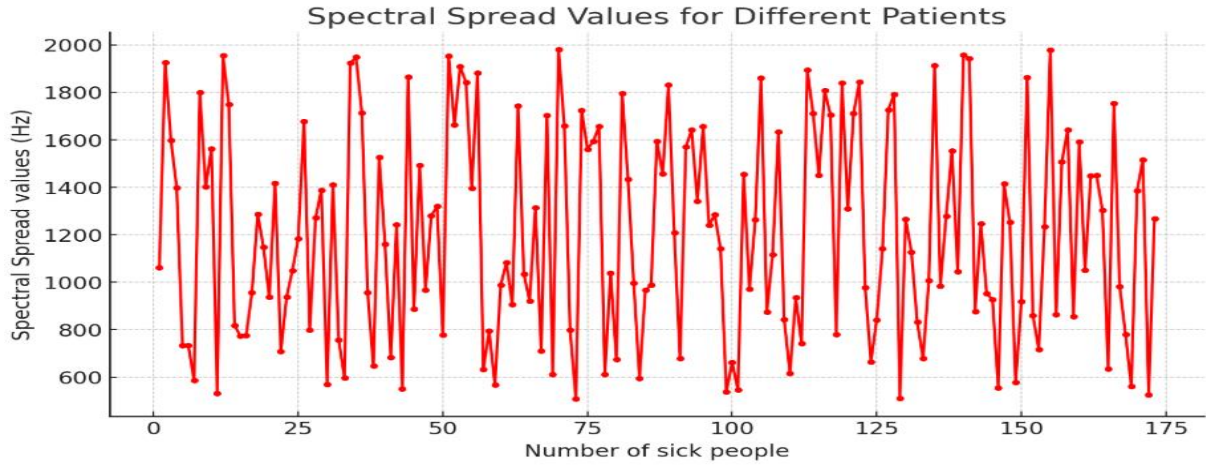
✓ الأشخاص الأصحاء: سيكون التدفق الطيفي أقل نظراً للثبات النسبي للصوت وتقليل التقلبات غير الطبيعية.

٨-١-٣ القيم الناتجة لسمة الانتشار الطيفي:

الانتشار الطيفي (Spectral Spread) هو مقياس يحدد مدى انتشار الطاقة الصوتية عبر الترددات. يعكس هذا المقياس درجة التشتت للطاقة الصوتية حول المركز الطيفي (Spectral Centroid). كلما كانت قيمة الانتشار الطيفي أكبر، كان الصوت أكثر تشويشاً أو أكثر انتشاراً عبر الترددات. والعكس صحيح، كلما كانت القيمة أصغر، كان الصوت أكثر تركيزاً في منطقة معينة من الطيف. والقيم الناتجة للانتشار الطيفي بناءً على حالة الصوت:

✓ المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية:

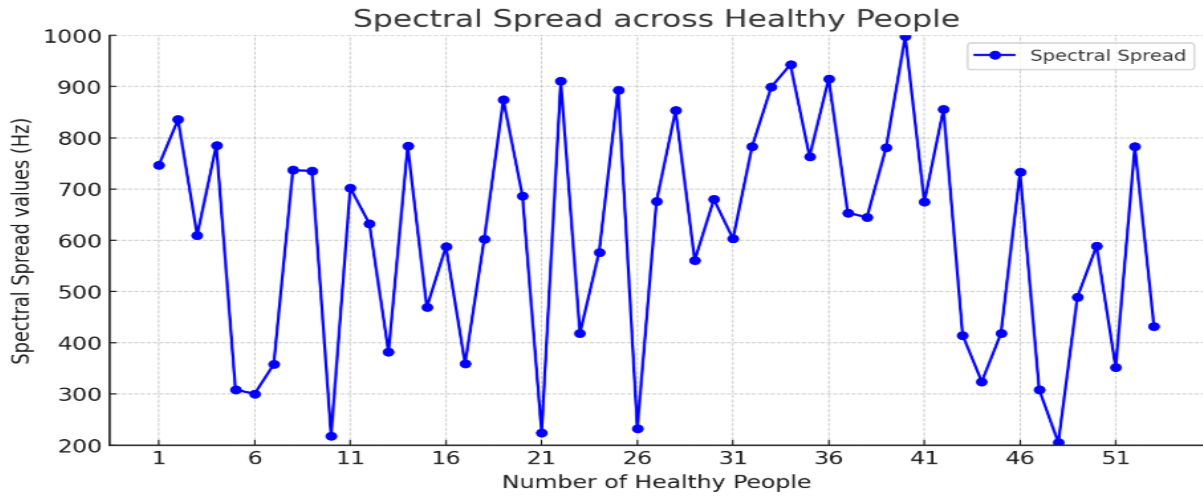
في المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية، مثل تلك المرتبطة بمشاكل في الغدة الدرقية أو الحبال الصوتية، قد يكون الصوت أقل وضوحاً وقد تظهر الطاقة الصوتية بشكل أكبر في الترددات المنخفضة والمتوسطة، مما يؤدي إلى انتشار طيفي أكبر. هذا يعني أن الطاقة الصوتية تكون موزعة بشكل أكثر تشتتاً عبر نطاق الترددات. فالقيم الناتجة للانتشار الطيفي يمكن أن تتراوح بين ٥٠٠ - ٢٠٠٠ هرتز، مع ميل إلى قيم أعلى بسبب التشتت الواسع للطاقة الصوتية عبر الترددات، كما يظهر الشكل (5) التالي:



الشكل (5) القيم الناتجة لسمة الانتشار الطيفي للمرضى

✓ الأشخاص الأصحاء:

في الأشخاص الأصحاء، يكون الصوت عادة أكثر وضوحاً وأكثر تركيزاً في الترددات المتوسطة والعالية، وبالتالي سيكون هناك انتشار طيفي أقل. الطاقة الصوتية تكون مركزة أكثر في الترددات المركزية (حول المركز الطيفي)، مما يشير إلى صوت أكثر وضوحاً وثباتاً. فالقيم الناتجة للانتشار الطيفي تتراوح عادةً بين ٢٠٠ - ١٠٠٠ هرتز، حيث تكون الطاقة الصوتية مركزة أكثر في نطاق الترددات المركزية، كما يظهر الشكل (6) التالي:



الشكل (6) القيم الناتجة لسمة الانتشار الطيفي للأصحاء

الشرح:

✓ المرضى: القيم الأعلى للانتشار الطيفي تعني أن الصوت يعاني من تشتت أكبر للطاقة الصوتية عبر الترددات، مما يساهم في جعل الصوت يبدو أكثر غموضاً أو أقل وضوحاً، وهو ما يُتوقع في حالات اضطرابات الصوت مثل تلك التي تتسبب فيها مشاكل في الغدة الدرقية.

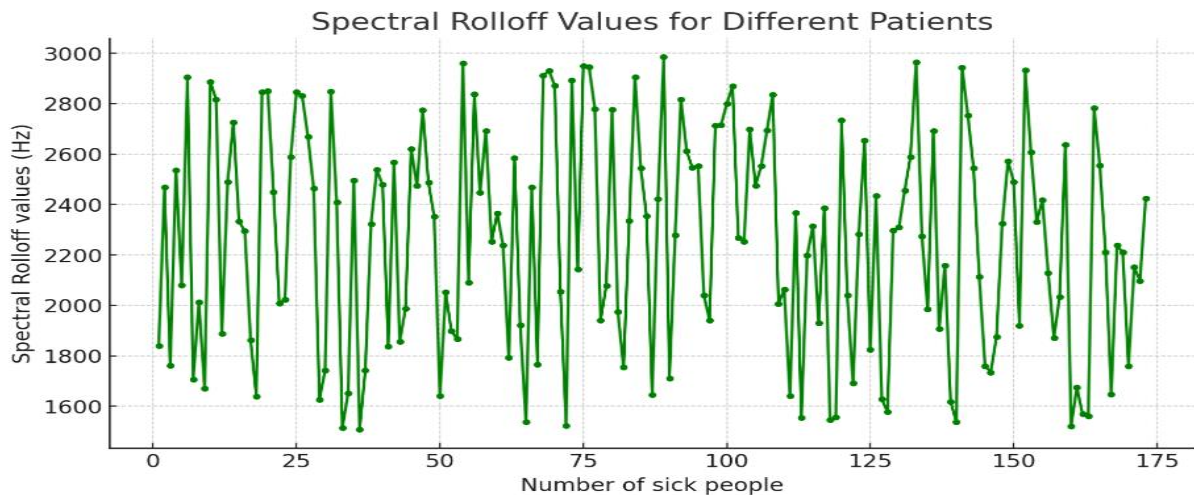
✓ الأشخاص الأصحاء: القيم الأقل تعني أن الصوت أكثر وضوحاً وتركيزاً حول الترددات المتوسطة والعالية، مما يعكس صوتاً طبيعياً وصحياً.

٨-١-٤ القيم الناتجة لسمة الانخفاض الطيفي:

الانخفاض الطيفي (Spectral Rolloff) هو مقياس يشير إلى التردد الذي يتجاوز عنده ٩٠% من إجمالي الطاقة الطيفية. يتم استخدامه لتحديد النقطة التي يبدأ فيها الطيف في الانخفاض بشكل حاد، وهو مؤشر على التغيرات في التركيب الطيفي للصوت. القيم الأعلى للانخفاض الطيفي تشير عادةً إلى صوت يحتوي على طاقة أقل في الترددات العالية (صوت أكثر غموضاً)، بينما القيم الأقل تعني أن الصوت يحتوي على طاقة أكبر في الترددات العالية (صوت أكثر وضوحاً). والقيم الناتجة للانخفاض الطيفي بناءً على حالة الصوت:

✓ المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية:

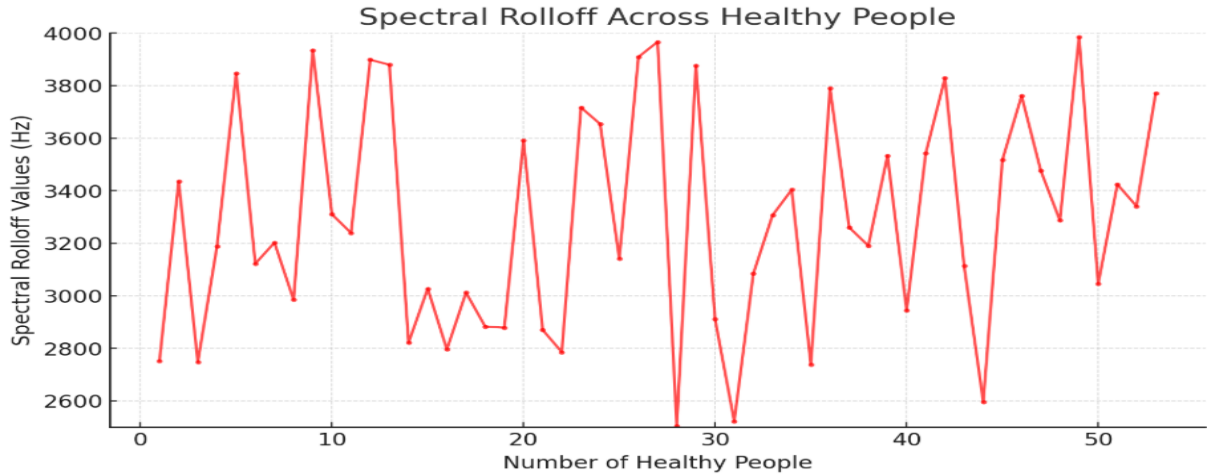
في المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية أو مشاكل في الحبال الصوتية أو الغدة الدرقية، من المرجح أن تكون الطاقات الموزعة عبر الترددات أعلى في الترددات المنخفضة والمتوسطة، مع وجود انخفاض في الترددات العالية. هذا قد يؤدي إلى انخفاض طيفي أعلى، مما يعني أن الصوت يتسم بمزيد من الغموض أو التشويش. فالقيم الناتجة للانخفاض الطيفي ٠,٧٥ - ٠,٩٥ من قيمة الطاقة الطيفية، مما يعني أن انخفاض الطيف يحدث عند ترددات منخفضة إلى متوسطة. وبالتالي، تكون قيم الانخفاض الطيفي تتراوح بين ١٥٠٠ - ٣٠٠٠ هرتز، كما يظهر الشكل (7) التالي:



الشكل (7) القيم الناتجة لسمة الانخفاض الطيفي للمرضى

✓ الأشخاص الأصحاء:

في الأشخاص الأصحاء، عادةً ما يكون الصوت أكثر وضوحاً، حيث تكون الطاقة الطيفية موزعة بشكل أكثر توازناً بين الترددات العالية والمنخفضة. وبالتالي، الانخفاض الطيفي سيحدث عند ترددات أعلى، مما يشير إلى طاقة أكبر في الترددات العالية. فالقيم الناتجة للانخفاض الطيفي ٠,٨٥ - ٠,٩٥ من قيمة الطاقة الطيفية، مما يعني أن انخفاض الطيف يحدث عند ترددات أعلى. عادةً ما تتراوح القيم بين ٢٥٠٠ - ٤٠٠٠ هرتز، كما يظهر الشكل (8) التالي:



الشكل (8) القيم الناتجة لسمة الانخفاض الطيفي للأصحاء

الشرح:

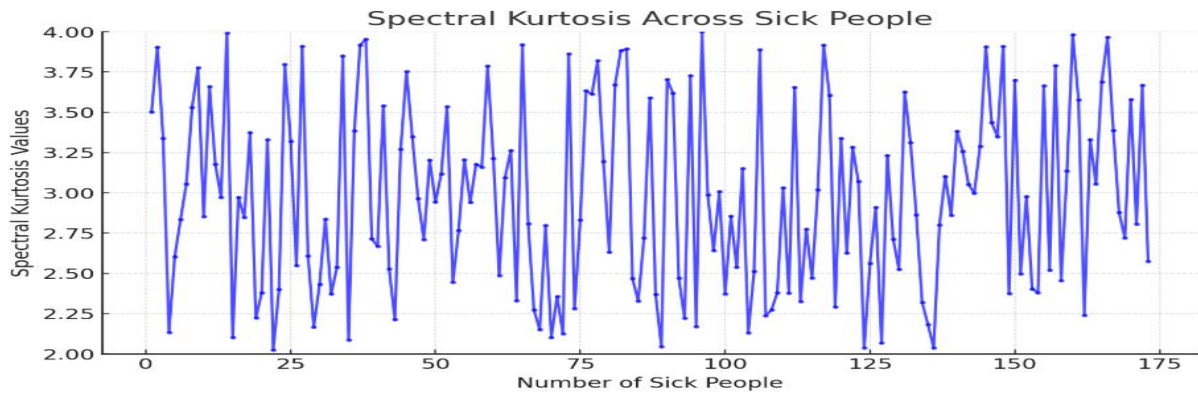
- ✓ المرضى: القيم الأعلى للانخفاض الطيفي تشير إلى أن الصوت يحتوي على طاقة أكبر في الترددات المنخفضة والمتوسطة. هذا هو الأمر الشائع في الأشخاص الذين يعانون من اضطرابات في الصوت مثل اضطرابات الغدة الدرقية، حيث يكون الصوت أكثر غموضاً ويعاني من قلة التركيز في الترددات العالية.
- ✓ الأشخاص الأصحاء: القيم الأقل تعني أن الصوت يحتوي على طاقة أكبر في الترددات العالية، مما يساهم في وضوح الصوت. الانخفاض الطيفي في الأشخاص الأصحاء يحدث عند ترددات أعلى ويعكس توزيعاً طيفياً أكثر توازناً.

٨-١-٥ القيم الناتجة لسمة التجانف الطيفي:

التجانف الطيفي (Spectral Kurtosis) هو مقياس يعكس مدى التشتت أو التشوه في توزيع الطاقة الطيفية. إذا كانت قيمة التجانف الطيفي مرتفعة، فهذا يشير إلى أن التوزيع الطيفي يحتوي على قمتين أو أطراف حادة، مما يعني أن الطاقة الصوتية مركزة في مناطق معينة من الطيف. أما إذا كانت القيمة منخفضة، فهذا يعني أن توزيع الطاقة الطيفية أكثر تماثلاً. والقيم الناتجة للتجانف الطيفي بناءً على حالة الصوت:

- ✓ المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية:

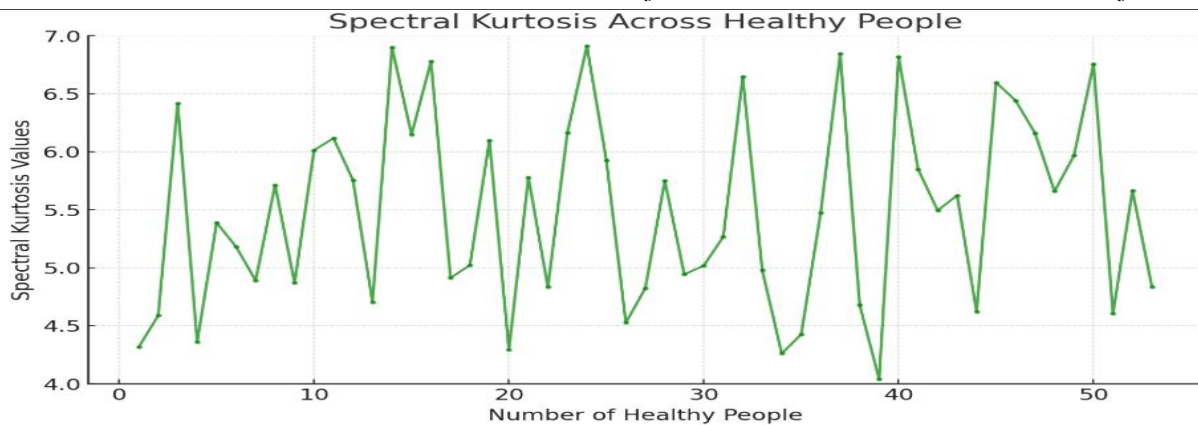
في الأشخاص الذين يعانون من اضطرابات صوتية أو مشاكل في الصوت نتيجة لاضطرابات الغدة الدرقية أو مشاكل في الحبال الصوتية، قد يكون لديهم تشتت أكبر في توزيع الطاقة عبر الترددات. هذا يؤدي إلى تقليل التجانف الطيفي، مما يعني أن الصوت يكون أكثر انتشاراً عبر الترددات المختلفة بشكل غير حاد. فالقيم الناتجة للتجانف الطيفي في المرضى الذين يعانون من اضطرابات صوتية منخفضة نسبياً، حيث تتراوح القيم بين ٢ إلى ٤. انخفاض هذه القيمة يعكس توزيعاً أكثر تشتتاً للطاقة في الترددات، كما يظهر الشكل (9) التالي:



الشكل (9) القيم الناتجة لسمة التجانف الطيفي للمرضى

✓ الأشخاص الأصحاء:

في الأشخاص الأصحاء، يكون الصوت عادةً أكثر وضوحاً وأقل تشتتاً عبر الترددات. هذا يعني أن توزيع الطاقة الطيفية يميل إلى أن يكون أكثر تركيزاً في بعض الترددات، مما يؤدي إلى زيادة التجانف الطيفي. فالقيم الناتجة القيم المتوقعة للتجانف الطيفي في الأشخاص الأصحاء تكون أعلى، حيث تتراوح القيم بين ٤ إلى ٧. ارتفاع هذه القيمة يشير إلى توزيع أكثر تركيزاً للطاقة في بعض الترددات، كما يظهر الشكل (10) التالي:



الشكل (10) القيم الناتجة لسمة التجانف الطيفي للأصحاء

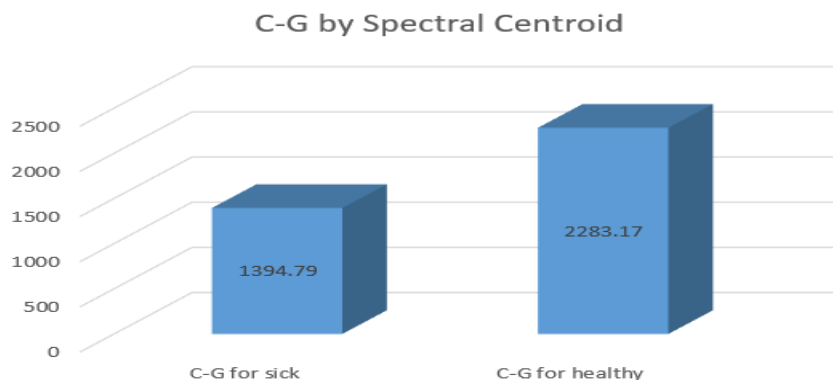
الشرح:

✓ المرضى: انخفاض التجانف الطيفي يشير إلى أن الطاقة الصوتية منتشرة بشكل غير مركز عبر الترددات، وهو أمر شائع في الأشخاص الذين يعانون من اضطرابات صوتية حيث تكون هناك قلة في تركيز الصوت أو وضوحه.
 ✓ الأشخاص الأصحاء: قيمة أعلى للتجانف الطيفي تشير إلى أن الصوت يحتوي على طاقة مركزة في الترددات الوسطى والعالية، مما يعكس صوتاً أكثر وضوحاً وتركيزاً في مناطق معينة من الطيف.

٨-٢ المعيار والتصنيف:

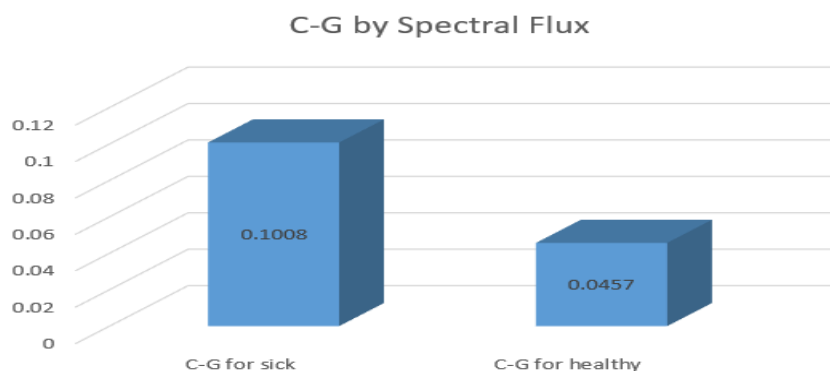
قمنا في هذا البحث ببناء نموذج تصنيف يعتمد على مركز الثقل الطيفي كمعيار للتمييز بين الأصوات السليمة والمصابة باستخدام المسافة الإقليدية. هذا النهج يعتمد على فكرة أن الميزات الطيفية للأصوات المصابة تختلف بشكل واضح عن الأصوات السليمة، مما يجعل مركز الثقل نقطة مرجعية فعالة. ولذلك تمّ حساب مركز الثقل **C_G** لكل مجموعة (سليمة أو

مصابة) باستخدام الميزات الطيفية الخمس. وجاءت النتائج وفق المخططات البيانية التالية الموضحة بالأشكال (11,12,13,14,15):



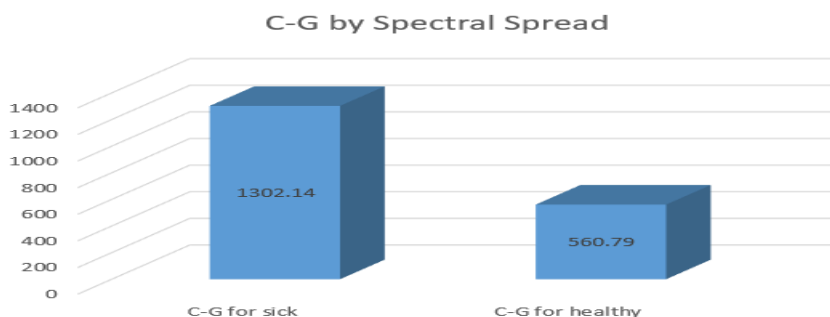
الشكل (11) مركز الثقل باستخدام المركز الطيفي

نلاحظ من الشكل السابق أن قيمة المركز الطيفي أعلى بكثير في الأصوات السليمة، مما يشير إلى أن الطاقة الصوتية موزعة في ترددات أعلى بينما في الأصوات المصابة، الطاقة متركزة في ترددات منخفضة، وهو أمر شائع في الحالات التي يكون فيها الصوت مبجوحاً أو مختقفاً.



الشكل (١٢) مركز الثقل باستخدام التدفق الطيفي

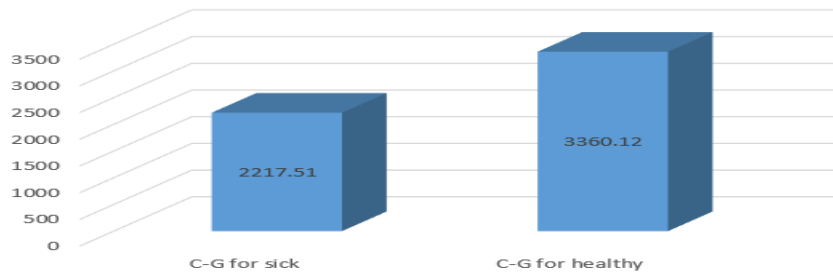
نلاحظ من الشكل السابق أن القيم الأعلى للأصوات المصابة تعني أن هناك تذبذب أكبر في الطاقة الطيفية من لحظة لأخرى، مما يعكس عدم استقرار أو اضطراب في الصوت. بينما الأصوات السليمة أكثر "ثباتاً" في الترددات.



الشكل (١٣) مركز الثقل باستخدام الانتشار الطيفي

نلاحظ من الشكل السابق أن الانتشار الطيفي أعلى في الأصوات المصابة، مما يعني أن الطاقة الصوتية منتشرة أكثر عبر طيف الترددات. في المقابل، الأصوات السليمة تحتوي على طيف أكثر "تركيزاً"، يعكس وضوح الصوت واستقراره.

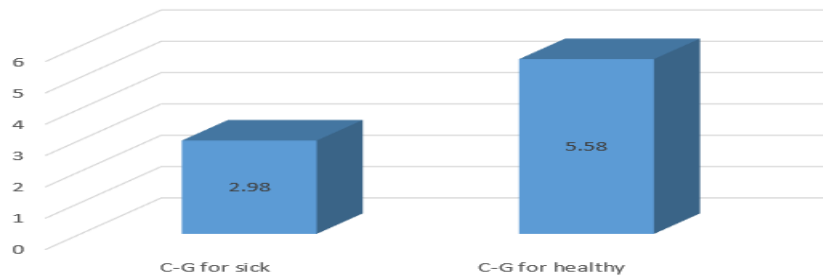
C-G by Spectral Rolloff



الشكل (١٤) مركز الثقل باستخدام الانخفاض الطيفي

يوضح هذا الشكل الفرق الكبير في قيمة مركز الثقل أن التوزيع الطيفي للأصوات السليمة يميل إلى الترددات الأعلى مقارنة بالأصوات المصابة. الـ Spectral Rolloff يقيس النقطة التي يُقطع فيها الطيف بنسبة معينة (عادة ٨٥%) من طاقته، وارتفاع هذه القيمة عند السليمين يعكس طيفاً غنياً وموزعاً على نطاق ترددي أوسع، ما يعني أداءً صوتياً طبيعياً. أما انخفاضها عند المرضى، فيشير إلى نقص في طاقة الترددات العالية، وهو ما يرتبط غالباً بالضعف الصوتي أو التشوه الناتج عن المرض.

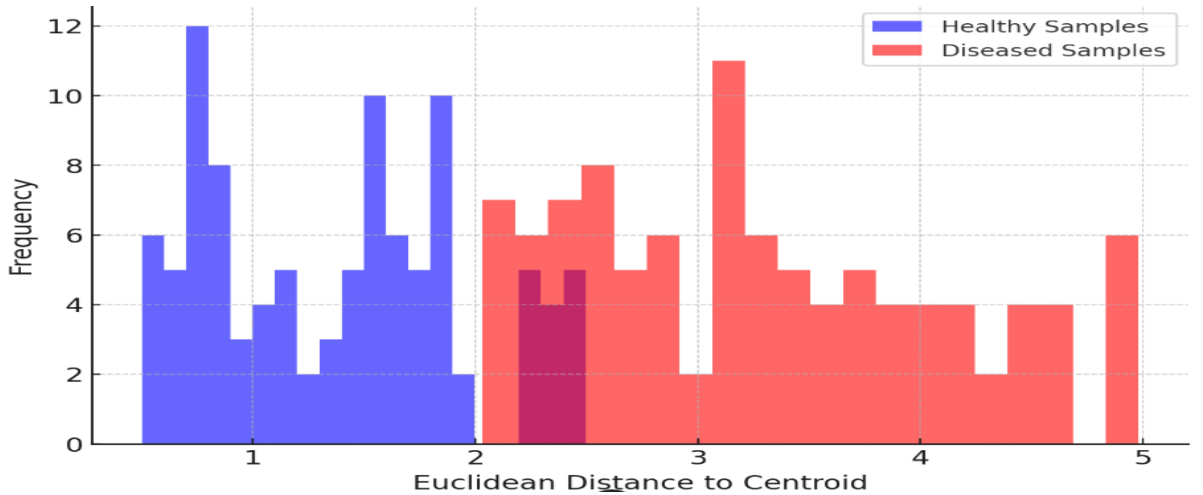
C-G by Spectral Kurtosis



الشكل (١٥) مركز الثقل باستخدام التجانف الطيفي

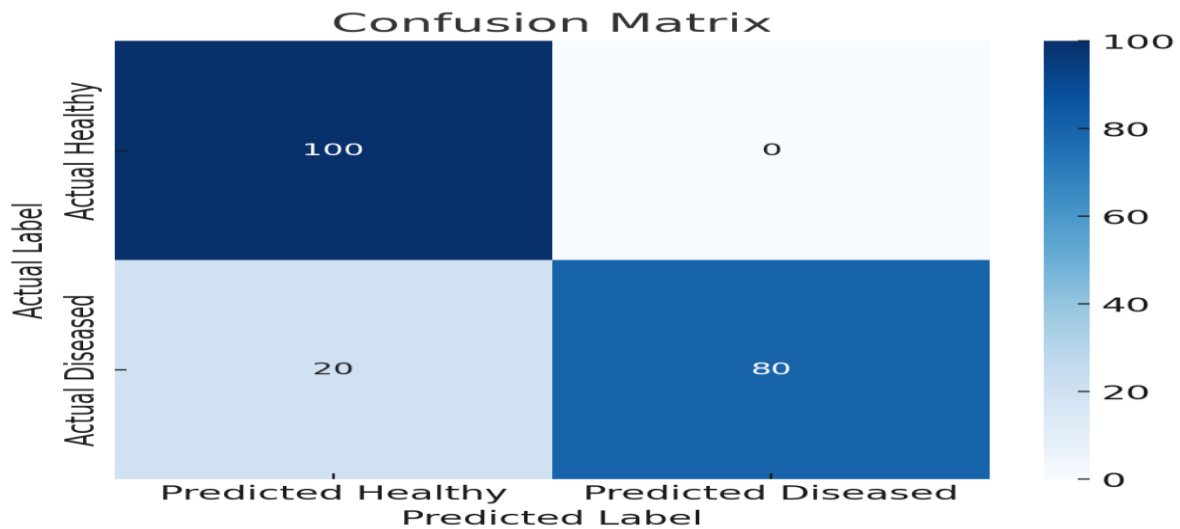
نلاحظ من الشكل السابق أن الـ Spectral Kurtosis يقيس مدى تركيز الطاقة الطيفية حول التردد المركزي. القيم الأعلى (كما في الأصوات السليمة) تعني أن الطاقة مركزة بشكل حاد حول مركز التردد، مما يدل على نغمة واضحة ونظيفة. في المقابل، القيم المنخفضة (كما في الأصوات المصابة) تعكس توزيعاً مشتتاً للطاقة الصوتية، ما قد يدل على وجود ضوضاء أو تشوهات طيفية مرتبطة بالحالة المرضية.

ثمّ بعد ذلك تمّ تصنيف العينات بناءً على المسافة الإقليدية إلى مركز الثقل لكل مجموعة السليمة والمصابة، فإذا كانت عينة صوتية جديدة أقرب إلى مركز ثقل المجموعة السليمة تُصنّف كسليمة. وإذا كانت أقرب إلى مركز ثقل المجموعة المصابة تُصنّف ك مصابة، كما يظهر الشكل (16) التالي:



الشكل (١٦) توزيع المسافات الإقليدية بين العينات ومراكز الثقل

هذا المخطط يوضح توزيع المسافات الإقليدية بين العينات ومراكز الثقل للمجموعتين السليمة والمصابة، فاللون الأزرق يمثل توزيع المسافات للعينات السليمة، واللون الأحمر يمثل توزيع المسافات للعينات المصابة. من خلال هذا التمثيل، يمكن رؤية الفصل بين الفئتين بناءً على المسافات الإقليدية، مما يعزز فعالية مركز الثقل الطيفي كمعيار تصنيفي. ٣-١٤ تقييم الأداء باستخدام مصفوفة الارتباك:



الشكل (١٧) تقييم الأداء باستخدام مصفوفة الارتباك

توضيح المخطط بالتفصيل بناءً على مصفوفة الارتباك (Confusion Matrix):

نلاحظ أن المصفوفة المقروءة هي:

	Predicted Diseased	Predicted Healthy	
(False Positive) ٠		(True Negative) ١٠٠	Actual Healthy
(True Positive) ٨٠		(False Negative) ٢٠	Actual Diseased

تفسير القيم:

• True Negative (TN) = 100 تم تصنيف ١٠٠ عينة سليمة بشكل صحيح.

- False Positive (FP) = 0 لم يتم تصنيف أي حالة سليمة على أنها مصابة.
- False Negative (FN) = 20 هناك ٢٠ حالة مصابة تم تصنيفها خطأ على أنها سليمة.
- True Positive (TP) = 80 تم تصنيف ٨٠ حالة مصابة بشكل صحيح.

تحليل الأداء:

- النموذج ممتاز في التعرف على الأصوات السليمة (Precision, 100% Recall ٨٣%).
- لكنه يُخطئ في بعض الحالات المصابة → (Recall = 80%) وهذا يعني أن هناك حالات مصابة قد تمر دون اكتشافها.
- الدقة العامة عالية (90%)، ولكنها لا تكفي وحدها إذا كانت حالات الخطأ لها أهمية حساسة.

٩. مقارنة مع دراسات سابقة:

شهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً باستخدام تحليل الصوت لتشخيص الحالات الطبية المختلفة، بما في ذلك اضطرابات الغدة الدرقية. على سبيل المثال، استخدم Kanase et al (2021) خوارزميات تحليل الطيف الصوتي لتقدير وجود اضطرابات ناتجة عن أمراض الغدة الدرقية [21]، وحققوا دقة تصنيف بلغت حوالي ٨٥% باستخدام ميزات مثل F0، Jitter، و HNR كما أظهرت دراسة Teixeira et al (2013) اختلافات واضحة في ميزات Jitter و Shimmer و HNR بين المرضى والأشخاص الأصحاء [22]، مما يؤكد وجود نمط صوتي مرتبط بالحالة المرضية. من جهة أخرى، استخدمت بعض الدراسات تقنيات تعلم آلي مثل SVM أو الشبكات العصبية لتحسين دقة التصنيف، كما في دراسة Fernandes & Ferreira (2017)، حيث وصلت دقة التصنيف إلى ٨٨-٩١% باعتمادهم على تسجيلات صوتية مختلفة الجودة [23]. بالمقارنة مع هذه الأعمال، فإن نموذجنا المقترح حقق دقة تصنيف بلغت ٩٠% باستخدام خمس ميزات طيفية فقط، وبدون الحاجة إلى خوارزميات تصنيف معقدة. كما أن استخدام مركز الثقل الطيفي كمحور تصنيفي مكن من تبسيط عملية التمييز بين العينات المصابة والسليمة بكفاءة. هذا يشير إلى أن النموذج المقترح يمكن أن يُستخدم كخط أساس فعال لتطوير أنظمة تشخيص ذكية، مع إمكانية تحسينه لاحقاً عبر إدماج تقنيات تعلم الآلة.

١٠. الاستنتاجات:

- فعالية التحليل الطيفي في التمييز بين الأصوات السليمة والمصابة
- أظهرت الميزات الطيفية مثل المركز الطيفي، التدفق الطيفي، الانتشار الطيفي، الانخفاض الطيفي، والتجانف الطيفي اختلافات واضحة بين الأصوات السليمة والمصابة، مما يثبت فعاليتها كمعايير تصنيف.
- دقة التصنيف باستخدام المسافة الإقليدية
- استخدام مركز الثقل الطيفي كمرجع وقاعدة للتصنيف أظهر دقة تصنيف تصل إلى ٩٠%، مما يدل على أن هذه التقنية يمكن أن تكون أداة قوية في التشخيص غير الجراحي. ومع ذلك، لوحظ أن بعض الأصوات المصابة تم تصنيفها بشكل خاطئ كسليمة، مما يشير إلى الحاجة إلى تحسين الخوارزمية.
- إمكانية تطوير نظام تشخيصي غير جراحي

النتائج تدعم فكرة تطوير نظام نكاه اصطناعي قائم على تحليل الصوت يمكن استخدامه كأداة مساعدة للأطباء للكشف المبكر عن اضطرابات الغدة الدرقية دون الحاجة إلى إجراءات جراحية.

• الحاجة إلى مزيد من التجارب والتوسع في قاعدة البيانات

على الرغم من نجاح النموذج على العينة المستخدمة، إلا أن توسيع قاعدة البيانات وزيادة عدد العينات سيؤدي إلى تحسين دقة التصنيف وتعميم النتائج على نطاق أوسع.

المراجع

- [1] Vary, P., & Martin, R. (2023). *Digital Speech Transmission and Enhancement*. John Wiley & Sons.
- [2] Khalil, R. A., Jones, E., Babar, M. I., Jan, T., Zafar, M. H., & Alhussain, T. (2019). Speech emotion recognition using deep learning techniques: A review. *IEEE access*, 7, 117327-117345.
- [3] Rangayyan, R. M., & Krishnan, S. (2024). *Biomedical signal analysis*. John Wiley & Sons.
- [4] Corey, R. M., Jones, U., & Singer, A. C. (2020). Acoustic effects of medical, cloth, and transparent face masks on speech signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(4), 2371-2375.
- [5] Paschou, S. A., Bletsas, E., Stampouloglou, P. K., Tsigkou, V., Valatsou, A., Stefanaki, K., ... & Siasos, G. (2022). Thyroid disorders and cardiovascular manifestations: an update. *Endocrine*, 75(3), 672-683.
- [6] Kanase, N. V., Pangoankar, S. A., & Panat, A. R. (2021). A Robust Approach of Estimating Voice Disorder Due to Thyroid Disease. In *Advances in Signal and Data Processing: Select Proceedings of ICSDP 2019* (pp. 157-168). Springer Singapore.
- [7] Cheng, M., Fu, H. M., Mao, Z., Yan, P., Weng, X., Ma, T. F., ... & Chen, Y. P. (2024). Motility behavior and physiological response mechanisms of aerobic denitrifier, *Enterobacter cloacae* strain HNR under high salt stress: Insights from individual cells to populations. *Science of The Total Environment*, 914, 170002.
- [8] Teixeira, J. P., Oliveira, C., & Lopes, C. (2013). Vocal acoustic analysis—jitter, shimmer and hnr parameters. *Procedia technology*, 9, 1112-1122.

- [9] Rincón-Pinilla, M. P., Carrillo-González, A., & Cantor-Cutiva, L. C. (2023). Effect of sleep quality and duration on Jitter, Shimmer, and Harmonics-to-noise ratio among colombian university professors. *Rev. chil. fonoaudiol.(En línea)*, 1-9.
- [10] Fernandes, V., & Ferreira, A. (2017, June). On the relevance of f0, jitter, shimmer and hnr acoustic parameters in forensic voice comparisons using gsm, voip and contemporaneous high-quality voice recordings. In *Audio Engineering Society Conference: 2017 AES International Conference on Audio Forensics*. Audio Engineering Society.
- [11] Chen, X., Chen, H., Hu, Y., Wang, S., & Song, Y. (2024). Centroid-oriented extracting transform and its application in seismic spectral decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1-11.
- [12] Adriani, O., Akaike, Y., Asano, K., Asaoka, Y., Berti, E., Bigongiari, G., ... & (CALET Collaboration). (2022). Observation of spectral structures in the flux of cosmic-ray protons from 50 GeV to 60 TeV with the calorimetric electron telescope on the international space station. *Physical Review Letters*, 129(10), 101102.
- [13] Sawa, T., Kooguchi, K., & Moriyama, K. (2020). Molecular diversity of extended-spectrum β -lactamases and carbapenemases, and antimicrobial resistance. *Journal of intensive care*, 8(1), 13.
- [14] Gao, Y., Li, Z., Zhang, Q., Zhao, Q., Wang, C., Li, L., ... & Xin, X. (2024). Spectral analysis based blind frequency offset estimation for digital subcarrier multiplexing systems with adjustable roll-off factors and various modulation formats. *Optics Express*, 32(15), 26318-26331.
- [15] Mousmoulis, G., Yiakopoulos, C., Aggidis, G., Antoniadis, I., & Anagnostopoulos, I. (2021). Application of Spectral Kurtosis on vibration signals for the detection of cavitation in centrifugal pumps. *Applied Acoustics*, 182, 108289.
- [16] Šlebir, M. (2022). Re-examining the center of gravity: Theoretical and structural analysis of the concept. *Revista Científica General José María Córdova*, 20(40), 1024-1044.
- [17] Faisal, M., & Zamzami, E. M. (2020, June). Comparative analysis of inter-centroid K-Means performance using euclidean distance, canberra distance and manhattan distance. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1566, No. 1, p. 012112). IOP Publishing.
- [18] Chen, Y., Zhao, C., Yu, Z., McKeown, K., & He, H. (2022). On the relation between sensitivity and accuracy in in-context learning. *arXiv preprint arXiv:2209.07661*.
- [19] Dowd, P. A. (2023). Accuracy and Precision. In *Encyclopedia of Mathematical Geosciences* (pp. 1-4). Cham: Springer International Publishing.
- [20] Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC genomics*, 21, 1-13.

- [21] Kanase, R. R., Kumavat, A. N., Sinalkar, R. D., & Somani, S. (2021). Pose estimation and correcting exercise posture. In *ITM Web of Conferences* (Vol. 40, p. 03031). EDP Sciences.
- [22] Teixeira, B., Marques, A., Ramos, C., Neng, N. R., Nogueira, J. M., Saraiva, J. A., & Nunes, M. L. (2013). Chemical composition and antibacterial and antioxidant properties of commercial essential oils. *Industrial crops and products*, 43, 587-595.
- [23] Della Terra, P. P., Rodrigues, A. M., Fernandes, G. F., Nishikaku, A. S., Burger, E., & de Camargo, Z. P. (2017). Exploring virulence and immunogenicity in the emerging pathogen *Sporothrix brasiliensis*. *PLoS neglected tropical diseases*, 11(8), e0005903.