



HIAST
Communication
Department

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم الاتصالات
العام الدراسي 2022/2023

أطروحة

أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة الاتصالات الراديوية والنقالة

دراسة إمكانية زيادة المجال الترددي لخلية قياس ثابتي
العازلية الكهربائية والسماحية المغناطيسية للمواد الصلبة
المتماثلة المناحي على مجال الأمواج المايكروية

تقديم

قصي سمير شعبان

إشراف

الدكتور علي حسن

الدكتور محمود عيسى

1/9/2025

Syrian Arab Republic
Higher Institute for Applied Sciences and Technology
Communication Department
Academic Year 2022/2023



Thesis

has been prepared for obtaining a Master's degree in
Radio and Mobile Communications Engineering

Study of the Possibility of Increasing the Frequency Rang of a Measurement Cell for the Permittivity and Permeability Constants of Homogeneous Solid Materials in the Microwave Domain

Submitted by
Qussai Samir Shaaban

Supervised by
D. Ali Hasan
D. Mahmoud Eissa

1/9/2025

إهداء

إلى وطني الغالي سوريا مهد الابجدية والحضارة

إلى مؤسس كياني العلمي في هذه الحياة" والدي العزيز المهندس سمير شعبان "

إلى من تنحني لها هامتي سر سعادي " أمي العزيزة "

إلى من كان لهم فضل كبير في ارتقائي الى درجة العلماء والباحثين أساتذتي المحجلين في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

إلى الذين من أجلهم أكافح في هذا العالم أخوتي ابي وجلنار واليسار وتول

إلى من له أثر لطيف في حياتي أصدقائي الأعزاء

إلى مؤسس علم الرياضيات الذي أكد منذ أكثر من الفي عام ان كل نغمة موسيقية -التي هي اهتزاز في الوتر- تمثل جسيما، فكانت نظريته في العدد والنغم ملهمة لعلماء الفيزياء النظرية في هذا القرن للاتجاه نحو الاوتار الفائقة " فيثاغورث الحكيم "

" توجد هندسة في دندنة الاوتار كما توجد موسيقى في فراغات الاشكال الكروية "

فيثاغورث الحكيم

" There is geometry in the humming of strings ، as there is music in the voids of spherical shapes "

Pythagoras the Wise

كلمة شكر

أقدم بالشكر إلى دكاترتي في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا على دعمهم الدائم والمستمر لنا. كما أقدم بالشكر للدكتور محمود عيسى الدكتور المشرف على رسالتي الذي قدم بكل إخلاص نصائحه السليمة والحكيمة خلال مراحل العمل المختلفة.

قصي سمير شعبان

الخلاصة

إن معرفة الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد وتوصيفها طيفيا أصبح مهم في فروع البحث العلمي كتوصيف الخلايا السرطانية ودراسة إمكانية اكتشافها. تم في هذا البحث التعرف على طرق وخوارزميات قياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد في بيئات مختلفة مع التركيز على طريقة القياس Transmission/Reflection measurement ودراسة إمكانية زيادة المجال الترددي لخلية القياس من نوع 13 mm cell. بسبب عدم وجود دراسات سابقة تتحدث عن زيادة المجال الترددي للخلايا القياس 13 mm تم في هذا البحث نمذجة ومحاكاة خلية مشابهة لخلية 13 mm وهي خلية بارك (هذه الخلية تستخدم لقياس العزل الكهرومغناطيسي الفعال للمواد) حيث تمت المحاكاة في برنامج CST 2021. تعتبر خلية بارك تطوير لمعيار ASTM D4935 والتي تعمل حتى تردد 2.67 GHz تم بعد نمذجة ومحاكاة خلية بارك اتباع ثلاث طرق من اجل دراسة إمكانية زيادة المجال الترددي لخلية القياس.

الطريقة الأولى كانت بتغيير نصف قطر قاعدة المحول المخروطي لخلية الحالة 2 من بارك حيث أصبحت خلية القياس قادرة على القياس على كامل المجال الترددي [0-3]GHz.

الطريقة الثانية كانت بنمذجة ومحاكاة خلية القياس CHA ثم إدخال التفلون الى داخل المحول المخروطي، كان المجال الترددي لها [0-0.66]GHz.

الطريقة الثالثة كانت بإدخال جزء من الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المحول المخروطي، كان المجال الترددي لخلية القياس [0-1.035]GHz.

تم تطبيق النماذج السابقة على خلية قياس ثابت العازلية الكهربائي، ونتج عن ذلك تطوير خلية جديدة CHA 13mm ذات معامل انعكاس منخفض للغاية حيث كانت VSWR أقل من 1.02 حتى تردد 8GHz وأقل من 1.01 حتى تردد 2 GHz وبشكل عام على كامل المجال الترددي أقل من 1.09، الأمر الذي أدى إلى تحسين دقة القياس دون الحاجة إلى تعديل الخوارزمية الحاسوبية المستخدمة.

تم بعدها بناء نموذجين لخلية قياس ثابت العازلية الكهربائي من نوع 13 mm وذلك بعد تطبيق نوع الخلايا CAA و CHA الهجينة عليها فكانت الخلايا الجديدة CAA 13 mm ذات المحول المخروطي الهوائي الذي ممانعته المميزة $Z_{con.air1}$ و الخلية CHA 13 mm ذات المحول المخروطي الهجين الذي ممانعته المميزة لقسم التفلون $Z_{con.PTFE2}$ و ممانعته المميزة لقسم الهواء $Z_{con.air2} = 30.4 \Omega$. أظهرت النتائج تحسين كبير في المجال الترددي بالنسبة لخلية CHA حيث أن قيمة VSWR كانت أقل من 1.01 حتى التردد 2 GHz وكانت أقل من 1.02 حتى تردد 8 GHz وكانت أقل من 1.09 على كامل المجال الترددي أي حتى 10 GHz. من أجل مقارنة نتيجة تحسين المجال الترددي بالنسبة لقراءة ثابت العازلية الكهربائي تم قياس ثابت العازلية لمادة FR-4 (الموصفة طيفيا في برنامج CST 2021) باستخدام

خلايا CHA 13mm وخلية CAA 13mm كانت النتيجة تحسن قراءة ثابت العازلية بالنسبة لخلايا CHA 13mm.

كلمات مفتاحية: ASTM D4935 المعيار الأمريكي لقياس العزل الفعال للمواد، CAA: خلايا القياس ذات المحول المخروطي الهوائي، CPA: خلايا القياس ذات المحول المخروطي التفلوني، CHA: خلايا القياس ذات المحول المخروطي الهجين.

Abstract

The electromagnetic properties of materials and their spectral characterization have become increasingly significant in various scientific research fields, such as the characterization of cancer cells and the study of their detectability.

This research explores methods and algorithms for measuring the electromagnetic properties of materials in different environments, with a particular focus on the Transmission/Reflection measurement technique. It also investigates the possibility of extending the frequency range of the 13 mm measurement cell. Due to the lack of prior studies addressing frequency range enhancement for 13 mm cells, this study models and simulates a cell similar to the 13 mm type namely, the Park cell, which is used to measure the effective electromagnetic shielding of materials. The simulation was conducted using CST 2021 software.

The Park cell is considered an advancement of the ASTM D4935 standard and operates up to a frequency of 2.67 GHz.

After modeling and simulating the Park cell, three approaches were employed to investigate the potential enhancement of the measurement cell's bandwidth.

The first approach involved modifying the base radius of the conical transformer in Park's case 2 cell, which enabled the measurement cell to operate effectively across the entire frequency range of [0–3] GHz.

The second approach consisted of modeling and simulating the CHA measurement cell, followed by introducing Teflon into the conical transformer. This configuration achieved an operational frequency range of [0–0.66] GHz.

The third approach involved inserting a portion of the inner conductor of the port into the conical transformer, resulting in a measurement cell with an operational frequency range of [0–1.035] GHz.

Two models of the 13 mm dielectric constant measurement cell were subsequently constructed by applying the CAA and CHA hybrid cell designs. The new cells were CAA 13 mm, featuring an air-based conical adapter with $Z_{con.air1} = 50 \Omega$.

CHA 13 mm, featuring a hybrid conical adapter with $Z_{con.PTFE2} = 21 \Omega$ and $Z_{con.air2} = 30.4 \Omega$.

The results showed a significant improvement in the frequency range for the CHA cell, with a VSWR value less than 1.01 up to 2 GHz, less than 1.02 up to 8 GHz, and less than 1.09 across the entire frequency range up to 10 GHz.

To compare the frequency range enhancement in dielectric constant readings, the dielectric constant of FR-4 material (spectrally characterized in CST 2021) was measured using both CHA 13 mm and CAA 13 mm cells. The results indicated improved dielectric constant readings with the CHA 13 mm cells.

Keywords: ASTM D4935 – American standard for effective shielding measurement, CAA: conical Air Adapter cell, CPA: Conical PTFE Adapter cell, CHA: Conical Hybrid Adapter cell.

المحتويات

VII	قائمة الاشكال	.....
XI	قائمة الجداول	.....
XII	الاختصارات	.....
XIII	الرموز	.....
XV	مقدمة عامة	.....
1	الفصل الأول	.....
1	1.1 مقدمة	.....
3	2.1 الدراسات المرجعية	.....
30	الفصل الثاني	.....
30	1.2 مقدمة	.....
	2.2 طريقة TRANSMISSION/REFLECTION (TR) MEASUREMENT	.....
	32 CELLS	.....
34	3.2 المنهجية [17][16] NICOLSON-ROSS-WEIR (NRW)	.....
36	4.2 خلايا قياس ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية [18]	.....
38	5.2 دراسة إمكانية تحسين المجال الترددي لخلية القياس	.....
39	6.2 حساب مصفوفة تشتت العينة انطلاقاً من مصفوفة تشتت الخلية [18][19]	.....
44	الفصل الثالث	.....
44	1.3 نمذجة عينة الاختبار	.....
46	2.3 نمذجة ومحاكاة خلية بارك (دراسة الحالات الثمانية)	.....
47	1.2.3 الحالات 0 و 1 والذين يمثلان المعيارين الأساسيين	.....
48	2.2.3 الحالة 2 و 3 و 4 التي تمثل تحسينات بارك	.....
50	3.2.3 الحالة 5 و 6 و 7 التي تمثل تحسينات بارك	.....

51	4.2.3 إضافة تحسين على خلية بارك الحالة الثانية
52	3.3 دراسة إمكانية استخدام التفلون بدون انقطاع بقاعدة المخروط
57	4.3 دراسة معالجة تأثير الانقطاعات عن طريق التحكم بطول الناقل الداخلي مع وبدون وجود التفلون
63	5.3 مقارنة الحالات الثلاثة (خلية القياس القصيرة CASE 1 ، تغيير طول التفلون ضمن المخروط، تغيير طول الناقل الداخلي لخلية CHA ضمن المخروط بدون وجود التفلون)
66	6.3 الخلية المخروطية 13MM
	1.6.3 خلية القياس 13mm مع منافذ تفلون ومحول مخروطي من الهواء (CAA 13 mm) Conical Air
66	Adapter 13mm
68	2.6.3 خلية القياس 13mm مع منافذ تفلون ومحول مخروطي هجين من التفلون والهواء
72	3.6.3 قراءة ثابت العازلية الكهربائي
73	7.3 خاتمة
74	الخاتمة والافاق المستقبلية
75	المراجع

قائمة الاشكال

- 3 الشكل 1- خلية القياس حسب المعيار ASTM D4935.
- 4 الشكل 2- قياس العزل الفعال للنيكل NIC بواسطة خلية المعيار ASTM D4935 والخلية المطورة لحاملي عينة جديدين.
- 5 الشكل 3- على اليسار (a) حامل العينة الأول CSH1 (b) مقطع عرضي لحامل العينة الأول CSH1 وعلى اليمين (a) حامل العينة الثاني CSH2 (b) مقطع عرضي لحامل العينة الثاني CSH2.
- 5 الشكل 4- في الأعلى (a) حامل العينة الثالث CSH3 (b) مقطع عرضي لحامل العينة الثالث CSH3 .
- 6 شكل 5- العزل الفعال SE للعينات A، B، C، ضمن حوامل العينة الثلاث.
- 7 الشكل 6- الاشكال الأربعة للحياكة المراد اجراء الاختبار عليها (plain knitting، weft in-laid plain knitting، 1X1 rib، weft in-laid 1X1 rib).
- 8 الشكل 7- العزل الفعال للعينة 4 و 5.
- 8 الشكل 8- طريقة الفضاء الحر لقياس ثابت العزلية الكهربائي العقدي للمواد.
- 9 الشكل 9- مراحل تطوير خلية قياس العزل الفعال SE حسب المعيار ASTM D4935.
- 10 الشكل 10- خلية محورية لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية مع حساس حراري للتحكم بدرجة حرارة الغرفة.
- 11 الشكل 11- تغير المقادير العقدية لثابت العازلية الكهربائي العقدي والسماحية المغناطيسي عند درجات حرارة 25 و 85 حتى 6GHZ.
- 11 الشكل 12- تغير ثابت العازلية الكهربائي العقدي والسماحية المغناطيسي عند درجة حرارة 25 و 45 وعلى مجال ترددي عريض.
- 12 الشكل 13- خلية محورية ذات المقطع المستطيل لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية مع قوالب العينات MUT.
- 13 الشكل 14- قياس الخصائص الكهرومغناطيسية لعينات بكثافة 100% باستخدام الخلية المحورية ذات المقطع المربع.
- 13 الشكل 15- نتائج قياس الخلية المحورية ذات المقطع المربع مع اختلاف كثافة المواد.
- 14 الشكل 16- خلية معيارية قياسية لقياس العزل الكهربائي للمواد.
- 15 الشكل 17- المعيارين ASTM D4935 (a) المعيار الطبيعي (b) المعيار المعدل .
- 15 الشكل 18- Zc، S21، VSWR للحالتين 0 و 1.
- 16 الشكل 19- الحالات 2 و 3 و 4 والتي تمثل تعديلات بارك على المعيار المعدل.
- 17 الشكل 20- VSWR للحالات الأربعة لبارك.
- 17 الشكل 21- الحالة 5، 6، 7 لتعديلات بارك.
- 18 الشكل 22- VSWR للحالات 2، 5، 6، 7 لتعديلات بارك.

- 18 الشكل 23 - مجس BCI مع علبة المعايرة.
- 19 الشكل 24 - مجس BCI.
- 20 الشكل 25 - أجزاء مجس BCI.
- 20 الشكل 26 - تصميم jig مع توفيق الممانعات للدكتور عيسى مشرفي.
- 21 الشكل 27 - VSWR قبل وبعد التعديل على jig.
- 22 الشكل 28 - مراحل تطوير خلية العزل الفعال SE.
- 23 الشكل 29 - s11 لخلايا القياس خلال مراحل التطوير.
- 23 الشكل 30 - خلية القياس المحورية ASTM ES7-83.
- 24 الشكل 31 - خلية القياس المحورية ASTM D4935.
- 24 الشكل 32 - خلية القياس المحورية TEM-t Cell.
- 25 الشكل 33 - خلايا القياس المستطيلة.
- 25 الشكل 34 - فنجان فاراداي السريع المحوري المرتبط شعاعياً RCFFC.
- 26 الشكل 35 - مقطع عرضي للمحول المخروطي ضمن فنجان فاراداي RCFFC.
- 26 الشكل 36 - S21, S11 والممانعة المميزة Zc لفنجان فاراداي RCFFC قبل التحسين (المخططات فوق) وبعد التحسين.
- 27 الشكل 37 - خلية القياس المحورية مع حامل عينة مختلف مع قارورة غسل.
- 27 الشكل 38 - ثابت العازلية الكهربائي لنوعي الغسل بنسب ماء مختلفة.
- 28 الشكل 39 - المنحني يمثل تغير درجة حرارة الغسل بازدياد التردد.
- 28 الشكل 40 - تطويري Type 1 jig و Type 2 jig لمعيار ASTM D493.
- 29 الشكل 41 - S11 للنوع Type 1 jig.
- 29 الشكل 42 - S11 للنوع Type 2 jig.
- 31 الشكل 43 - خط نقل محوري مملوء بالمادة المراد اختبارها.
- 32 الشكل 44 - طريقة TR في قياس الخصائص الكهرومغناطيسية.
- 36 الشكل 45 - خلية القياس الكلاسيكية classical - 7mm cell.
- 37 الشكل 46 - خلية القياس المخروطية conical-13mm cell.
- 38 الشكل 47 - الخلية ذات المحول المخروطي المهجين الذي عازله التفلون والهواء (CHA) Conical Hybrid Adapter.
- 39 الشكل 48 - يمثل إزاحة الصفحة المرجعية لحساب مصفوفة تشتت العينة.
- 41 الشكل 49 - خوارزمية NRW.
- 42 الشكل 50 - الجزء الحقيقي لثابت عازلية مادة التفلون PTFE باستخدام خوارزمية NRW.

- 44 الشكل 51- عينة اختبارية ضمن برنامج المحاكاة CST.
- 45 الشكل 52- ثابت العازلية الكهربائي العقدي لمادة التفلون المقاسة في برنامج CST (a) القسم الحقيقي من ثابت العازلية الكهربائي (b) القسم التخيلي من ثابت العازلية الكهربائي.
- 46 الشكل 53- ثابت العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية لمادة التفلون في ماتلاب بعد تطبيق خوارزمية NRW.
- 46 الشكل 54- خلية القياس المحورية في برنامج CST.
- 47 الشكل 55- خلية القياس: (a) المعيار الطبيعي case 0 (b) المعيار القصير case 1 - في برنامج CST 2021.
- 47 الشكل 56- VSWR للحالة 0 و 1 في المحاكاة في برنامج CST 2021.
- 48 الشكل 57- محاكاة الحالات 2 و 3 و 4 من تحسينات بارك، a: الحالة 2، b: الحالة 3، b: الحالة 4.
- 49 الشكل 58- VSWR للحالة 2 و 3 و 4 في برنامج المحاكاة CST 2021.
- 50 الشكل 59- محاكاة الحالات 5 و 6 و 7 من تحسينات بارك، a: الحالة 5، b: الحالة 6، c: الحالة 7.
- 51 الشكل 60- VSWR للحالة 5 و 6 و 7 في المحاكاة CST 2021.
- 52 الشكل 61- مقطع في خلية بارك الحالة 2 بمحاكي CST 2021 بعد التحسين.
- 52 الشكل 62- VSWR للحالة 2 في المحاكاة CST 2021 بعد تعديل مسافة الانقطاع ومحاكاة بارك.
- 52 الشكل 63- الحالة 1 (case 1) من بارك أي المعيار الأساسي القصير مع اطوال مختلفة للتفلون ضمن المخروط CHA: (a) بدون ادخال التفلون الى داخل المخروط (b) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 0.5 \text{ mm}$ (c) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 0.86 \text{ mm}$ (d) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 1 \text{ mm}$ (e) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 4 \text{ mm}$ (f) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 7 \text{ mm}$ (g) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 13 \text{ mm}$ (h) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 19 \text{ mm}$ (i) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 25 \text{ mm}$ (j) مع ادخال تفلون على كامل المخروط بطول $L_{ptfe} = 31.4 \text{ mm}$.
- 53 الشكل 64- VSWR للحالة 1 (case 1) مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة (0mm، 0.5 mm، 0.86mm، 1 mm، 4mm) (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$.
- 54 الشكل 65- VSWR لخلية القياس CHA مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة (13 mm، 19 mm، 25 mm، 31.4 mm، 7mm) (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$.
- 55 الشكل 66- الممانعة على طول خلية القياس CHA ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة.
- 56 الشكل 67- الممانعة على طول خلية القياس CHA مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة.
- 56 الشكل 68- الحالة 1 (case 1) من بارك أي المعيار الأساسي القصير مع اطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط Length of inner conductor in adapter: (a) 1mm (b) 5mm (c) 7mm (d) 8mm.

- الشكل 69- VSWR على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) باطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (5)
 58 . VSWR < 1.25 على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي (a) (1mm ، 8 mm، 7 mm، mm
 الشكل 70- الممانعة على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) باطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (5 mm،
 59
 الشكل 71- الحالة 1 (case 1) من برك بوجود التفلون مع اطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (a) 0mm (b)
 60 1mm (c) 3mm (d) 5mm (e) 6mm .
 الشكل 72- VSWR على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) بوجود التفلون مع أطوال مختلفة (1mm، 3 mm ،
 61 (5mm، 6 mm) للناقل الداخلي داخل المخروط (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي VSWR < 1.25 .
 الشكل 73- الممانعة على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) بوجود التفلون مع أطوال مختلفة (1mm، 3 mm ،
 62 (5mm، 6 mm) للناقل الداخلي داخل المخروط .
 الشكل 74- VSWR على طول خلية القياس case 1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA)
 ومع ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case 1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة
 64 3mm بدون ادخال التفلون: (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي VSWR < 1.25 .
 الشكل 75- الممانعة على طول خلية القياس case 1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA) ومع
 ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case 1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة 3mm
 بدون ادخال التفلون.
 65
 الشكل 76- خلية CAA 13 mm .
 67
 الشكل 77- VSWR لخلية CAA 13 mm .
 68
 الشكل 78- خلية القياس CHA 13mm .
 69
 الشكل 79- منظور يمثل أجزاء خلية CHA 13 mm .
 69
 الشكل 80- VSWR للخلية CAA 13 mm والخلية CHA 13 mm (قبل وبعد التحسين).
 70
 الشكل 81- الممانعة الموجية على طول خلية القياس CHA 13 mm .
 71
 الشكل 82- VSWR لخلية القياس CHA 13 mm مع اطوال مختلفة لحامل العينة.
 71
 الشكل 83- ثابت العازلية الكهربائي لمادة FR-4 باستخدام خوارزمية NRW قبل التحسين (CAA 13 mm) وبعد
 التحسين (CHA 13 mm) حامل عينتهما 3mm في برنامج ماتلاب.
 72

قائمة الجداول

- الجدول 1- مقارنة إجراءات حساب الخصائص الكهرومغناطيسية. 32
- الجدول 2 - مقارنة مجال التردد بين نمذجة بارك والنمذجة الجديدة. 48
- الجدول 3 - مقارنة اعلى تردد تعمل عليه الخلية بين النمذجة الجديدة تحسين بارك الحالات 2 و3 و4 . 49
- الجدول 4 - مقارنة بين تردد العمل في تصميمنا باستخدام CST 2021 ومحاكاة بارك شكل 22 للحالات 5 و6 و7. 51
- الجدول 5 - مقارنة بين خلية case1 وخلية case1 مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل التفلون وخلية CHA مع وبدون ادخال التفلون وخلية CHA مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ و بدون تفلون ضمن المخروط. 66
- الجدول 6- أبعاد خلية CAA 13 mm. 67
- الجدول 7- بارمترات تصميم CHA 13 mm. 70

الاختصارات

ASTM D4935: Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding
BCI: Bulk Current Injection
CAA 13mm: Conical Air Adapter 13 mm Cell
CHA: Conical Hybrid adapter
CHA 13 mm: Conical Hybrid Adapter 13 mm Cell
CS: Conducted-Susceptibility
CSHs: Coaxial Sample Holders
CST: Computer Simulation Technology
Effectiveness of Planar Materials
EMC: electromagnetic compatibility
FFC: Fast Faraday Cup
Jig: Calibration Fixture
MUT: Material Under Test
NRW: Nicolson–Ross–Weir method
RCFFC: Radially Coupled Coaxial Fast Faraday Cup
SCL: Short circuit line method
SE: Shielding Effectiveness
VNA: Vector Network Analyzer
VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

الرموز

μ_r : ثابت السماحية المغناطيسية العقدي (relative permeability).

ϵ_r : ثابت العازلية الكهربائي العقدي (relative permittivity).

Γ : معامل الانعكاس (reflection coefficient).

T : معامل الانتشار (transmission coefficient).

Z_r : الممانعة النسبية (relative impedance).

$r_{outer\ conductor}$: نصف قطر الناقل الخارجي.

$r_{inner\ conductor}$: نصف قطر الناقل الداخلي.

β : ثابت الانتشار في المادة.

d_1 : البعد بين نقطتي إزاحة الصفحة المرجعية باتجاه المنفذ الأول.

d_2 : البعد بين نقطتي إزاحة الصفحة المرجعية باتجاه المنفذ الثاني.

L_{sample} : طول عينة الاختبار

θ : زاوية معامل الانتشار.

θ_2 : الزاوية المحصورة بين محور الخلية والمحول المخروطي الخارجي.

θ_1 : الزاوية المحصورة بين محور الخلية والمحول المخروطي الداخلي.

$R_{1,connector}$: القطر الداخلي لمنفذ الدخل.

$R_{2,connector}$: القطر الخارجي لمنفذ الدخل.

$R_{1,tunnel}$: القطر الداخلي للناقل الداخلي (النفق).

$R_{2,tunnel}$: القطر الخارجي للناقل الداخلي (النفق).

$L_{adapter}$: طول الموقف المخروطي.

L_{tunnel} : طول النفق.

$Z_{con.air2}$: الممانعة المميزة للمحول المخروطي الهوائي لخلية CHA الهجينة.

$Z_{con.PTFE2}$: الممانعة المميزة للمحول المخروطي التفلوني لخلية CHA الهجينة.

$L_{conical}$: طول المخروط الداخلي.

مقدمة عامة

يُعدّ التطور العلمي حجر الأساس في تميّز الشعوب وتقدّمها، إذ يشكّل العلم الركيزة التي تقوم عليها نهضة الأمم في مختلف المجالات. ومن بين أهم فروع هذا التطور، يبرز علم المواد بوصفه ميداناً أساسياً يربط بين الفيزياء والهندسة والكيمياء في سبيل فهم سلوك المادة وتطوير خصائصها لتلبية متطلبات التطبيقات الحديثة. فقد باتت دراسة الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد من أهم محاور البحث في العقود الأخيرة، نظرًا لدورها المحوري في تحديد كيفية تفاعل المواد مع الأمواج الكهرومغناطيسية المارة خلالها، وهو ما يمثل الأساس لتصميم مواد وتقنيات متقدمة في مجالات الاتصالات، والرادار، والأجهزة الإلكترونية الدقيقة، والأنظمة الطبية.

تكتسب دراسة الخصائص الكهرومغناطيسية – والمتمثلة بثابتي العازلية الكهربائية والسماحية المغناطيسية – أهمية متزايدة نظرًا لارتباطها المباشر بقدرة المادة على امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية أو عكسها أو تمريرها، وهو ما يحدّد كفاءتها في البيئات المختلفة. ومن هذا المنطلق، يُعدّ قياس هذه الخصائص بدقة عبر مجال ترددي واسع ضرورةً علمية وتطبيقية على حد سواء، خصوصًا في ظل التوجه العالمي نحو تطوير مواد مركّبة ذكية وأنظمة اتصالات متقدمة تعمل في النطاقات المايكروية وما بعدها.

تسعى هذه الدراسة إلى تقديم مقارنة علمية شاملة لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد الصلبة المتماثلة المناحي ضمن مجال الأمواج المايكروية، وذلك من خلال تطوير وتحليل خلايا القياس المحورية (coaxial measurement cells) المستخدمة في تحديد ثابتي العازلية الكهربائية والسماحية المغناطيسية. إذ يركّز هذا العمل على دراسة إمكانية زيادة المجال الترددي لخلية القياس عبر تحسين تصميمها الهندسي وإدخال تعديلات مدروسة على المكونات الانتقالية بين خطوط النقل والعينة قيد الاختبار، بما يسهم في تقليل معامل الانعكاس وتحقيق أفضل تطابق في الممانعة المميزة ضمن الخلية، وبالتالي رفع كفاءة القياس ودقته.

تتبع أهمية هذا البحث من الحاجة المستمرة إلى توسيع النطاق الترددي لأجهزة القياس الكهرومغناطيسية بما يتوافق مع متطلبات التطبيقات الحديثة، إذ تُستخدم هذه القياسات في توصيف المواد الماصة، وتصميم الهوائيات عالية الكفاءة، وتطوير أغلفة الحماية الكهرومغناطيسية، بالإضافة إلى تطبيقات حيوية مثل توصيف الأنسجة والخلايا البيولوجية، ولا سيما في مجالات الكشف الطبي غير الغازي.

تتناول الدراسة المرجعية في هذا البحث استعراضًا تحليليًا لأهم الأبحاث والتقنيات الحديثة في مجال قياس الخصائص الكهرومغناطيسية، مع التركيز على التطورات التي طرأت على خلايا القياس المحورية وفق المعايير العالمية مثل المعيار

ASTM D4935 وطرائق تحسين أدائها الترددي، بالإضافة إلى عرضٍ لأهم الخلايا التي اعتمدت انتقالات مخروطية مختلفة أو مواد عازلة متنوّعة لتحسين خصائص التوافق الكهرومغناطيسي وتقليل التوهين.

أما في الإطار النظري، فتقدّم الدراسة الأسس العلمية التي تقوم عليها خطوط النقل المحورية وآليات انتقال الموجات الكهرومغناطيسية ضمنها، كما تُعالج المفاهيم الرياضية والفيزيائية المرتبطة بالعازلية والسماحية وتأثيرهما في استجابة المادة للإشعاع الكهرومغناطيسي.

في فصل النمذجة والمحاكاة، يتم توظيف برمجيات متقدمة مثل برنامج CST Studio Suite لنمذجة الخلايا المحورية المختلفة ومحاكاة أدائها ضمن نطاق ترددي واسع، بهدف تحليل انعكاس الأمواج وسلوك الممانعة المميزة، ومن ثمّ مقارنة نتائج النماذج المختلفة لاستخلاص الخلية المثلى من حيث الكفاءة الترددية وانخفاض الفقد. كما يتم عرض نتائج القياسات والتحليلات العددية التي توضح تطور أداء الخلايا المقترحة مقارنةً بالخلايا التقليدية.

وفي ختام البحث، تُقدّم خلاصة النتائج التي تم التوصل إليها، مبيّنةً مدى نجاح التصميمات الجديدة في زيادة المجال الترددي وتحسين دقة القياس، إضافةً إلى اقتراح آفاق مستقبلية لتطوير خلايا القياس من حيث المواد المستخدمة، وأشكال الانتقال، والتقنيات المساندة في المعايرة والاستخلاص العددي للخصائص الكهرومغناطيسية.

وبذلك يهدف هذا البحث إلى الإسهام في تطوير أدوات القياس الكهرومغناطيسي على المستويين النظري والتطبيقي، بما يعزز من قدرة الباحثين والمهندسين على توصيف المواد بدقة أعلى، ويفتح المجال أمام تطبيقات متقدمة في الاتصالات الراديوية والنقالة، والأنظمة المايكروية، وعلوم المواد الحديثة.

الفصل الأول

الدراسة المرجعية

1.1 مقدمة

شهد العقدان المنصرمان تطورًا متسارعًا وملحًا في مجال الاتصالات، بشقيها الأرضي والفضائي، بالتزامن مع تعقد وتنوع أدوات وتقنيات الحرب الإلكترونية.

هذا التطور الهائل، وما رافقه من انتشار غير مسبوق للأجهزة والأنظمة الكهرومغناطيسية التي تعمل على نطاقات ترددية متعددة، أدى إلى تصاعد الحاجة العلمية والتطبيقية - بشكل حاسم - إلى قياس دقيق وموثوق للخصائص الكهرومغناطيسية الأساسية للمواد المختلفة.

تشمل هذه الخصائص، على وجه التحديد، السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية ومعامل الفقد وذلك عبر طيف ترددي واسع يغطي من الترددات المنخفضة جدًا وحتى نطاق الترددات العالية المليمترية.

تكمن الأهمية المحورية لهذه القياسات في قدرتها على تحديد السلوك التفاعلي للمادة مع الحقول الكهرومغناطيسية الواردة إليها، فهي تتيح التنبؤ بامتصاص المادة للطاقة الكهرومغناطيسية، وانعكاسها، وانتشار الموجات عبر بنيتها، وتشتتها. يعد هذا الفهم العميق شرطًا أساسيًا لا غنى عنه لتحقيق الاستثمار الأمثل للمواد في بيئات عملها التصميمية، سواء في تطبيقات التخفي الراداري أو تصميم هوائيات عالية الكفاءة، أو تطوير أغلفة واقية فعالة ضد التشويش الكهرومغناطيسي (EMC) والمادة المصنعة للركائز Substrates، أو تحسين أداء أجهزة الاستشعار عن بعد، لذلك استجابةً لهذه المتطلبات المتزايدة في التعقيد والدقة، شهد مجال قياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد تطورًا منهجيًا مكثفًا، حيث بُدلت جهود بحثية كبيرة لتطوير مجموعة واسعة من منهجيات القياس، تختلف هذه المنهجيات وتتمايز بشكل جوهري بناءً على عدة عوامل تصميمية حاسمة:

(1) طبيعة المادة تحت الاختبار (MUT (Material Under Test).

(2) البيئة القياسية: يمثل هذا العامل تحديًا منهجيًا بالغ الأهمية بسبب الإشارات المنعكسة وإشارات الضجيج من الوسط المحيط والتي تؤثر على عملية القياس، تنقسم البيئات التي يتم القياس بها إلى:

• البيئات المغلقة مثل التجاويف الطنينية Resonant Cavities أو خطوط النقل Transmission Lines.

توفر بيئة القياس المغلقة عزلاً جيداً عن التداخلات الكهرومغناطيسية الخارجية EMC وتسمح بدقة قياس عالية جداً، خاصة عند ترددات محددة أو نطاقات ضيقة. إلا أنها غالباً ما تتطلب تحضيراً دقيقاً للعينة بأبعاد هندسية محددة وقد لا تمثل أداء المادة في ظروف انتشار حر.

• البيئات المفتوحة: حيث تُعرض العينة لمجال كهرومغناطيسي في الفضاء الحر.

تعتبر هذه الطرق أكثر ملاءمة لقياس المواد في ظروف مشابهة لتطبيقاتها العملية ومع ذلك، فهي أكثر عرضة لتأثير التداخل البيئي وتتطلب معايرة دقيقة ومعالجة متقدمة للإشارات لاستخلاص الخصائص بدقة مقبولة.

(3) النطاق الترددي المطلوب الذي يعتبر مهم لمعرفة التطبيقات التي تستخدم بها العينة حيث انه هناك حاجة دائمة لزيادة المجال الترددي لأجهزة القياس لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية في نطاقات الترددية مختلفة.

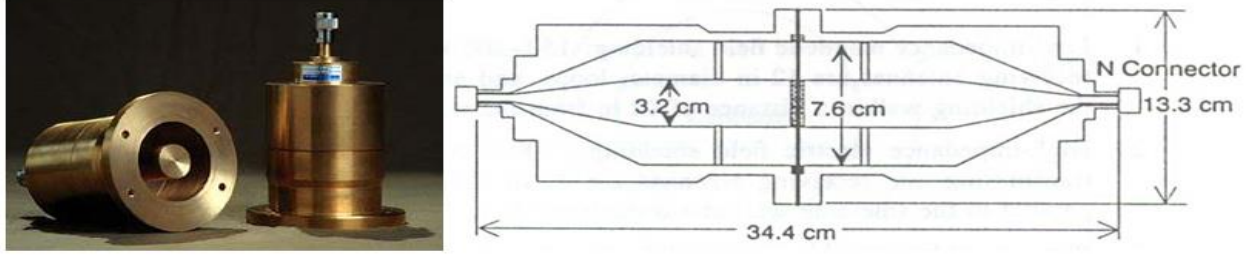
(4) مستوى الدقة والموثوقية المطلوبين حيث ان منهجيات القياس تتفاوت في الحدود النظرية لدقتها والارتياح المصاحب للنتائج.

بناءً على هذه الاعتبارات المتشابهة والمعقدة السابقة، فإن اختيار منهجية القياس المثلى لمادة معينة في سياق تطبيقي محدد يظل عملية هندسية دقيقة. تتطلب هذه العملية الموازنة بين متطلبات الدقة، وطبيعة المادة وبيئتها التشغيلية، والنطاق الترددي، والموارد المتاحة (معدات، وقت، تكلفة).

يشكل التقدم المستمر في تطوير وتنقيح هذه التقنيات، جنباً إلى جنب مع معايير القياس الموحدة - مثل معايير (ASTM Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding) - العمود الفقري لتطوير مواد جديدة متقدمة وتصميم أنظمة كهرومغناطيسية عالية الأداء تلي التحديات المتزايدة في عصر الاتصالات، إن الفقرة التالية (الدراسات المرجعية) تقوم بذكر الدراسات السابقة التي ساهمت بهذا التطور مثل خلية بارك وخلايا القياس 13mm والانتقال المخروطي في خط النقل للحصول على أقل انعكاس ممكن في الإشارة.

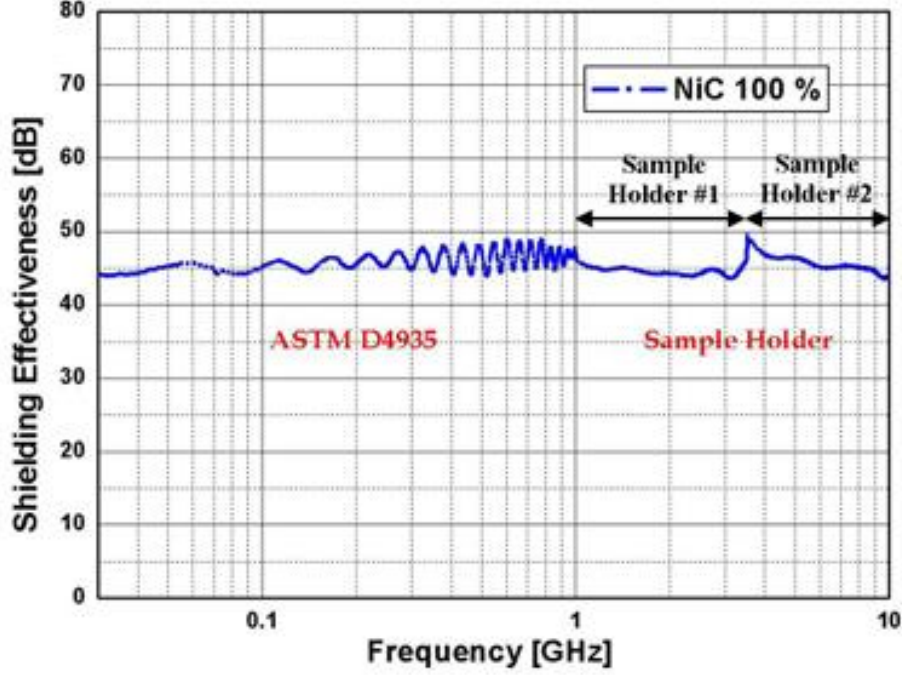
2.1 الدراسات المرجعية

تتنوع طرق قياس الخصائص الكهرومغناطيسية سواء في البيئات المغلقة أو المفتوحة. أجرى الباحثون في المقال [1] قياساتهم ضمن منظومة قياس العزل الفعال للمواد بما يتوافق مع المعيار ASTM D4935 (الشكل 1)، كما قاموا بتطوير خلية القياس من خلال تصميم حامل عينة جديدين.



الشكل 1- خلية القياس حسب المعيار ASTM D4935.

من خلال تعديل فتحة القياس وحامل العينة، تمكن الباحثون في [1] من تحسين توافق الممانعات المميزة عند مستويات الانتقال داخل الخلية. أسهم ذلك في تقليل الانعكاسات غير المرغوبة أثناء القياس، وبالتالي انخفضت قيمة معامل الانعكاس إلى ما دون -20 dB وأصبح بالإمكان قراءة العزل الفعال للمواد حتى تردد 10 GHz بدل أن كانت 1 GHz في المعيار ASTM D4935 كما هو موضح في الشكل 2. تظهر هذه الدراسة أهمية تخفيض قيمة معامل الانعكاس لزيادة المجال الترددي للقياس.



الشكل 2- قياس العزل الفعال للنيكل NiC بواسطة خلية المعيار ASTM D4935 والخلية المطورة لحاملي عينة جديدين.

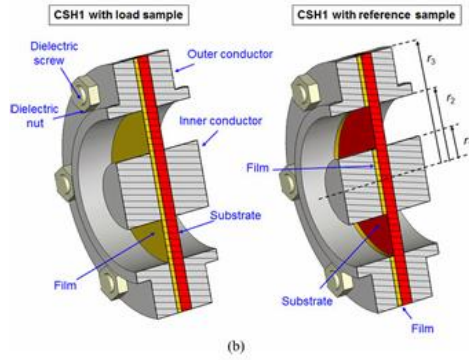
استكمالاً للعمل السابق في [1] أعتد الباحثون في المقال [2] ثلاث نُسخ مختلفة من حوامل العينات المحورية CSHs (Coaxial Sample Holders) لقياس شدة العزل الكهرومغناطيسي (SE (shielding effectiveness)) لأغشية معدنية رقيقة، وقد وضعت هذه الاغشية إما فوق ركائز غير موصلة أو مدججة بين طبقتين عازلتين، وفق ما هو موضح في الشكلين 3 و 4. تم تصنيف هذه الحوامل بحسب نطاق الترددات القابل للقياس؛ يعمل النموذج الأول CSH1 حتى تردد 1.5 GHz، بينما يمتد نطاق النموذج الثاني CSH2 حتى 5 GHz، ويُغطي النموذج الثالث CSH3 ترددات تصل حتى 15 GHz. قام الباحثون في إطار تطوير تقنيات القياس بابتكار نوعين جديدين من خلايا القياس مبنيين على المعيار القياسي ASTM D4935، يتميز الأول بموصل داخلي متقطع، في حين يتسم الثاني بموصل داخلي مستمر، بما يسمح بزيادة المجال الترددي وزيادة دقة القياسات الكهرومغناطيسية للمواد الرقيقة.



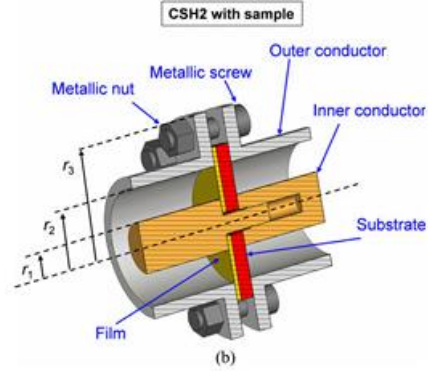
(a)



(a)

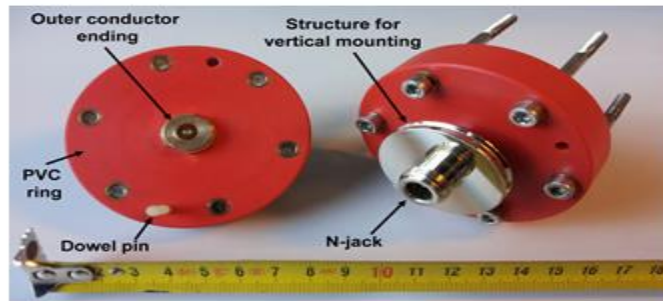


(b)

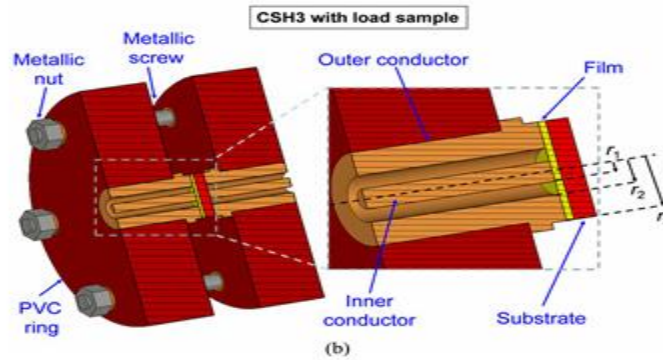


(b)

الشكل 3- على اليسار (a) حامل العينة الأول CSH1 وعلى اليمين (a) حامل العينة الثاني CSH2. (b) مقطع عرضي لحامل العينة الأول CSH1 وعلى اليمين (a) حامل العينة الثاني CSH2. (b) مقطع عرضي لحامل العينة الثاني CSH2.



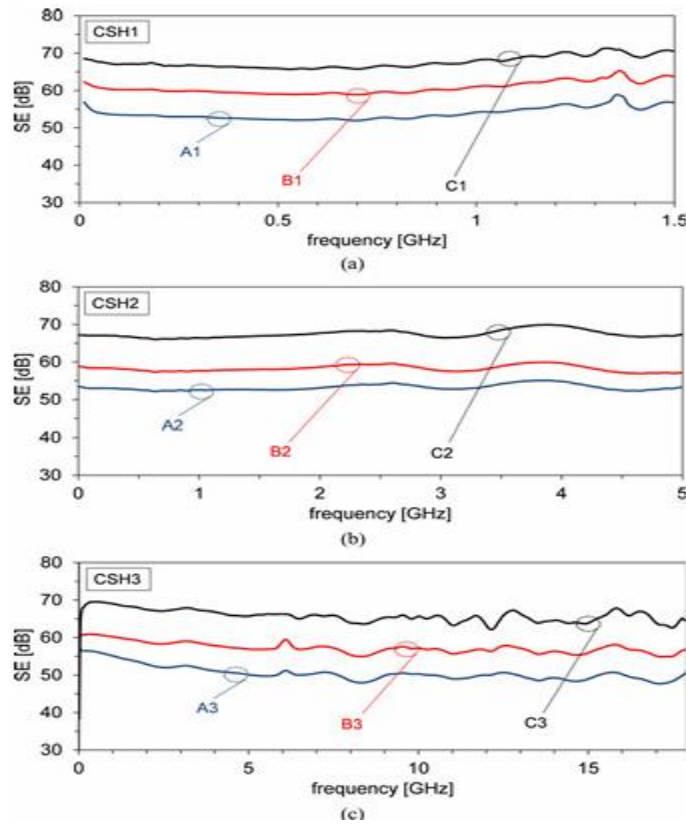
(a)



(b)

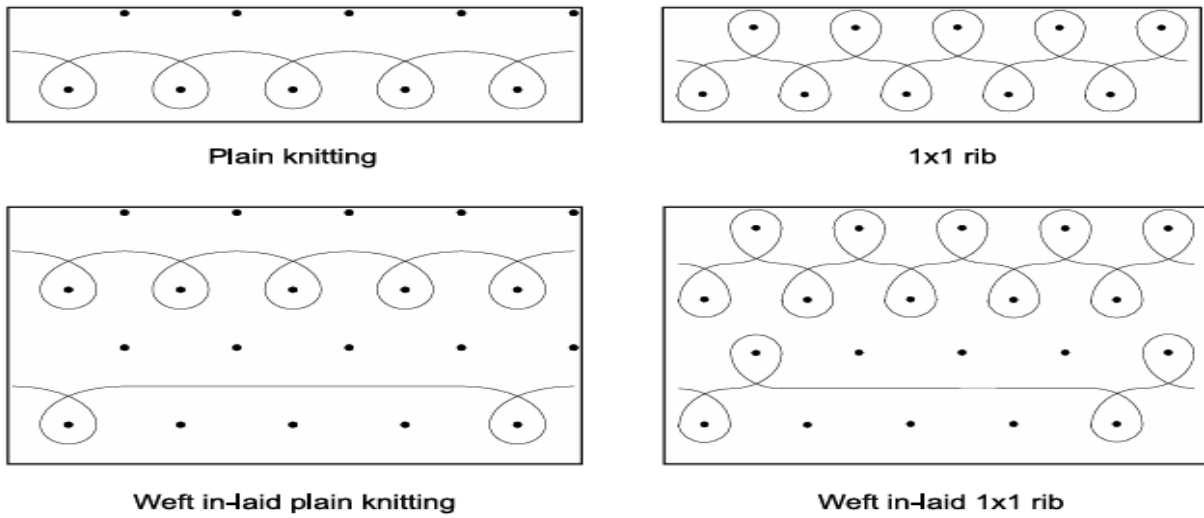
الشكل 4- في الأعلى (a) حامل العينة الثالث CSH3 (b) مقطع عرضي لحامل العينة الثالث CSH3.

اعتمد الباحثون في الدراسة نماذج دارات مكافئة ذات درجة تعقيد منخفضة لتحليل الأداء الكهرومغناطيسي النظري للحوامل المحورية المستخدمة في قياس شدة العزل الفعال للمواد الرقيقة، وقد تم دعم هذا التحليل بمحاكاة عددية متقدمة وقياسات تجريبية أجريت على أغشية نحاسية رقيقة ذات سماكات متفاوتة، بهدف التحقق من صحة النماذج النظرية المستخدمة. وفقاً للنتائج الموضحة في الشكل 5، تم اختبار ثلاث عينات مختلفة - المشار إليها بالحروف A و B و C باستخدام الحوامل الثلاثة المطورة، حيث أظهرت التجارب أن فعالية القياس تكون محدودة في النطاقات الترددية المنخفضة، مما يشير إلى ضرورة تحسين التصميم لزيادة كفاءة القياس ضمن هذا النطاق المطلوب.



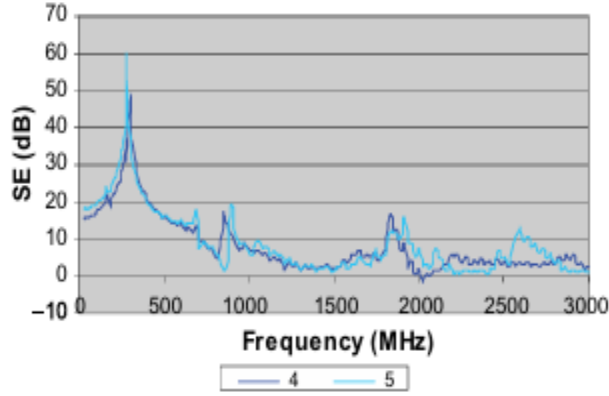
شكل 5- العزل الفعال SE للعينات A، B، C ضمن حوامل العينة الثلاث.

تختلف الخصائص الكهربائية للمواد باختلاف شكل عينة الاختبار، أجريت دراسة تجريبية في المقال [3] لتقييم فعالية العزل الكهرومغناطيسي لأربعة أشكال من الاقمشة، تم حياكتها باستخدام خيوط مركبة من النحاس والقطن، وذلك باستخدام آلة حياكة من نوع G 7 تضمنت الحياكة العادية (Plain Knitting)، والحياكة العادية المدخلة أفقيًا Weft In-Laid Plain Knitting، وحياكة الضلع 1×1 (1X1 Rib)، وحياكة الضلع 1×1 المدخلة أفقيًا Weft In-Laid 1X1 Rib، يوضح الشكل 6 الاشكال الأربعة للحياكة، وقد تم اعتماد جهاز قياس محوري (Coaxial Test Fixture) متوافق مع معيار ASTM D4935 لتنفيذ القياسات ضمن المجال الترددي المطلوب، بهدف تحليل تأثير تغيير شكل الاقمشة ومكوناتها على مستوى الحماية الكهرومغناطيسية.



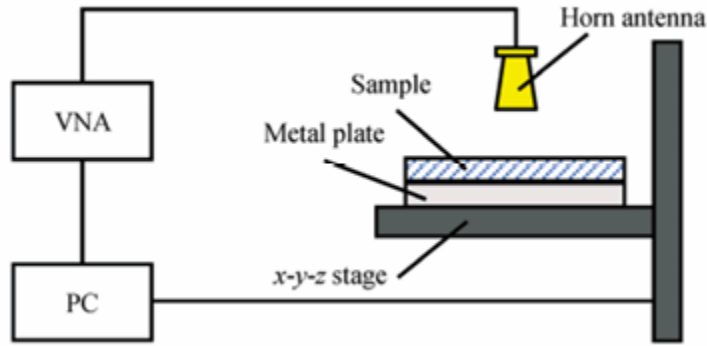
الشكل 6- الاشكال الأربعة للحياكة المراد اجراء الاختبار عليها (plain knitting، weft in-laid plain knitting، 1X1 rib، weft in-laid 1X1 rib).

وجد الباحثون أن الفراغات في الحياكة وكثافة المادة العازلة بالإضافة لطريقة الحياكة تساهم في تغيير العزل الكهرومغناطيسي الفعال بالإضافة لذلك وجدوا ان العزل يكون أفضل عند الترددات المنخفضة اما عند الترددات المرتفعة فان شكل الحياكة لا يؤثر على قيمة العزل الفعال نفس الامر بالنسبة لكثافة الغرز، الشكل 7.



الشكل 7-العزل الفعال للعينة 4 و 5.

ذكرت مقدمة الفصل أنواع وطرق القياس، يتحدث المقال [4] عن طريقة الفضاء الحر لقياس ثابت العازلية الكهربائية العنقدي للمواد باستخدام إجرائيتين لتقليل خطأ القياس، الشكل 8.



الشكل 8-طريقة الفضاء الحر لقياس ثابت العزلية الكهربائي العنقدي للمواد.

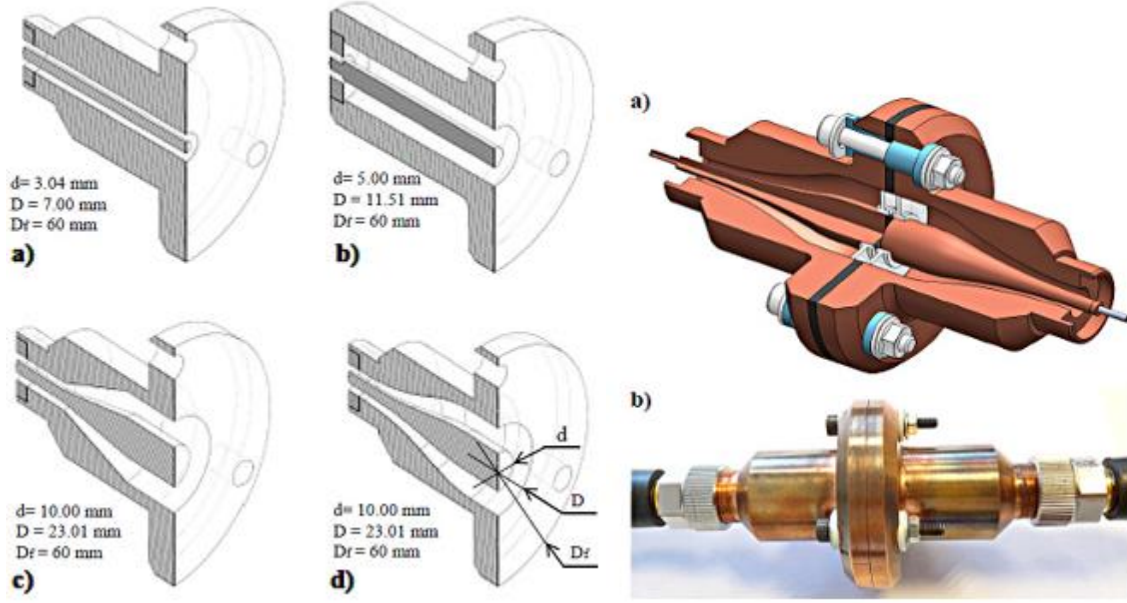
الإجرائية الأولى هي تقليل الخطأ بتقليل الانعكاسات من الاجسام المحيطة بعملية القياس وذلك عن طريق اخذ عدة قياسات من عدة مسافات للعينة عن جهاز القياس وبأخذ المتوسط الحساب تم الحصول على قيمة تقريبية.

الإجرائية الثانية هي اخذ القياسات لعدة مواقع للسطح المرجعي بالنسبة لعينة الاختبار واستخدام تحليل رياضي لحساب ثابت العازلية للمادة تحت الاختبار.

إن تطوير الخوارزميات الحسابية لحساب الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد ساعد في الغاء الانعكاسات غير المرغوبة وتحسين دقة القياس.

تم تطبيق الخوارزمية المطورة لحساب ثابت العازلية الكهربائي لمادة التفلون PTFE ومادة POM (polyoxymethylene).

طور الباحثون في المقال [5] خلية قياس جديدة وفق المعيار ASTM D4935 من اجل الحصول على أداء أفضل لقياس العزل الفعال SE للمواد البوليميرية حيث كانت الفكرة هي تعديل شكل الانتقال من الناقل المحوري الصغير الى الكبير الى شكل مخروطي سلس، الشكل 9.

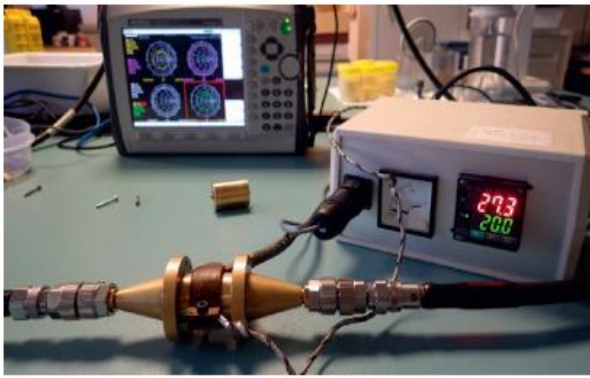


الشكل 9-مراحل تطوير خلية قياس العزل الفعال SE حسب المعيار ASTM D4935.

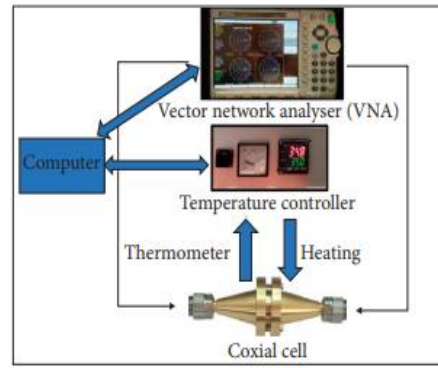
كانت عملية تطوير المحول المخروطي على أربعة مراحل الشكل 9، حيث تم الحصول على أقل VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ومقارنته بالمرحلة السابقة الثلاث حيث وجد الباحثون أن VSWR كان أقل في التصميم الرابع أثبتوا بذلك ان الانتقال السلس في الابعاد الغير متقطعة أدى الى انعكاس اقل في الإشارة وبالتالي زيادة دقة القراءة.

تتطلب بعض التطبيقات معرفة سلوك الخصائص الكهرومغناطيسية للمادة مع تغير درجة حرارة على سبيل المثال المواد الموجودة بالقرب من المحركات كمحرك الطائرة حيث ترتفع درجة الحرارة بشكل كبير. صممت منهجيات قياس لتطبيقات مماثلة تأخذ بعين الاعتبار تغير درجات حرارة المادة أثناء القياس.

اقترح المقال [6] آلية جديدة لقياس الخصائص عند درجات حرارة مختلفة، باستخدام خلية قياس محورية (transmission line fixture) عريضة المجال الترددي، وحساس حرارة متصل بوحدة تكييف مركزية للتحكم بدرجة حرارة الغرفة، الشكل 10.



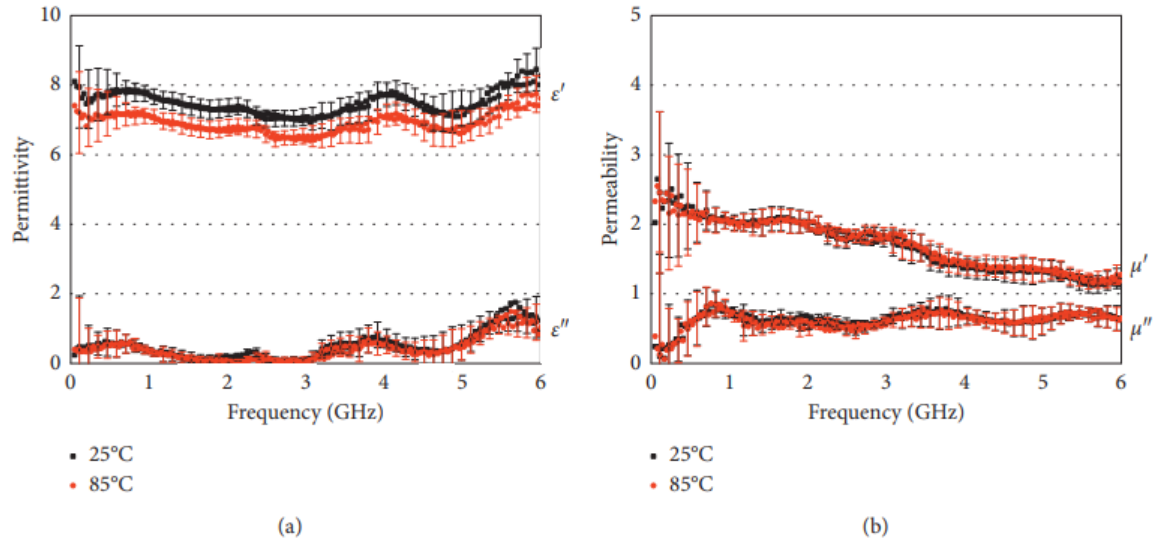
(a)



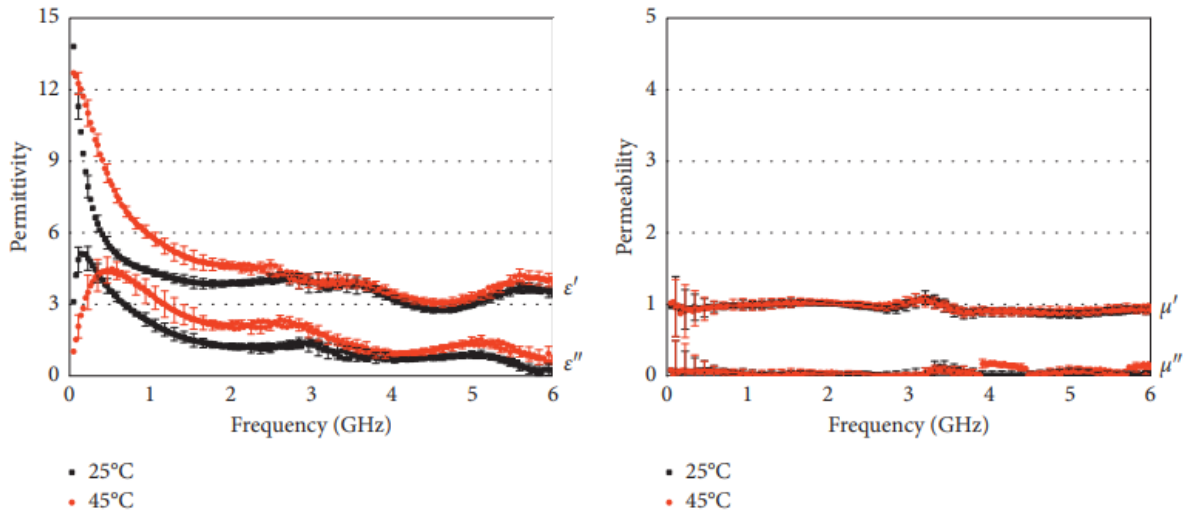
(b)

الشكل 10- خلية محورية لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية مع حساس حراري للتحكم بدرجة حرارة الغرفة.

قدمت هذه المقالة دراسة حول قياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد عند درجات حرارة 25 و 45 و 80 درجة، حيث تظهر النتائج تغير بقيمة ثابت العازلية باختلاف درجة الحرارة الشكل 11 و 12.



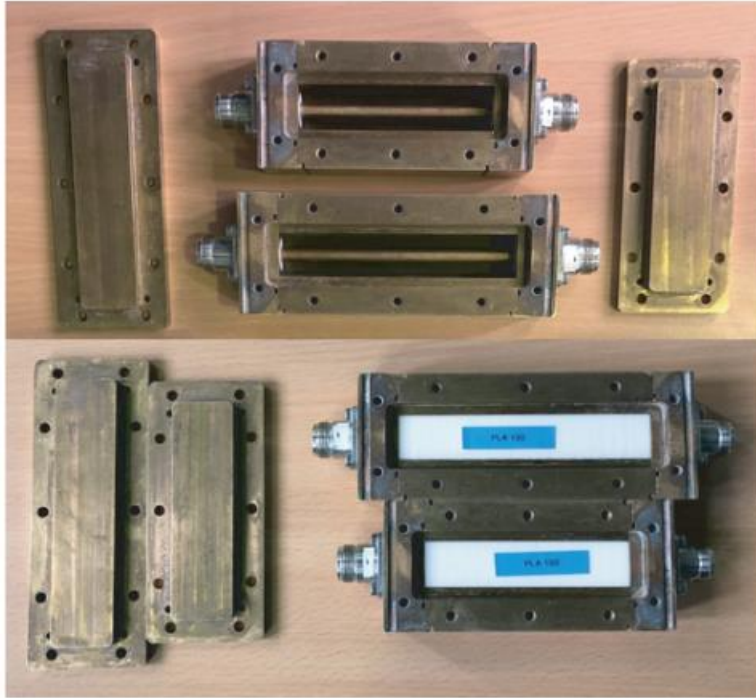
الشكل 11- تغير المقادير العقدية لثابت العازلية الكهربائي العقدي والسماحية المغناطيسي عند درجات حرارة 25 و 85 حتى 6GHz.



الشكل 12- تغير ثابت العازلية الكهربائي العقدي والسماحية المغناطيسي عند درجة حرارة 25 و 45 وعلى مجال ترددي عريض.

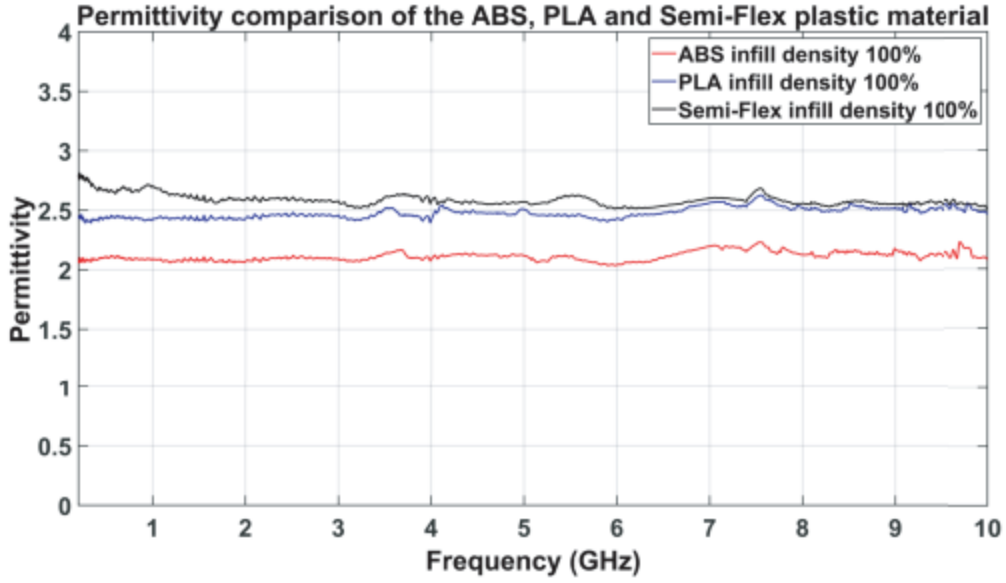
تظهر النتائج ان ثابت العازلية الكهربائي لا يختلف كثيرا عند درجات حرارة متوسطة 25 و 45 درجة
 أما عند درجات حرارة كبيرة فيتأثر بشكل كبير حيث تنخفض قيمته.

إن قيمة ثابت العازلية الكهربائية لا تتغير بتغير درجة الحرارة فقط، إنما تتغير أيضا بتغير كثافة المادة، استخدمت الخلية المحورية ذات المقطع المربع في المقال [7] ثم تم وضع العينات MUT في قوالب لدراسة تأثير تغير كثافة العينة على قياس خصائصها الكهرومغناطيسية، الشكل 13.

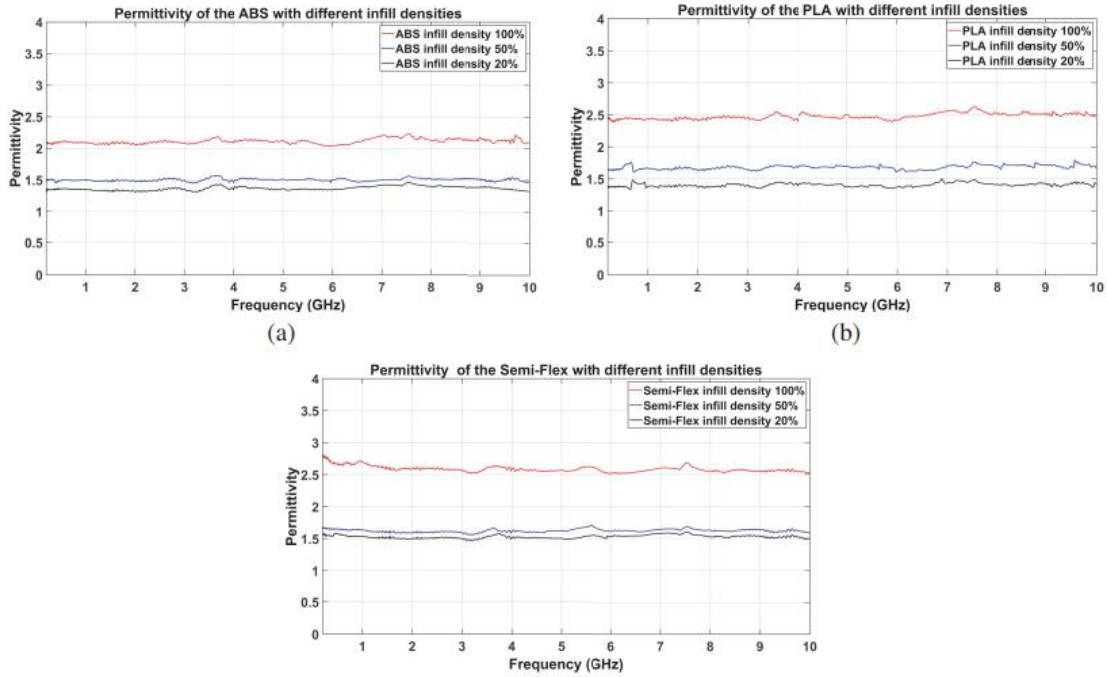


الشكل 13- خلية محورية ذات المقطع المستطيل لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية مع قوالب العينات MUT.

استعرض المقال قياس الخصائص الكهرومغناطيسية لعينات بكثافة 100% وبكثافات مختلفة أيضا باستخدام الخلية المحورية ذات المقطع المربع فكان هناك اختلاف بقراءة ثابت العازلية الكهربائي أي ان اختلاف كثافة المادة يعطينا ثابت عازلية كهربائي مختلف الشكل 14 و 15.

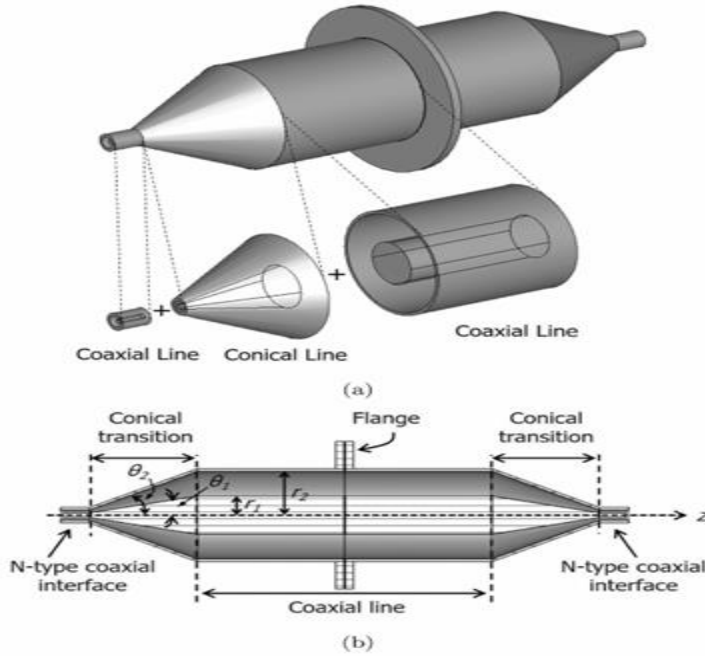


الشكل 14- قياس الخصائص الكهرومغناطيسية لعينات بكثافة 100% باستخدام الخلية المحورية ذات المقطع المربع.



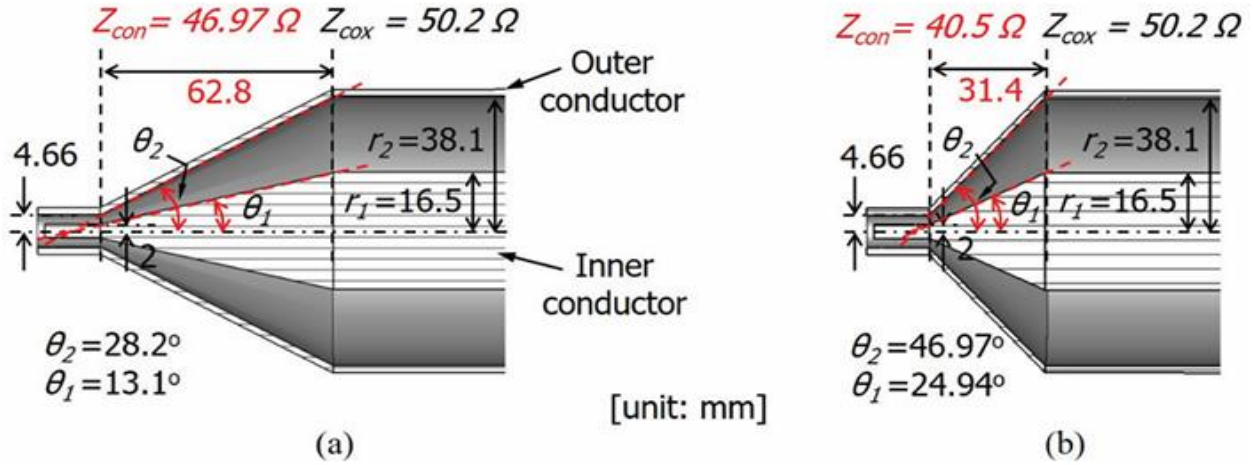
الشكل 15- نتائج قياس الخلية المحورية ذات المقطع المربع مع اختلاف كثافة المواد.

إن تصميم خلية القياس يلعب دوراً أساسياً في دقة القياس من خلال تقليل الانعكاسات (أي تقليل معامل الانعكاس)، قام بارك في المقال [8] بدراسة المحول المخروطي للمعيار Standard ASTM D4935 jig وتطويره وإنتاج نماذج جديدة عنه من أجل زيادة المجال الترددي لخلية القياس، الشكل 16.



الشكل 16- خلية معيارية قياسية لقياس العزل الكهروطيسي للمواد.

نمذج بارك المعيارين Normal and modified ASTM D4935 jigs أي المعيار الطبيعي والمعيار المعدل (حيث أنهما يختلفان بطول المحول المخروطي الذي يصل خطي النقل المحوريين الكبير والصغير مع بعضهما). الشكل 17 يبين المعيارين مع الأبعاد.

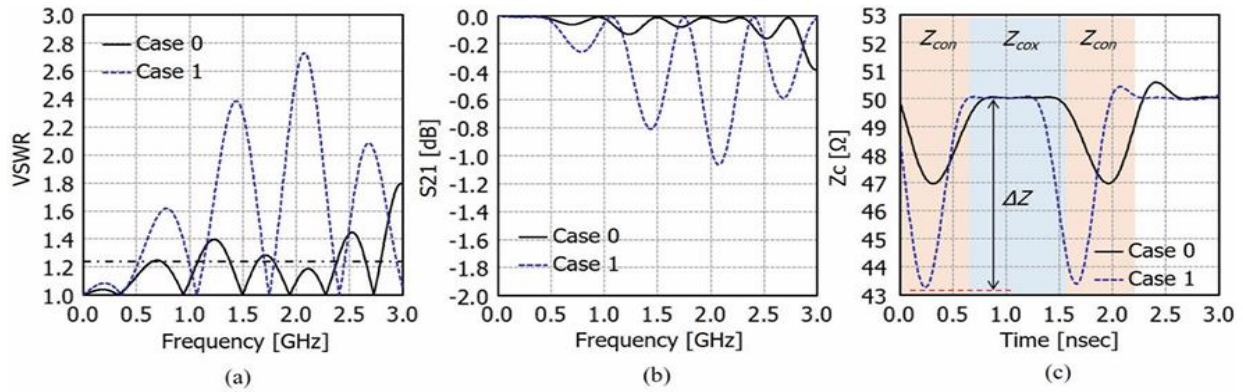


الشكل 17- المعيارين (a ASTM D4935 الطبيعي (b) المعيار المعدل .

فرض بارك ان المعيار الطبيعي يمثل الحالة 0 والمعيار المعدل يمثل الحالة 1.

إن قيمة الممانعة المميزة للمخروط في المعيار الطبيعي حالة 0 كانت 46.97 اوم وفي المعيار المعدل حالة 1 كانت 40.5 اوم.

أدى هذا الفرق في قيمة الممانعات في الحالتين الى فرق في قيمة VSWR وكانت النتيجة ان الحالة 0 كانت أفضل من حيث المجال الترددي (مجال ترددي اكبر) الشكل 18.



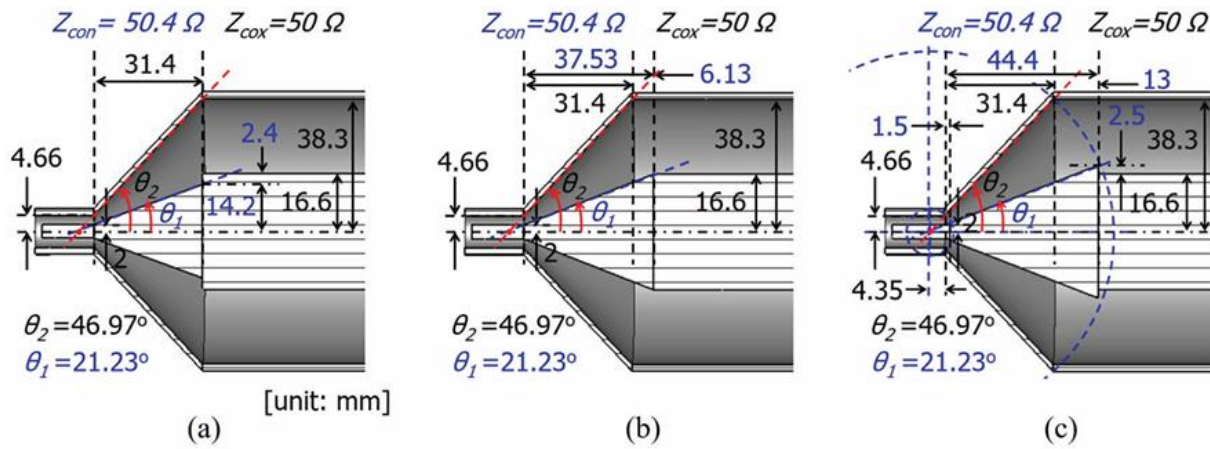
الشكل 18- VSWR، S21، Zc للحالتين 0 و1.

عدل بارك خلية المعيار المعدل (حالة 1) وذلك بتعديل زاوية المخروط الداخلي θ_1 الذي بدوره غير ممانعة المحول المخروطي من 40.5 اوم الى 50.4 اوم وقام بعدة تعديلات داخل المخروط من اجل زيادة المجال الترددي الشكل 19.

عدل بارك في الحالة 2 قطر قاعدة المخروط وذلك من اجل تعديل قيمة الممانعة المميزة للمخروط وأدى ذلك لتحسين المجال الترددي.

حافظ بارك في الحالة 3 على قيمة الزاوية $\theta_1 = 21.23^\circ$ وادخل قاعدة المخروط الى داخل النفق مع المحافظة على نصف القطر.

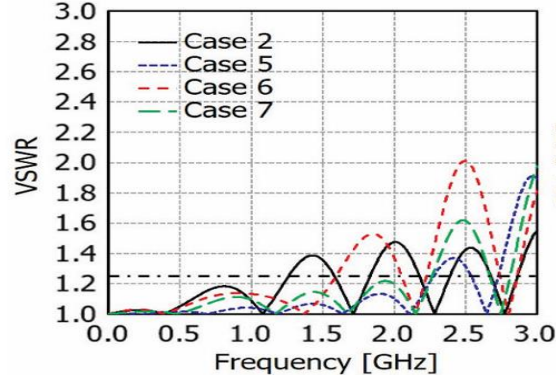
قام بارك في الحالة 4 بتعديل قطر قاعدة المخروط مع المحافظة على قيمة $\theta_1 = 21.23^\circ$.



الشكل 19- الحالات 2 و3 و4 والتي تمثل تعديلات بارك على المعيار المعدل.

الحالة 2 و3 كانتا متقاربتين حيث ان قيمة اعلى تردد لهما كانت (1.24GHz و 1.26GHz) في الحالة 4 كان هناك تحسن كبير في قيمة المجال الترددي الشكل 20.

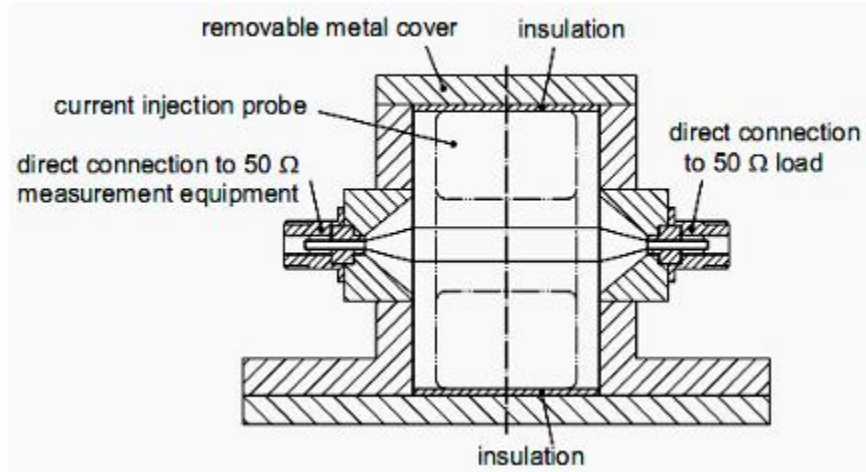
حصل بارك على أفضل نتيجة حالة 5، وذلك بتعديل فقط مسافة الانقطاع (إنقاص قيمة قطر قاعدة المخروط) الشكل 22.



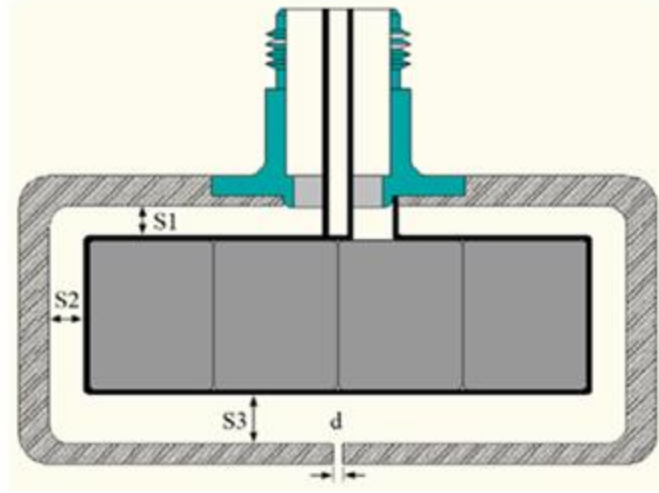
الشكل 22- VSWR للحالات 2، 5، 6، 7 لتعديلات بارك.

استنتج بارك أن تغيير ابعاد المحول المخروطي يغير من قيمة تردد العمل لخلية القياس، لكن هناك حالة أخرى لتغيير قيمة معامل الانعكاس والتي تحدث عنها الدكتور عيسى مشرقي في المقال [9] حين قام بتغيير العازل ضمن المحول المخروطي وكان المقال يتحدث عن تطوير جهاز حقن التيار الكلي (Bulk Current Injection) BCI المستخدم في قياسات

EMC (electromagnetic compatibility) نوع اختبار CS (conducted-susceptibility) الشكل 23 و 24.



الشكل 23 - مجس BCI مع علبه المعاييرة.



الشكل 24 - مجس BCI.

الفكرة من جهاز ال BCI هي حقن تيار ضجيج ضمن الاسلاك المراد اختبارها لمعرفة مدى تأثير الضجيج على الإشارة المرسله ضمن الاسلاك.

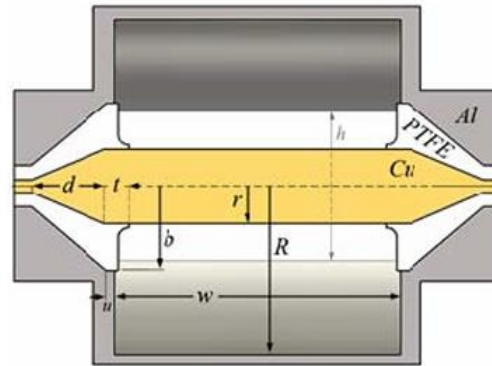
يتألف مجس BCI من منفذ من نوع N-Type وهيكلين معدنيين من الالمنيوم متصلين ببعضهما وبالجسم الخارجي للمنفذ. ويتكون أيضا من أربعة اطارات من مادة الفرايت او مادة WURTH (جرى اختبار تأثيرهما على النتيجة عند استبدالهما) وهذه الإطارات ملفوف عليها اسلاك الاختبار (لفتين) الشكل 25.

الناقل الداخلي للمنفذ متصل مع اسلاك الاختبار.



الشكل 25- أجزاء مجس BCI.

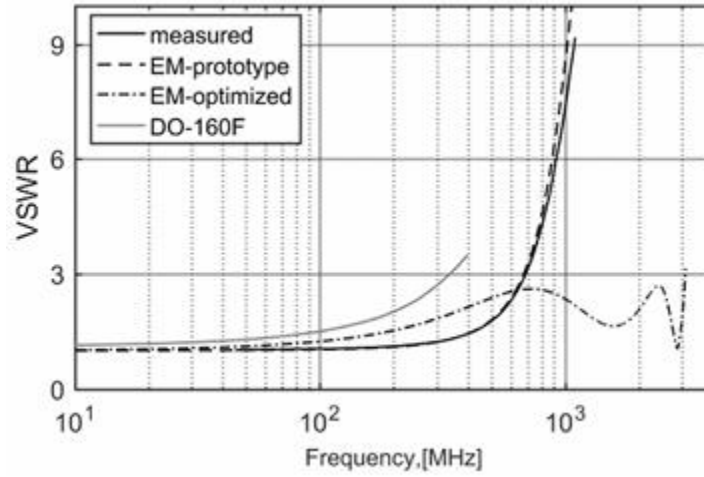
عدل الدكتور عيسى جهاز معايرة BCI أي jig للحصول على اقل انعكاس ممكن حيث قام بإدخال جزء من مادة التفلون الى داخل النفق لتحسين توافق الممانعات الشكل 26.



الشكل 26- تصميم jig مع توفيق الممانعات للدكتور عيسى مشرفي.

وكانت نتيجة التحسين الشكل 27.

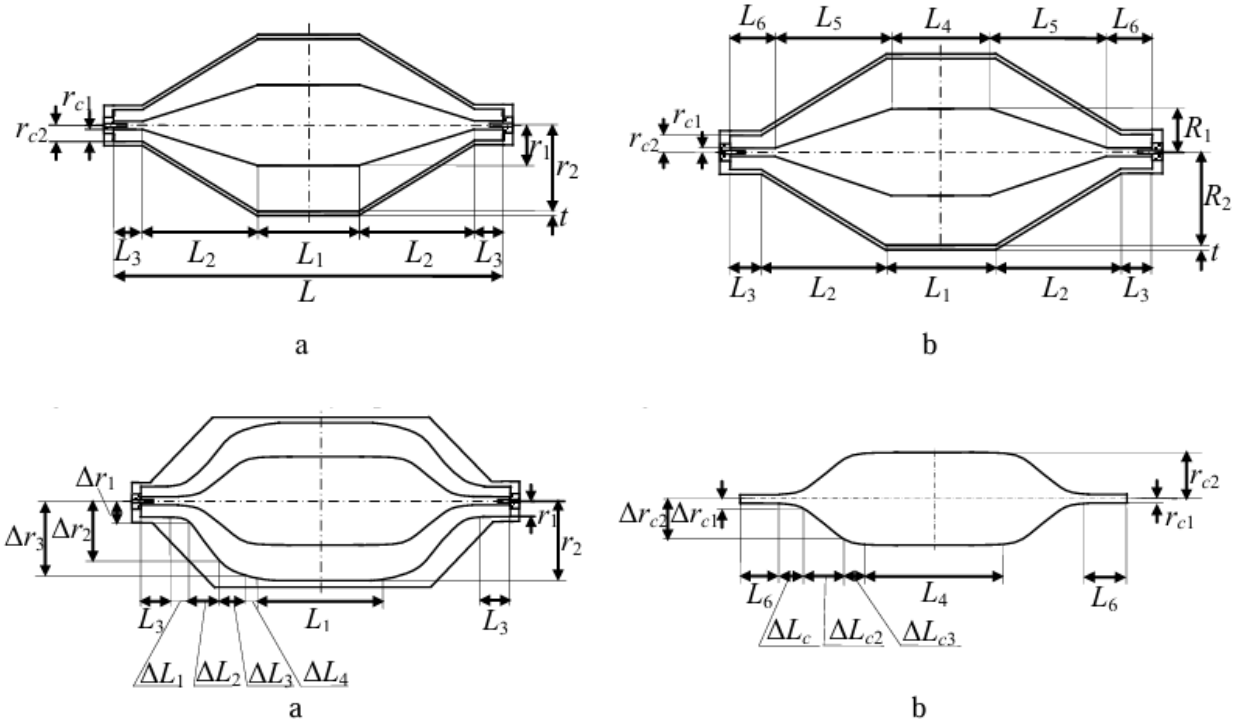
يمثل (الشكل 27) المقاس فيزيائيا بواسطة VNA (Vector Network Analyzer) و VSWR للتصميم ضمن محاكي CST (Computer Simulation Technology) قبل وبعد التحسين و VSWR المعياري حسب معيار DO-160F.



الشكل 27 - VSWR قبل وبعد التعديل على jig.

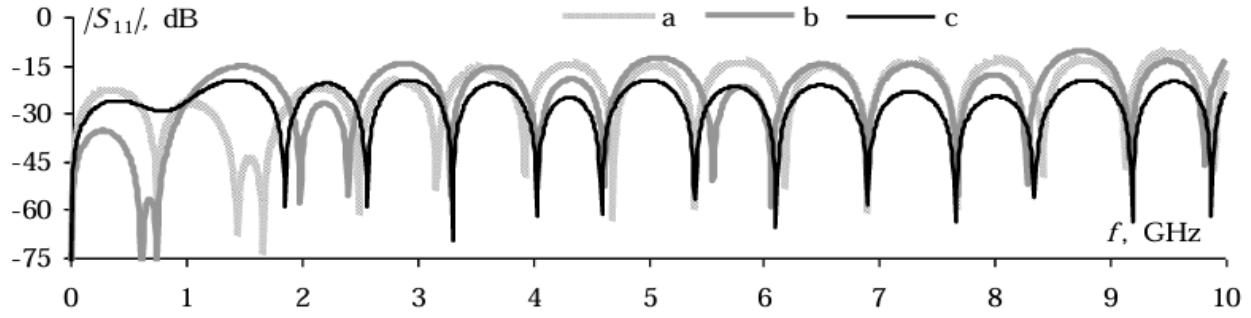
إن تغيير أبعاد خط خلية كما في بارك سابقا وإدخال مادة ضمن النفق كما في المقال [9] أدى الى تغيير معامل انعكاس الخلية. هناك حالة أخرى لزيادة المجال الترددي لخلايا القياس وهي تغيير مناطق الانقطاع في خطوط النقل وتغيير انسيابية شكل خط النقل الذي يساهم بشكل فعال بتغيير قيمة معامل الانعكاس والحصول على أداء أفضل لجهاز القياس، قام الباحثون في المقال [10] بتطوير خلية قياس العزل الفعال للمواد أي تحسين قيمة القراءة وذلك من خلال التعديل في المخروط ضمن المحول.

إن الخلية المطورة تعمل حتى تردد 10 GHz ومعامل انعكاس $S_{11} < -20$ dB، الشكل 28.



الشكل 28-مراحل تطوير خلية العزل الفعال SE.

أظهرت النتائج في النموذج المحسن للخلية انه عند الترددات المنخفضة الخلية تملك عدد أقل من ترددات الطنين وأظهرت أيضا تحسن في معامل عبور الإشارة، الشكل 29.



الشكل 29- s11 لخلايا القياس خلال مراحل التطوير.

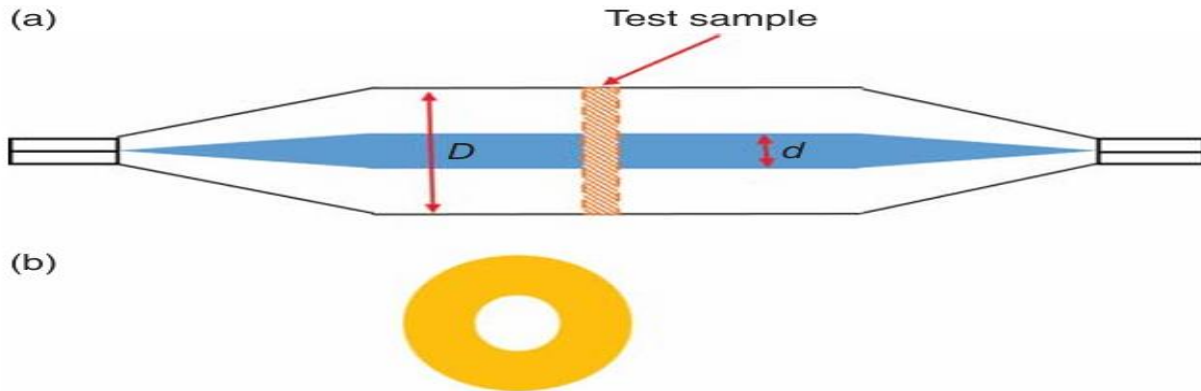
تحدث الباحثون في المقال [11] عن أنواع خلايا القياس وطرق القياس والمعايير العالمية المستخدمة في تصميم هذه الخلايا.

يوجد 6 أنواع من خلايا القياس المحورية Coaxial TEM Cell وهي:

(1) ASTM ES7-83 Method:

عبارة عن خط نقل محوري توضع عينة الاختبار في منتصفه شكلها حلقي دائري تستخدم عادة ضمن المجال الترددي من

1 MHz إلى 1.8 GHz، الشكل 30.

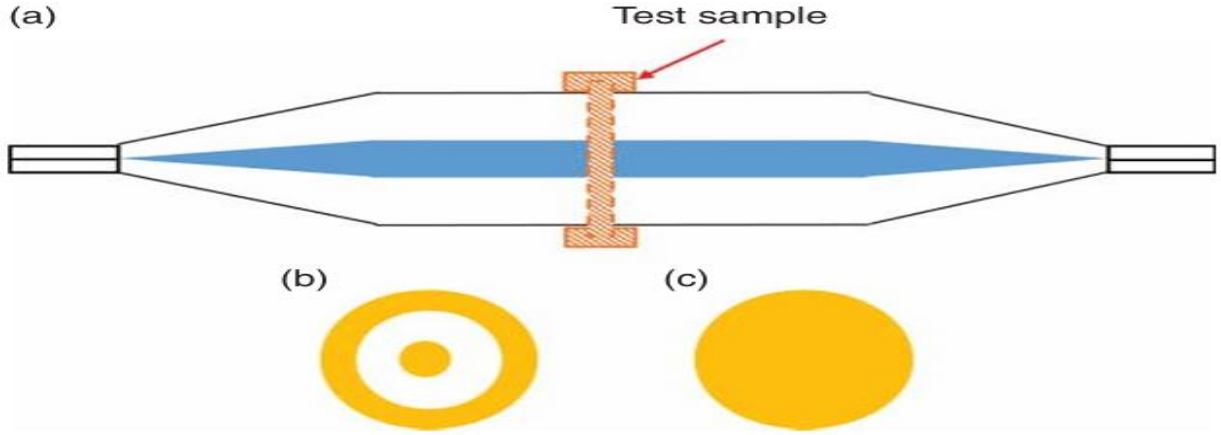


الشكل 30- خلية القياس المحورية ASTM ES7-83.

(2) ASTM D4935 Method:

عبارة عن خط نقل محوري نصف قطره الداخلي 33mm والخارجي 76 mm تستخدم لقياس الخصائص الكهرومغناطيسية

للعينات عند ترددات عالية ولها عينات الأولى عينة مرجعية والثانية عينة الاختبار وتكون عبارة عن رقاقة دائرية الشكل 31.

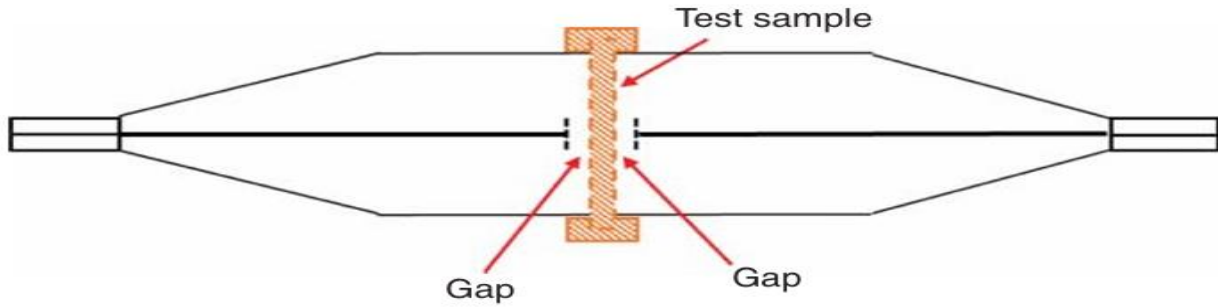


الشكل 31- خلية القياس المحورية ASTM D4935.

(3) TEM-t Cell Method :

تستخدم هذه الخلايا لقياس المواد المركبة الرقيقة ذات التوصيلية المنخفضة أو المتوسطة، وهي مكونة من مصفوفة عازلة محشوة بمحشوات موصلة أو مغطاة بطبقات أو أفلام موصلة.

تستخدم حتى التردد 12 GHz تتميز بوجود فراغات بين حامل العينة والناقل الداخلي للخلية ضمن النفق، الشكل 32.



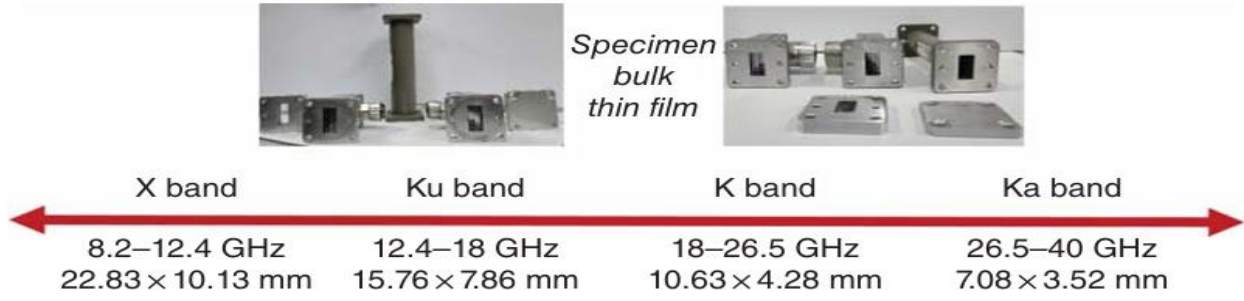
الشكل 32- خلية القياس المحورية TEM-t Cell.

(4) Dual TEM Cell Method

(5) Split TEM Cell

(6) Apertured TEM Cell in a Reverberating Chamber

ويوجد أيضا خلايا ذات دليل موجة مستطيل تتميز بقدرتها على القياس على ترددات عالية، الشكل 33.



الشكل 33- خلايا القياس المستطيلة.

قام الباحثون في المقال [12] بتصميم فنجان فاراداي السريع (FFC (Fast Faraday Cups).

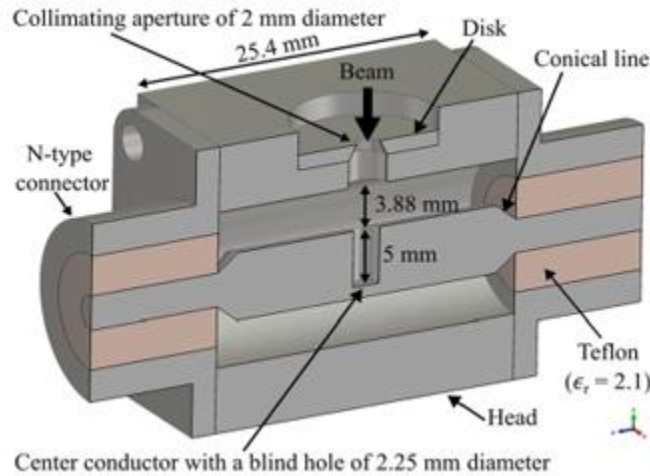
فنجان فاراداي السريع هو جهاز يستخدم لقياس خصائص الحزم المشحونة، مثل الإلكترونات أو البروتونات، خصوصًا في التطبيقات التي تتطلب دقة زمنية عالية.

يقوم الفنجان بالتقاط الجسيمات المشحونة وتحويلها إلى تيار كهربائي يمكن قياسه بدقة.

قام الباحثين في المقال [12] بتطوير FFC إلى فنجان فاراداي السريع المحوري المرتبط شعاعياً

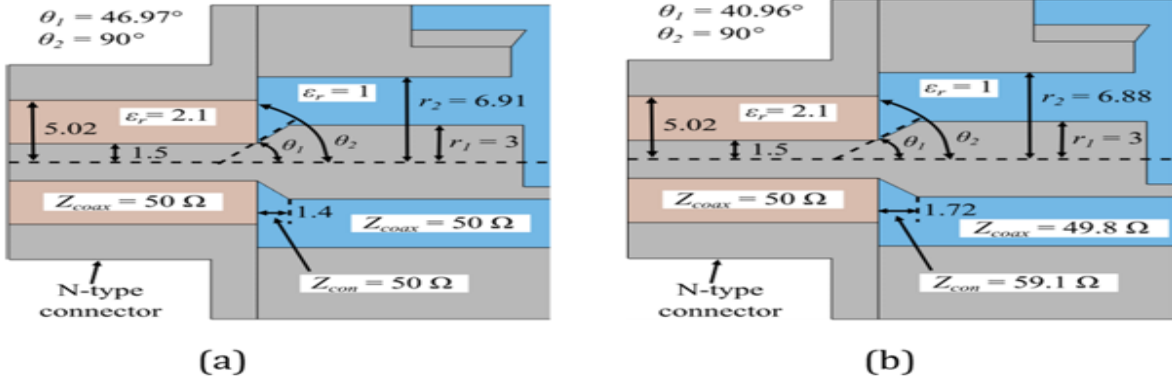
RCFFC (Radially Coupled Coaxial Fast Faraday Cup) ليصبح مناسباً لقياس الحزم الأيونية

ذات الشدة المنخفضة ، الشكل 34.

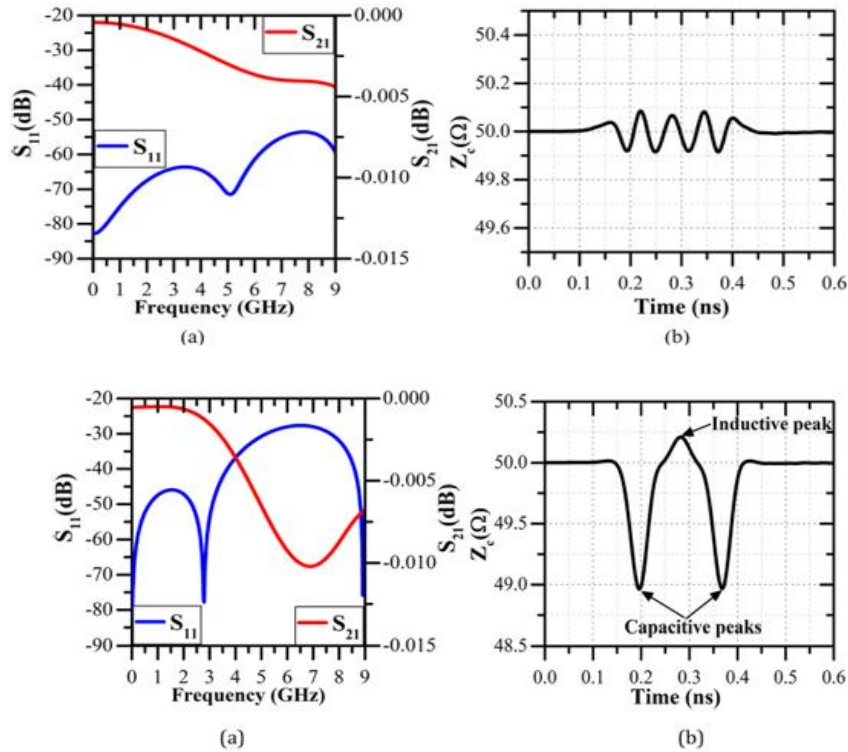


الشكل 34- فنجان فاراداي السريع المحوري المرتبط شعاعياً RCFFC.

يوضح الشكل 35 مقطع المحول المخروطي لفنجان فارادي RCFFC حيث قام الباحث بتعديلات على الزاوية الداخلية للمخروط أي تغيير الممانعة المميزة للمحول المخروطي للحصول على اقل انعكاس ممكن الشكل 36.



الشكل 35- مقطع عرضي للمحول المخروطي ضمن فنجان فارادي RCFFC.

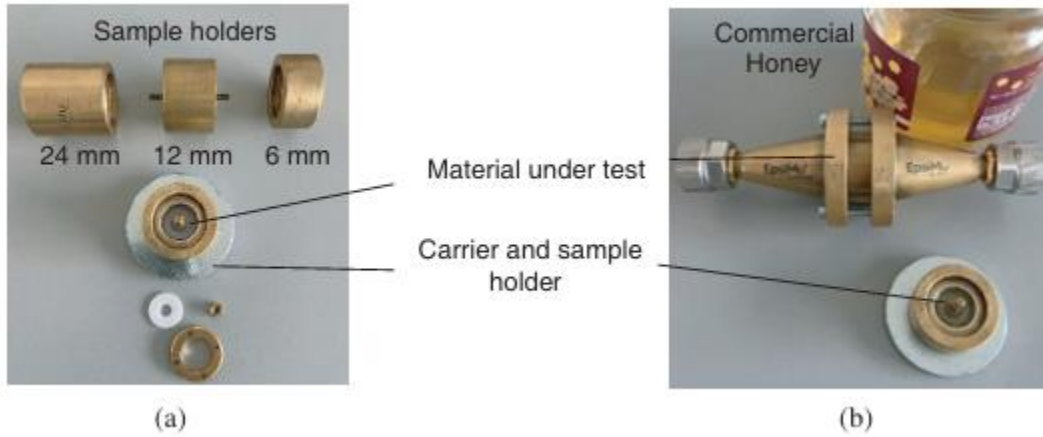


الشكل 36- S21، S11 والممانعة المميزة Zc لفنجان فارادي RCFFC قبل التحسين (المخططات فوق) وبعد التحسين

(المخططات السفلى).

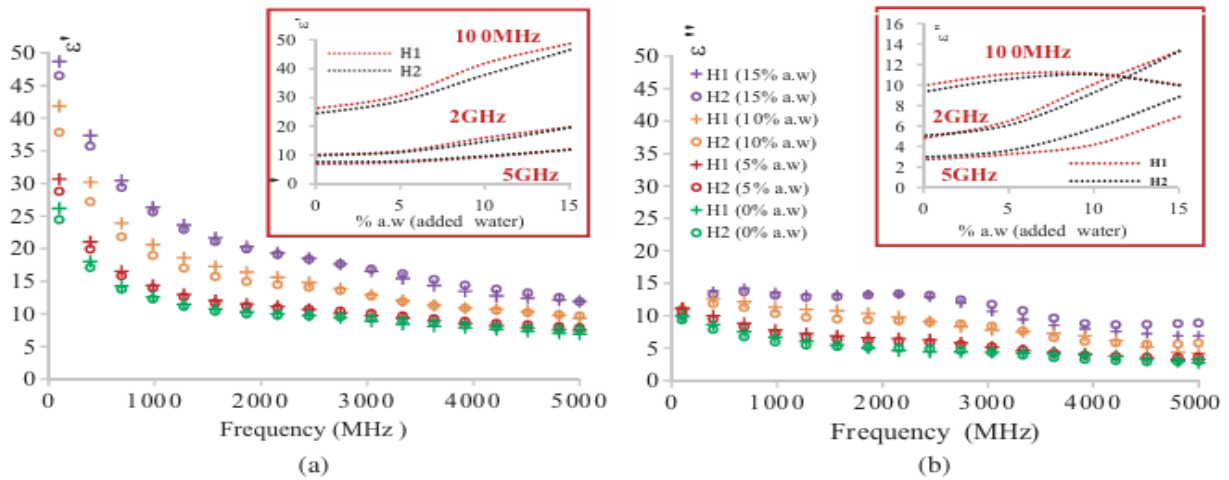
إن تغيير تركيز المادة يؤثر على قيمة ثابت العازلية الكهربائية، قام الباحثون في المقال [13] بقياس الخصائص الكهرومغناطيسية للعسل ودرسوا تأثير إضافة الماء الى العسل الصافي على ثابت العازلية الكهربائي للعسل.

استخدموا الخلية المحورية المخروطية لقياس ثابت العازلية الكهربائي للعسل الشكل 37.



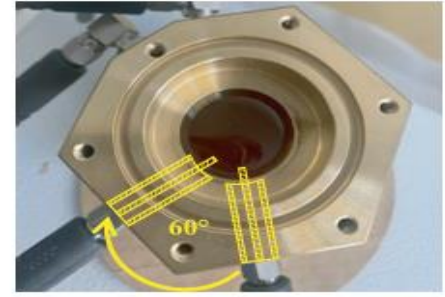
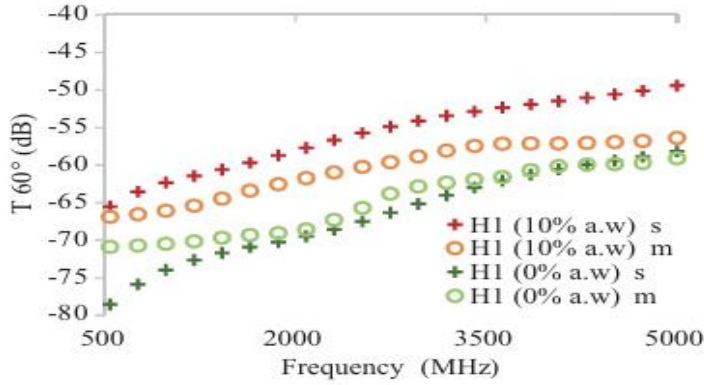
الشكل 37- خلية القياس المحورية مع حامل عينة مختلف مع قارورة عسل.

اختبر الباحثون عند درجة حرارة 25 درجة نوعين من العسل الأول H1 العسل البني المستخرج من نبات الاكاسيا والثاني H2 العسل المنعش المستخرج من الزهور فوجدوا ان ثابت العازلية الكهربائي يزداد بازدياد نسبة الماء في العسل، شكل 38.



الشكل 38- ثابت العازلية الكهربائي لنوعي العسل بنسب ماء مختلفة.

وجد الباحثون انه بازدياد تردد القياس ترتفع درجة حرارة العسل الشكل 39.



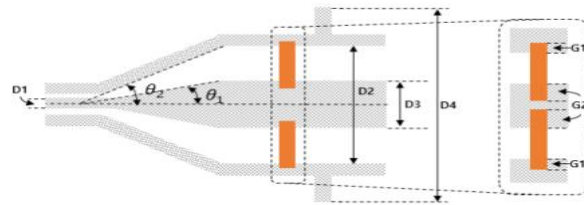
الشكل 39- المنحني يمثل تغير درجة حرارة العسل بازدياد التردد.

في المقال [14] قام الباحثون بتطوير طريقة لقياس العزل الفعال للأنايبب النانوية الكربونية أحادية الجدار

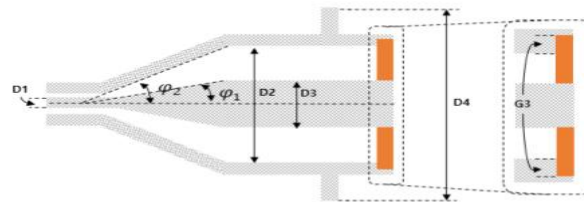
SWCNTs (single-walled carbon nanotubes) التي قاموا بوضعها ضمن جهاز القياس على شكل

شريط.

وقام الباحثون بتطوير نوعين جديدين للمعيار ASTM D4935 لتعديل تردد لعمل من اجل العمل على ترددات اعلى (تطوير من تردد العمل 1.5 GHz الى تردد عمل 8 GHz) الشكل 40.



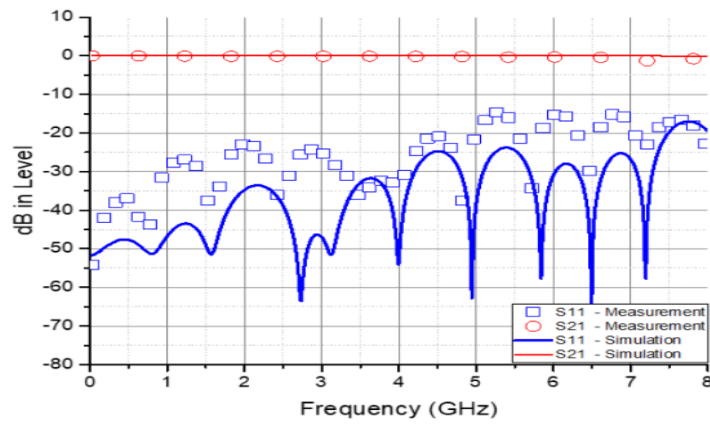
(a) 구조 1
(a) Type I jig



(b) 구조 2
(b) Type II jig

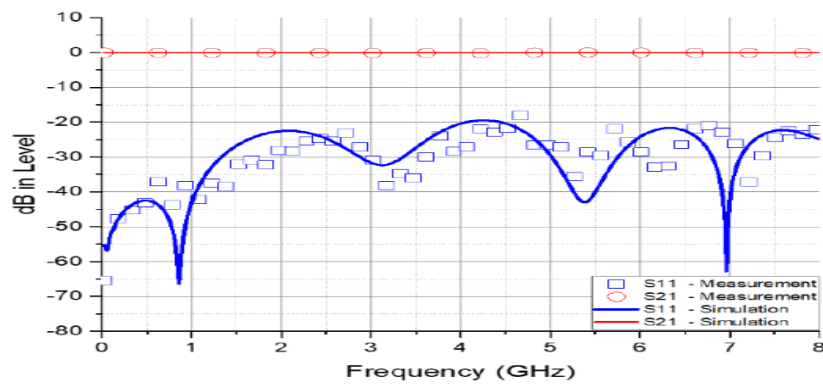
الشكل 40- تطوري Type 2 jig و Type 1 jig للمعيار ASTM D493

وتم تحسين معاملات الانعكاس بكلا التصميمين بتغيير زاوية الناقل الداخلي المخروطي أي تعديل الممانعة المميزة الشكل 41 و42.



(a) 산란계수
(a) *S*-parameter

الشكل 41- S11 للنوع jig Type 1.



(a) 산란계수
(a) *S*-parameter

الشكل 42- S11 للنوع jig Type 2.

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

1.2 مقدمة

إن معرفة الخصائص الكهربائية والمغناطيسية للمواد لها أهمية كبيرة في الفروع المختلفة للبحث العلمي، كعلم المواد، وتصميم الدارات المايكروية، والأبحاث البيولوجية؛ وفي التطبيقات الصناعية والعسكرية كتطوير المواد الماصة والطلاء الخ.

طورت العديد من المنهجيات لقياس المقادير العقدية **complex** لثابت العازلية الكهربائية النسبية **relative dielectric constant** والسماحية المغناطيسية النسبية **relative permeability**، بعضها قائم على القياس والتحليل في المجال الزمني **time domain** والبعض الآخر في المجال الترددي **frequency domain**، وذلك انطلاقاً من شبكة أحادية **one-port network**، أو ثنائية **two-port**. لكل طريقة محدوديتها من حيث المجال الترددي للقياس، ونوعية المواد التي يمكن قياسها، والبارامترات التي يمكن استخراجها.

من خلال مراجعة الأدبيات يمكن تحديد المنهجيات الأكثر شيوعاً [3] [15] [16]:

- خلايا قياس معامل النقل/الانعكاس

.Transmission/Reflection (TR) measurement cells

- خلايا دليل الموجة المحوري (أو المستطيل) المفتوحة – المغلقة

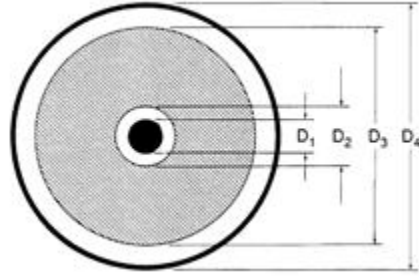
.Open-ended coaxial (or waveguide) cells

- الخلايا الرنينية **Resonance cells**

تستخدم طريقة **TR** لاستخلاص المقادير العقدية لثابت العازلية الكهربائية و/أو السماحية المغناطيسية؛ بدءاً من القياس العقدي لمعامل الانعكاس **S11 complex reflection coefficient** والقياس العقدي لمعامل الانتشار **S21 complex transmission coefficient** باستخدام جهاز تحليل الشبكات **VNA**،

بينما تستخدم طريقة **open-ended** لاستخلاص المقادير العقدية لثابت العازلية للمواد غير المغناطيسية بدءاً من معامل الانعكاس. إن الآلية الطنينية تقود إلى استخلاص المقادير عند التردد الطيني للحجرة الطنينية فقط بوجود العينة وتتطلب حل معادلات ماكسويل لأشكال محددة مسبقاً من العينات.

يتميز القياس بتقنية TR بقدرته على تغطية مجال ترددي عريض، وإمكانية تحقيق وثوقية عالية. تتطلب هذه الطريقة معايرة دقيقة لصفحة القياس، وأخذ أبعاد جهاز القياس بعين الاعتبار (خلية القياس التي توضع فيها العينة المراد قياس خصائصها)، ويتمثل المصدر الأساسي للخطأ بالفراغ أو الفجوة الفاصلة بين العينة وجسم الجهاز [16]، الشكل 43.



الشكل 43- خط نقل محوري مملوء بالمادة المراد اختبارها.

كذلك تم تطوير العديد من الخوارزميات البرمجية والطرق العددية لاستخلاص المقادير العقدية لثابت العازلية الكهربائية و/أو السماحية المغناطيسية؛ بدءاً من القياس العقدي لمعامل الانعكاس ومعامل الانتشار.

من خلال مراجعة الأدبيات يمكن تحديد الخوارزميات أو الإجراءات الأكثر استخداماً [3] [15] [16]:

- Nicolson-Ross-Weir (NRW) method
- NIST iterative method
- New non-iterative method
- Short circuit line (SCL) method

تختلف دقة المقادير المستخلصة ونوعها تبعاً للخوارزمية المعتمدة كما هو موضح في الجدول 2. لزيادة الدقة وتخفيض زمن الإجراءات التكرارية يتم عادة استخلاص البارامترات (ثابت العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية) بعدة طرق. مثلاً، يتم تطبيق إجراء NRW عند كل تردد واستخدام نتيجتها كتخمين أولي لإجراء NIST التكرارية iterative. كذلك تتوفر منهجية لتصحيح الخطأ الناتج عن وجود فجوة بين العينة وجسم الجهاز.

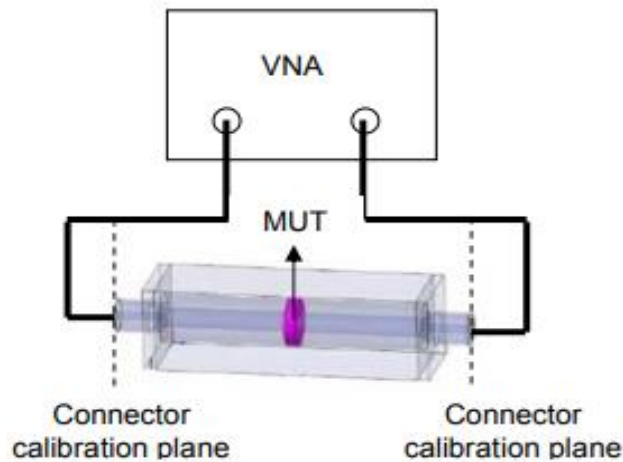
الجدول 1- مقارنة إجراءات حساب الخصائص الكهرومغناطيسية.

Conversion techniques	S-parameters	Material properties	Speed	Accuracy
NRW	S21·S11	$\mu r \cdot \epsilon r$	Fast	Medium
NIST	S21·S11	$\mu r = 1 \cdot \epsilon r$	Slow	Good
New non-iterative method	S21·S11	$\mu r = 1 \cdot \epsilon r$	Fast	Good
SCL	S11	ϵr	Fast	Good

كما ذكرنا سابقا في مقدمة الفصل عن طرق القياس سنذكر الان مفصلا الطريقة التي سنعملها.

2.2 طريقة Transmission/Reflection (TR) measurement cells

القياس باستخدام هذه الطريقة ينطوي على وضع عينة الاختبار (MUT) في جزء من دليل الموجة (المستطيل او المحوري) ويسمى حامل العينة وقياس مصفوفة التشتت S للمنافذ باستخدام محلل طيف الشبكة VNA (تتم معايرة VNA Calibration مع خلية القياس وذلك لكي نحصل على مصفوفة التشتت S عند مداخل الخلية وللتخلص من الترددات الطينية الكثيرة غير المرغوبة حيث ان عملية القياس تتطلب ثبات في قيمة مصفوفة التبعثر قدر الإمكان)، الشكل 44.



الشكل 44- طريقة TR في قياس الخصائص الكهرومغناطيسية.

يجب وضع العينة بإحكام في حامل العينة للتخلص من الثغرات الهوائية التي تتسبب في خطأ القياس.

بعد قياس مصفوفة التشتت على مدخلي خلية القياس يتم استخراج مصفوفة التشتت للعينة بطريقتين:

(1) من خلال جهاز VNA حيث يتم الحصول على الطور يدوياً لإلغاء المسافة بين سطح المعايرة و سطح العينة (هذه الميزة يوفرها الجهاز VNA).

(2) من خلال خوارزمية حساب ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

بعد الحصول على مصفوفة تشتت عينة القياس يتم إدخالها لخوارزمية حسابية لاستخلاص ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

• ميزات طريقة TR:

1. تستخدم دلائل الموجة المحورية والمستطيلة لقياس خصائص المواد ذات الضياعات المتوسطة والعالية بسبب قدرتها على قراءة القياسات عند ترددات متوسطة وعالية.

2. يمكن حساب كلا ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

• عيوب طريقة TR:

1. يوجد محدودية في القياس بسبب الثغرات الهوائية الموجودة بين عينة الاختبار وجدار خلية القياس.

2. تكون دقة القياس محدودة إذا كانت سماكة العينة من مضاعفات طول الموجة.

كما ذكرنا في المقدمة يوجد عدة إجراءات (خوارزميات) حسابية لكن سنعتمد فقط خوارزمية واحدة

Nicolson-Ross-Weir (NRW) من أجل قراءة ثابتي العازلية كهربائية والسماحية المغناطيسية.

3.2 المنهجية [16][17] Nicolson-Ross-Weir (NRW)

هي طريقة حسابية تؤمن حساب مباشر لثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

(1) الحالة الأولى مصفوفة التشتت (دخل خوارزمية القياس) هي مصفوفة تشتت عينة الاختبار التي يقدمها جهاز

قراءة مصفوفة التبعثر $[S_{sample}]$

مدخلات هذه الطريقة هي معاملات مصفوفة التشتت (S12، S22، S21، S11) أو يمكن الاعتماد فقط على

الزوجين (S21، S11) أو (S12، S22) إذا كانت العينة المقاسة متماثلة المناحي isotropic.

ترتبط معاملات التشتت بمعامل الانعكاس والانتشار (عند محل خلية القياس) وفقا للعلاقات التالية:

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2)$$

حيث يتم الحصول على S21، S11 من خلال محل طيف الشبكة مباشرة VNA.

بتعديل العلاقة 1 و 2 للحصول على معامل العبور والانعكاس نجد:

معامل الانعكاس Γ (reflection coefficient):

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2} \quad (3)$$

$$X = \frac{s_{11}^2 - s_{21}^2 + 1}{2s_{21}^2} \quad (4)$$

معامل الانتشار T (transmission coefficient):

$$T = \frac{s_{11} + s_{21} - \Gamma}{1 - (s_{11} + s_{21})\Gamma} \quad (5)$$

الممانعة النسبية Z_r (relative impedance):

$$Z_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (6)$$

ملاحظة: يجب احترام حدود المقادير الفيزيائية أي يجب ان تكون القيمة المطلقة لمعامل الانعكاس اقل من واحد $|\Gamma| \leq 1$ وان يكون القسم الحقيقي للممانعة النسبية Z_r موجب $Re\{Z_r\} > 0$ [18].

ثم التعويض في علاقة ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية كما يلي:

$$\mu_r = j \frac{c Z_r}{2\pi f L} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (7)$$

$$\epsilon_r = j \frac{c Z_r^{-1}}{2\pi f L} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (8)$$

حيث:

μ_r : ثابت السماحية المغناطيسية العقدي (relative permeability).

ϵ_r : ثابت العازلية الكهربائي العقدي (relative permittivity).

Γ : معامل الانعكاس (reflection coefficient).

T : معامل الانتشار (transmission coefficient).

Z_r : الممانعة النسبية (relative impedance).

L : طول عينة الاختبار.

f : التردد.

C: سرعة الضوء في الخلاء.

(2) الحالة الثانية مصفوفة التبعثر (مدخل الخوارزمية الحسابية) هي مصفوفة التبعثر عند مداخل خلية القياس [18]

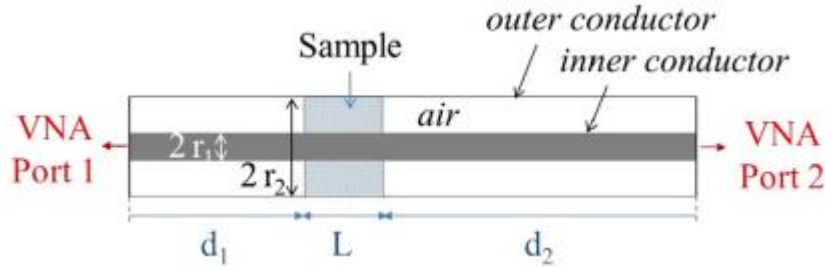
في هذه الحالة يجب استخلاص مصفوفة تشتت العينة $[S_{sample}]$ من مصفوفة تشتت الخلية $[S_{cell}]$ كما رأينا في الدراسات المرجعية سابقا يوجد العديد من اشكال خلايا القياس المستطيل منها او المحوري سنذكر الان أنواع خلايا قياس ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

4.2 خلايا قياس ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية [18]

إن خلايا قياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد لها نوعان:

(1) خلية القياس المحورية الكلاسيكية classical - 7 mm cell

تم وضع العينة داخل خط نقل محوري مملوء بالهواء، بحيث يتطابق قطر هذا الخط مع قطر منفذ الدخل الخاص بالموصل (Connector)، والذي يبلغ في هذه الدراسة 7 ملم، كما في الشكل 45.



الشكل 45- خلية القياس الكلاسيكية classical - 7mm cell

لهذه الخلية سلبية هي حجم حجرة القياس الصغير وهذا سوف يؤثر على دقة قياس الخصائص الكهرومغناطيسية للمادة (بسبب ان الخطأ البشري سيزداد)، كما أن الأبعاد الصغيرة للحجرة لا تتيح القياس الدقيق للمواد الحبيبية. لذلك يتم الانتقال للنوع الثاني من خلايا القياس وهو خلية القياس المخروطية conical cell.

(2) خلية القياس المخروطية conical-13mm cell [18]

في هذه الخلية يتم تكبير اقطار حامل العينة في المنتصف الى 13mm.

تعطى عبارة الممانعة الموجية characteristic impedance (Z_c) لكابل محوري بالعلاقة التالية:

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{r_{outer\ conductor}}{r_{inner\ conductor}} \right) \quad (9)$$

لضمان إنعكاس أقل يجب ان تكون قيمتها 50 أوم.

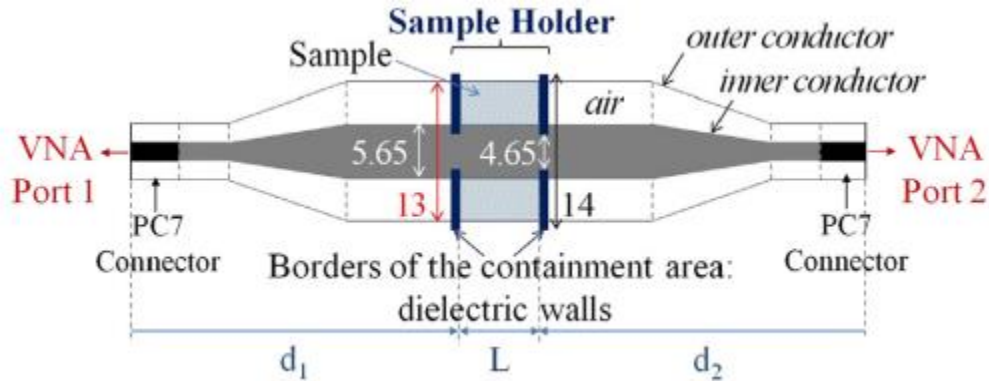
حيث:

$r_{outer\ conductor}$: نصف قطر الناقل الخارجي.

$r_{inner\ conductor}$: نصف قطر الناقل الداخلي.

يمثل الشكل 46 مقطع عرضي لخلية القياس حيث نلاحظ وجود جداري إحاطة عند طرفي العينة من اليمين واليسار من مادة ثابت عازليتها معروف لحجز عينة الاختبار (قد تكون العينة نصف صلبة - رمل مثلاً - او سائلة).

إن الجداران تتشكل من مادة التفلون PTFE ($\epsilon_r = 2.1$):



الشكل 46 - خلية القياس المخروطية conical-13mm cell .

ملاحظة: في الشكل السابق جميع الابعاد بال mm.

3) خلية القياس المخروطية **conical-38.1 mm cell** المعيار **Normal ASTM D4935 jig** [8]

في هذه الخلية اقطار حامل العينة في المنتصف 38.1 mm وطول المحول المخروطي 62.1 mm من الشكل 17.

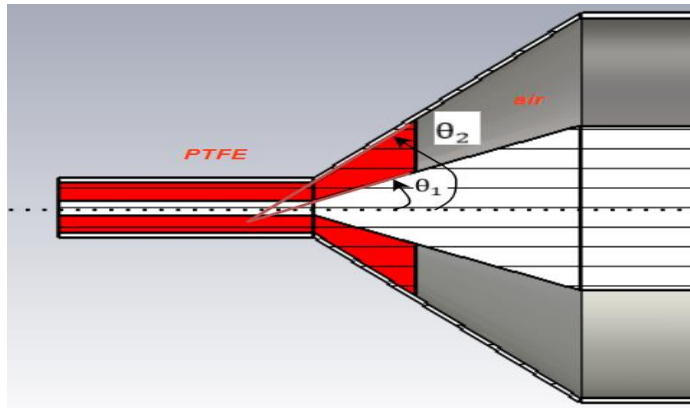
4) خلية القياس المخروطية **conical-38.1 mm cell** المعيار **Modified ASTM D4935 jig** [8]

في هذه الخلية اقطار حامل العينة في المنتصف 38.1 mm وطول المحول المخروطي 31.4mm من الشكل 17. اعتمد park على تحسين المجال الترددي ل Modified ASTM أي الخلية الثانية سنقوم في عملنا سنقوم بتحسين المجال الترددي لخلية park.

5.2 دراسة إمكانية تحسين المجال الترددي لخلية القياس

في هذه الدراسة، سيتم أولاً تحسين المجال الترددي لخلية Park كما ورد في المرجع [8]، ومن ثم تطبيق منهجية التحسين المقترحة على خلية القياس ذات القطر 13 مم، نظراً لعدم توفر دراسات مرجعية سابقة تتناول تحسين مجالها الترددي. عند حدوث تغير مفاجئ في أبعاد خط النقل، يطرأ تغير كبير في قيمة الممانعة الموجية، مما يؤدي إلى انعكاس ملحوظ للإشارة عند نقطة التحول. وقد قام الباحث Park بتقليل هذا الانعكاس من خلال تعديل زاوية ميل المحول الداخلي للخلية، بالإضافة إلى تغيير موقع نقطة الانقطاع المفاجئ في الممانعة المميزة.

في هذا البحث، نقتح طريقة جديدة لتحسين المجال الترددي، تعتمد على استبدال منفذي الدخل المملوءين بالهواء بمنفذين يحتويان على مادة عازلة ذات ممانعة مميزة متوافقة مع 50 أوم، وهي مادة التفلون (PTFE)، كما سيتم إدخال جزء من مادة التفلون ضمن المحول المخروطي وفقاً لما ورد في المرجع [9] وتسميتها الخلية ذات المحول المخروطي الهجين الذي عازله التفلون والهواء (CHA) Conical Hybrid Adapter، الشكل 47.



الشكل 47 - الخلية ذات المحول المخروطي الهجين الذي عازله التفلون والهواء (CHA) Conical Hybrid Adapter .

يعتمد هذا الاقتراح على حقيقة أن التغير المفاجئ في الوسط العازل عند نقطة الانقطاع يؤدي إلى تغير حاد في الممانعة، مما يسبب انعكاساً كبيراً للإشارة.

خطوات العمل على دراسة امكانية تحسين خلية القياس:

أولاً: نمذجة خلية قياس الحالة 1 كما في بارك [8] في برنامج CST 2021

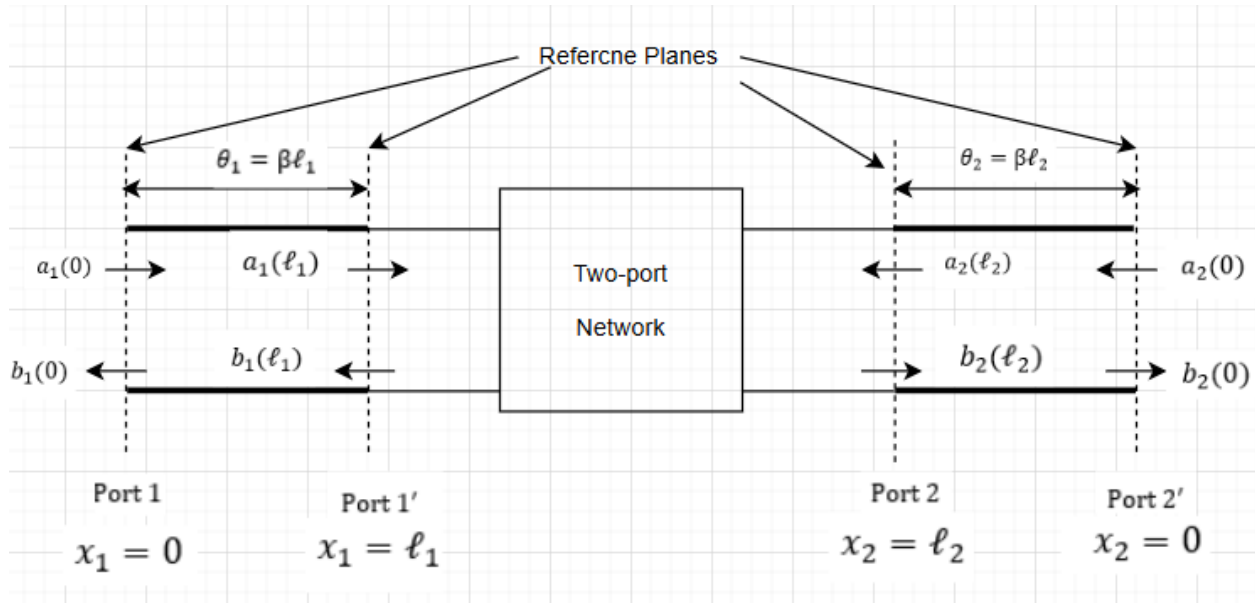
ثانياً: نمذجة خلية القياس ذات محول مخروطي هجين عازله التفلون والهواء في برنامج CST 2021

سنقوم بنمذجة ومحاكاة الخلية بمنفذي تفلون ومحول مخروطي هجين القسم الأول مادته العازلة التفلون والثاني مادته العازلة الهواء ثم سنقوم بتغيير طول مادة التفلون داخل المحول للحصول على اقل انعكاس ممكن.

6.2 حساب مصفوفة تشتت العينة انطلاقاً من مصفوفة تشتت الخلية [18][19]

لحساب مصفوفة تشتت العينة $[S_{sample}]$ يجب حساب الطول الكهربائي بين صفحتي الانتقال (بين مدخل الخلية وسطح العينة) حيث يمثل صندوق two port network العينة الشكل 48.

وأيضاً معرفة معامل التخميد α الناتج عن انتشار الموجة عبر خلية القياس وهي فارغة وإضافة أثر جدران الإحاطة.



الشكل 48 - يمثل إزاحة الصفحة المرجعية لحساب مصفوفة تشتت العينة.

(1) حساب تخميد الخلية (α) وهي فارغة

معامل الانتشار للخلية وهي فارغة $[18] S_{empty cell}$: 21

$$\begin{aligned}
& |S_{empty\ cell. 21}| \\
&= |\exp(-j\beta(d_1 + L_{sample} + d_2))| \\
&\times |\exp(-\alpha(d_1 + L_{sample} + d_2))| \quad (10)
\end{aligned}$$

حيث:

β : ثابت الانتشار في المادة.

d_1 : البعد بين نقطتي إزاحة الصفحة المرجعية باتجاه المنفذ الأول.

d_2 : البعد بين نقطتي إزاحة الصفحة المرجعية باتجاه المنفذ الثاني.

L_{sample} : طول عينة الاختبار.

يتم حساب ثابت الانتشار في المادة من العلاقة:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_s} \quad (11)$$

حيث:

λ_s : طول الموجة في المادة وتحسب من العلاقة التالية:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (12)$$

حيث:

λ_0 : طول الموجة في الفراغ.

ومنه نجد:

$$\alpha = -\frac{\ln(|S_{empty\ cell. 21}|)}{d_1 + L_{sample} + d_2} \quad (13)$$

بعدها يتم التعويض في العلاقات التالية لحساب مصفوفة التشتت عند الصفحة المزاحة:

$$s_{11}' = s_{11} \times \exp(j\beta(2d_1)) \times \exp(2\alpha d_1) \quad (14)$$

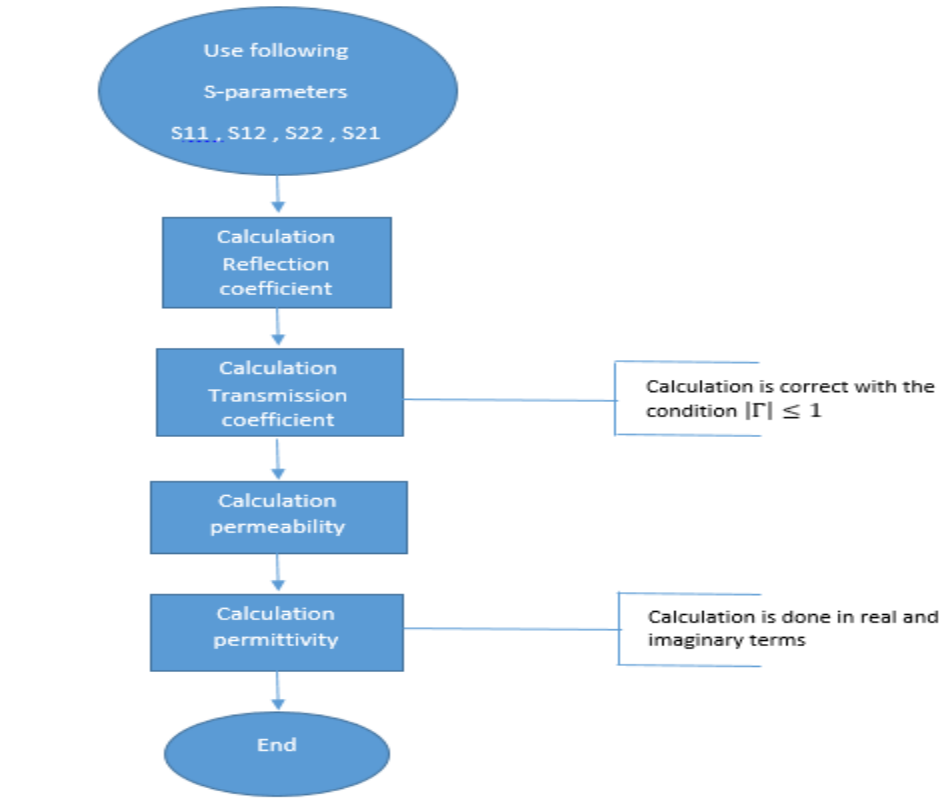
$$s_{21}' = s_{21} \times \exp(j\beta(d_1 + d_2)) \times \exp(\alpha(d_1 + d_2)) \quad (15)$$

$$s_{12}' = s_{12} \times \exp(j\beta(d_1 + d_2)) \times \exp(\alpha(d_1 + d_2)) \quad (16)$$

$$s_{22}' = s_{22} \times \exp(j\beta(2d_2)) \times \exp(2\alpha d_2) \quad (17)$$

يتم تكرار نفس الخطوات السابقة إذا كان هناك أكثر من وسط نقل يملكان ثابت عازلية كهربائي مختلف للحصول في النهاية على مصفوفة تشتت عينة الاختبار.

ثم نعود للمعادلة 7 و 8 من اجل الحصول في النهاية على قيمة ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية. الشكل 49 يوضح خطوات الخوارزمية NRW السابقة:



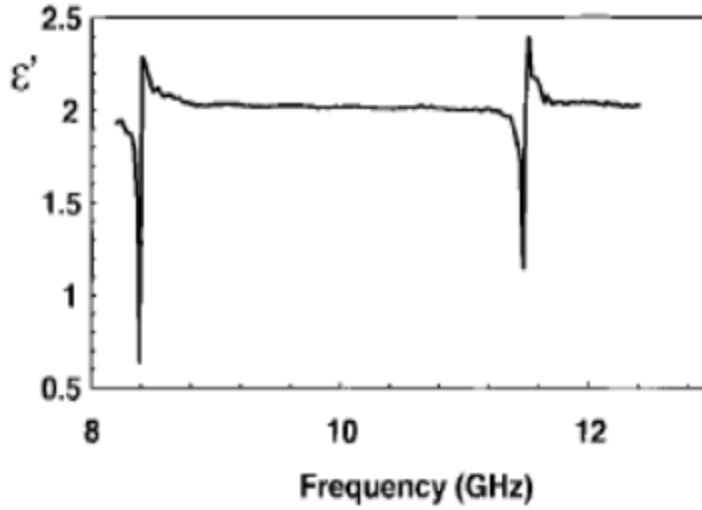
الشكل 49- خوارزمية NRW.

• ميزات خوارزمية NRW [15]:

- (1) سريعة حيث انها ليست تكرارية.
- (2) قابلة للتطبيق مع خلايا القياس المحورية والمستطيلة.

• عيوب خوارزمية NRW:

- (1) تشتت في القياس بسبب انها لا تأخذ طول العينة بعين الاعتبار الذي قد يكون من اضعاف نصف طول الموجة الشكل 50.
- (2) بسبب المشكلة السابقة فان سماكة العينة يجب أن تكون صغيرة.



الشكل 50- الجزء الحقيقي لثابت عازلية مادة التفلون PTFE باستخدام خوارزمية NRW .

لدينا معامل الانتشار:

$$T = |T| \exp(j(\theta + 2\pi n)) \quad (18)$$

$|T|$: مطال معامل الانتشار.

θ : زاوية معامل الانتشار.

n : عدد صحيح.

المشكلة تكمن في معرفة قيمة n لآخذ طول العينة بعين الاعتبار للتخلص من القفزات في قياس ثابتي العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية.

تصبح العلاقة 7 و8 على الشكل التالي:

$$\mu_r = j \frac{c Z_r}{2\pi f L} [-\ln(T) - j(\theta + 2\pi n)] \quad (19)$$

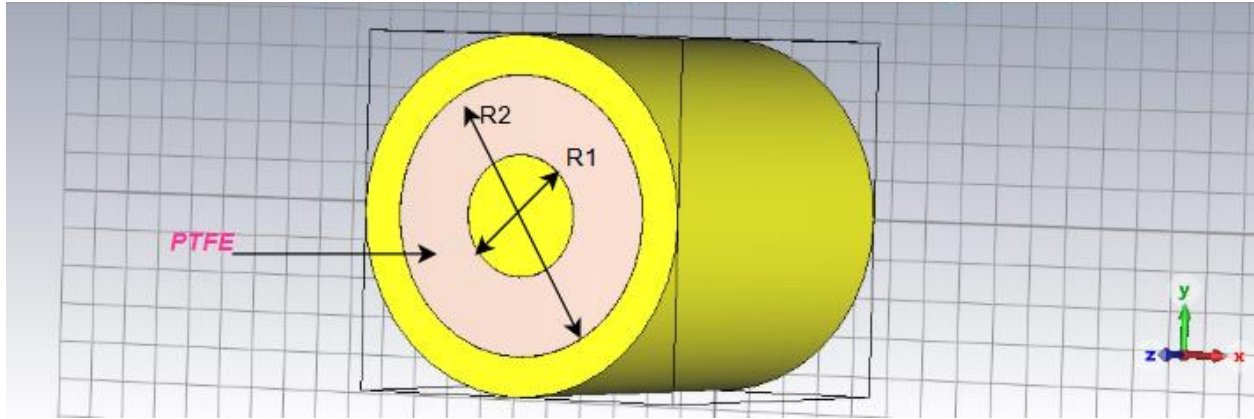
$$\varepsilon_r = j \frac{c Z_r^{-1}}{2\pi f L} [-\ln(T) - j(\theta + 2\pi n)] \quad (20)$$

الفصل الثالث

النمذجة والمحاكاة

1.3 نمذجة عينة الاختبار

ذكر الفصل الثاني الفقرة 2.2 والفقرة 2.3 ان جهاز قياس ثابت العازلية الكهربائي يتألف من خلية القياس لاستخراج مصفوفة التبعثر وخوارزمية NRW لاستخراج ثابت العازلية الكهربائي أو الخصائص الكهرومغناطيسية. في البداية من أجل التحقق من صحة خوارزمية NRW تمت نمذجة عينة الاختبار باستخدام المحاكى CST Microwave Studio 2021 حيث أن التصميم يتألف من ناقل داخلي وناقل خارجي والعينة المراد استخراج مصفوفة تبعثرها كما في الشكل 51.



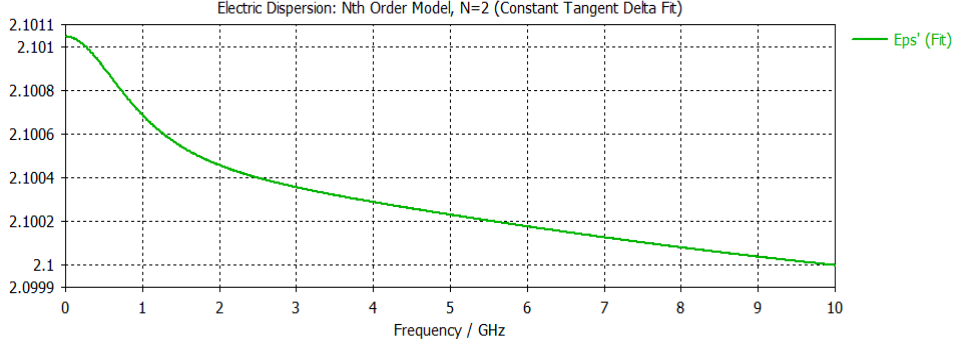
الشكل 51- عينة اختبارية ضمن برنامج المحاكاة CST.

باعتبار قطر العينة الخارجي يساوي $R2 = 7\text{mm}$ وقطرها الداخلي يساوي $R2 = 3.04\text{mm}$ ، وبالتعويض في العلاقة 9 نجد:

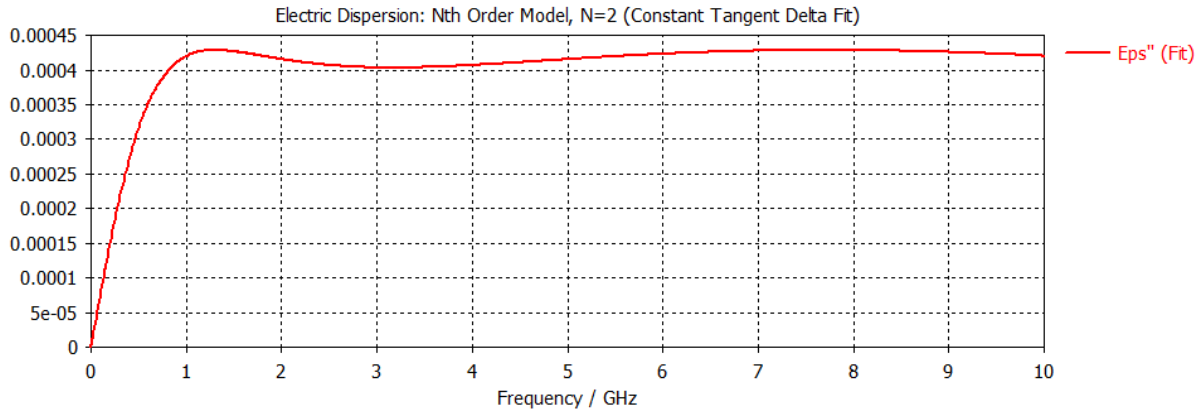
$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{1}} \ln \left(\frac{7/2}{(3.04/2)} \right) \approx 50 \Omega$$

تم استخدام التفلون PTFE كمادة عازلة في خلية القياس الموضحة في الشكل 51. تمتع التفلون بثابت عازلية كهربائية : $\epsilon_r = 2.1$ وسمحية مغناطيسية: $\mu_r = 1$.

يُتيح برنامج CST قراءة ثابت العازلية الكهربائي للمواد على امتداد الطيف الترددي. يظهر الشكل 53 نتيجة قياس ثابت العازلية الكهربائية والسماحية المغناطيسية.



(a)

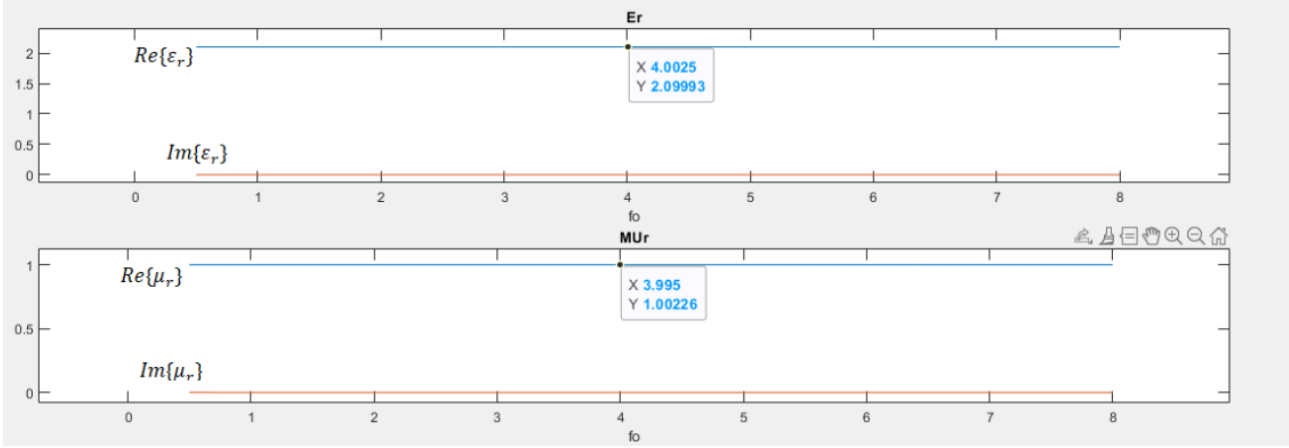


(b)

الشكل 52- ثابت العازلية الكهربائي العقدي لمادة التفلون المقاسة في برنامج CST (a) القسم الحقيقي من ثابت العازلية الكهربائي (b) القسم التخيلي من ثابت العازلية الكهربائي.

من الشكل 52، نجد أن القسم الحقيقي لثابت العازلية تتراوح قيمته بين 2.1 و 2.1011 ضمن المجال الترددي [0-10] GHz حيث ان قيمته تنخفض مع ازدياد التردد ونجد ايضا أن القسم التخيلي لثابت العازلية تتراوح قيمته بين 0.0001 و 0.0004 وتزداد قيمته بازدياد التردد.

ثم تم استخراج مصفوفة التبعر لخلية القياس من برنامج CST وادخالها الى خوارزمية NRW في برنامج MATLAB من أجل قراءة ثابت العازلية الكهربائي الشكل 53.

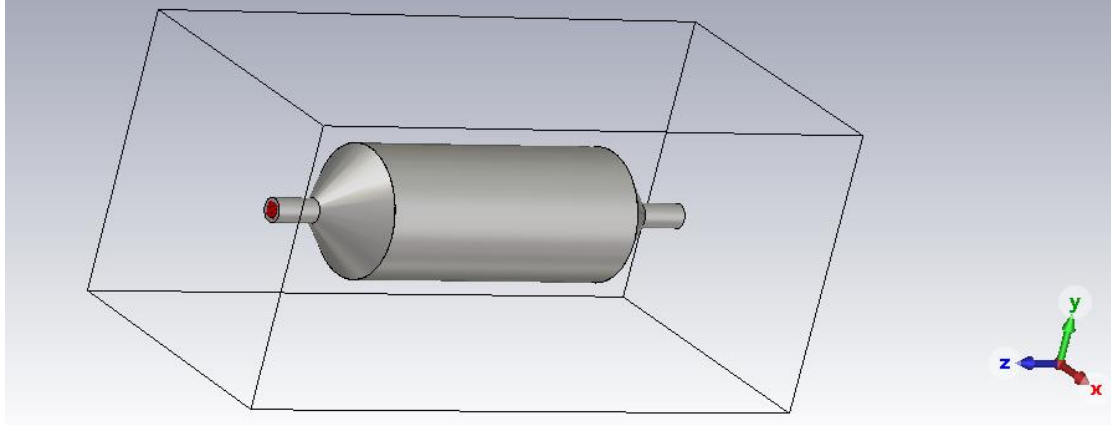


الشكل 53- ثابت العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية لمادة التفلون في ماتلاب بعد تطبيق خوارزمية NRW.

يظهر الشكل 53 دقة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة القياس والخوارزمية NRW. تالياً تم نمذجة خلية بارك [8] ودراسة إمكانية زيادة المجال الترددي عليها بعدها تم تصميم خلية قياس ثابت العازلية الكهربائي وتطبيق التحسينات عليها.

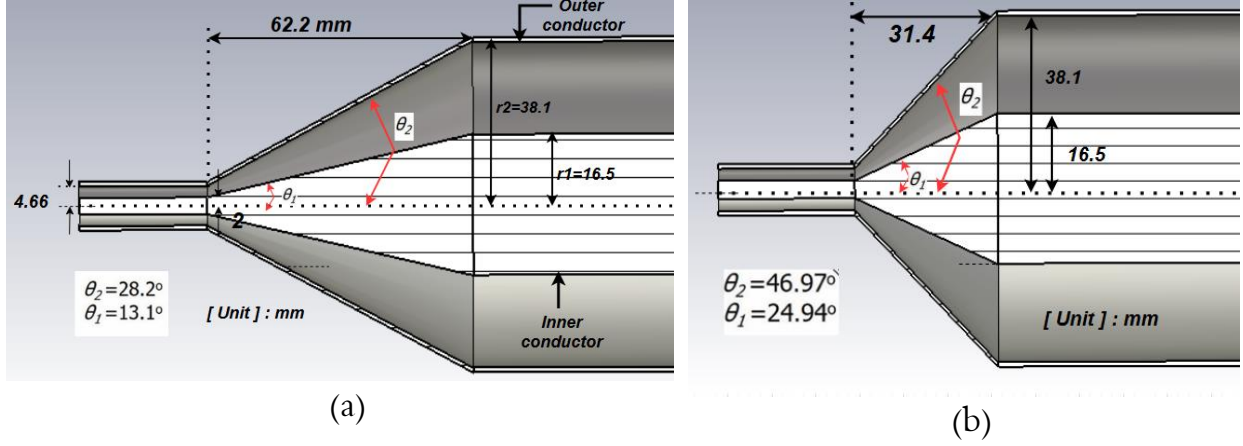
2.3 نمذجة ومحاكاة خلية بارك (دراسة الحالات الثمانية)

للتحقق من صحة طريقة المحاكاة، تم نمذجة خلية بارك الموضحة في الورقة البحثية [8]. تم نمذجة الحالات الثمانية الموضحة في الأشكال 17 و19 و21، ومن ثم تمت مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج المعروضة في [8]، يوضح الشكل 54 نمذجة الخلية في برنامج CST.

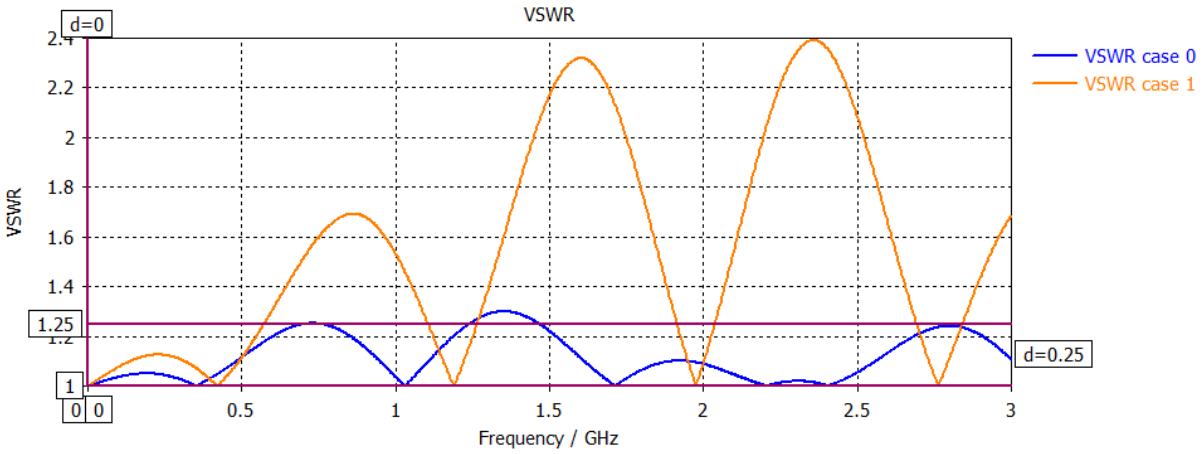


الشكل 54- خلية القياس المحورية في برنامج CST.

1.2.3 الحالات 0 و 1 والذين يمثلان المعيارين الأساسيين
 تم نمذجة المعيارين الأساسيين الموضحين في الشكل 55 في بيئة المحاكاة CST.



الشكل 55- خلية القياس: (a) المعيار الطبيعي (b) case 0 المعيار القصير - في برنامج CST 2021. لم يذكر المرجع [8] طول الكبل المحوري المستخدم، إلا أنه قارن النتائج التي حصل عليها مع الخلية التجارية والتي يتمتع فيها الكبل المحوري بطول مساو لـ 150 mm. انطلاقاً من ذلك تم اعتماد طول الكبل المحوري مساو لـ 150 mm. يظهر الشكل 56 المعامل VSWR لكل من المعيارين 0 و 1. يظهر الجدول 2 المجال الترددي الذي تم الحصول عليه لكل من المعيارين، وكما هو واضح، تقترب النتائج من تلك التي حصل عليها بارك.

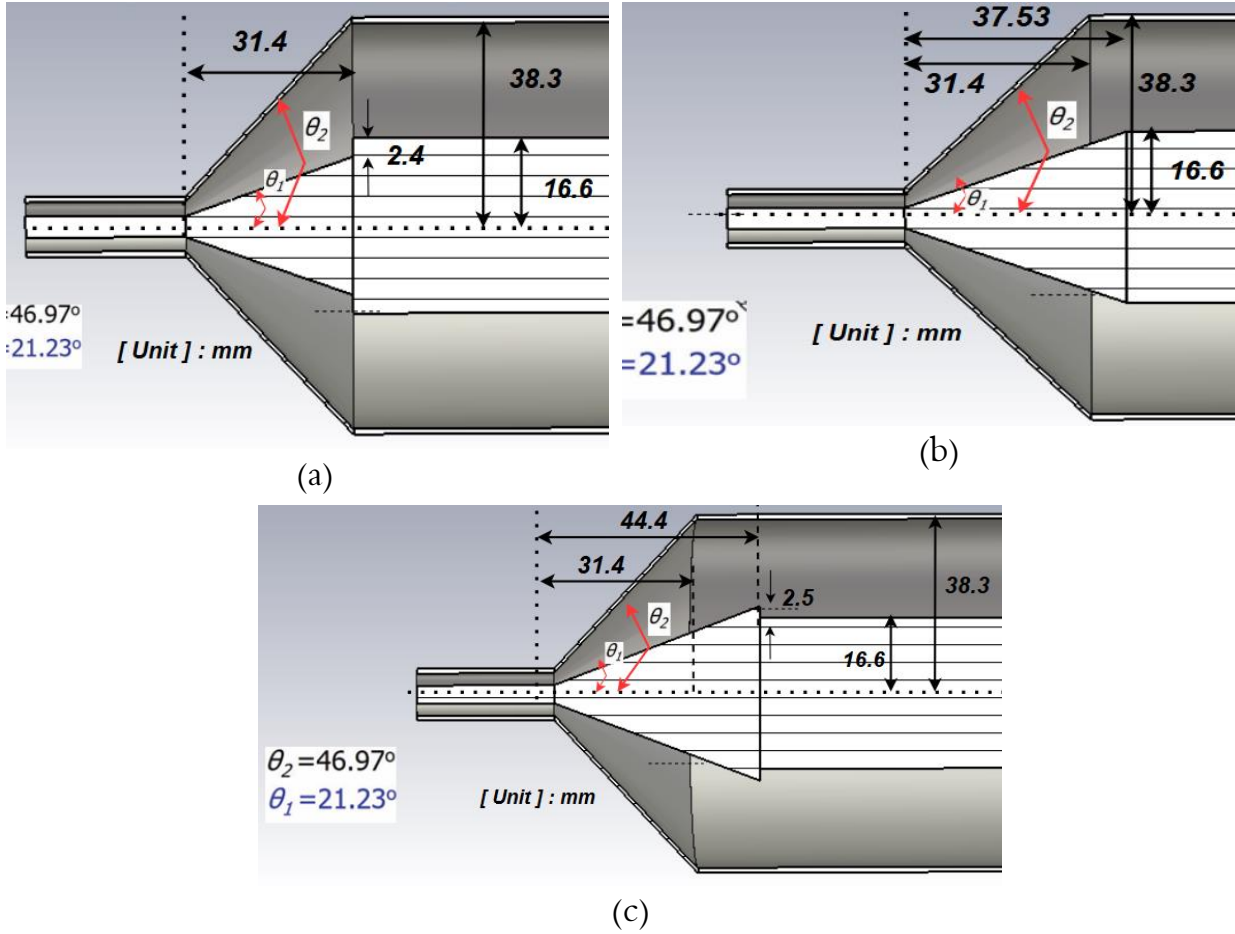


الشكل 56- VSWR للحالة 0 و 1 في المحاكاة في برنامج CST 2021.

الجدول 2 - مقارنة مجال التردد بين نمذجة بارك والنمذجة الجديدة.

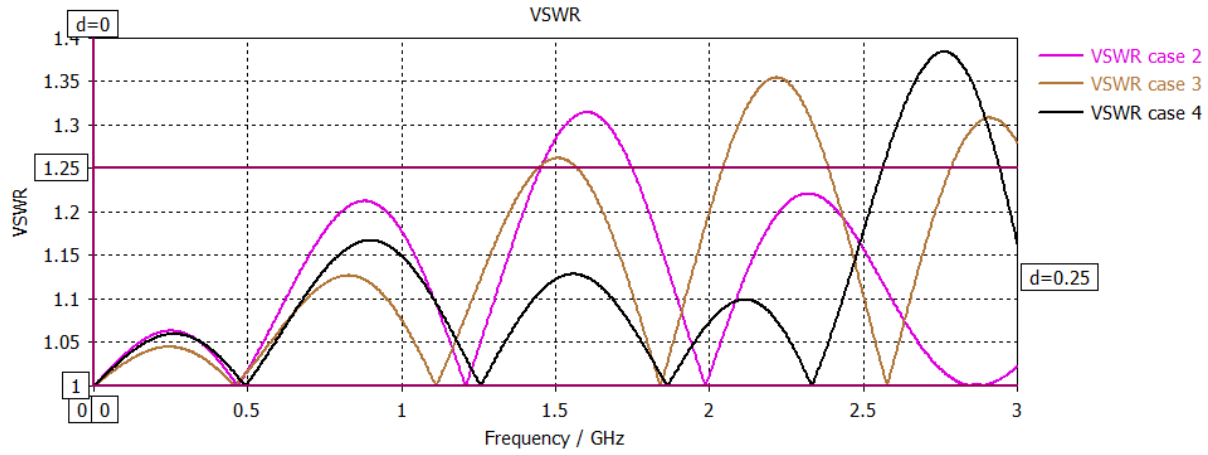
case	park / GHz	obtained from simulation / GHz
0	1.08	1.23
1	0.53	0.57

2.2.3 الحالة 2 و3 و4 التي تمثل تحسينات بارك
 يوضح الشكل (57) نمذجة الحالات 2 و3 و4 من التحسينات التي قام بها بارك.



الشكل 57- محاكاة الحالات 2 و3 و4 من تحسينات بارك، a: الحالة 2، b: الحالة 3، b: الحالة 4.

يظهر الشكل 58 المعامل VSWR للحالات 2 و3 و4، ويظهر الجدول 3 المجال الترددي الموافق لكل حالة من الحالات الثلاث.



الشكل 58- VSWR للحالة 2 و3 و4 في برنامج المحاكاة CST 2021.

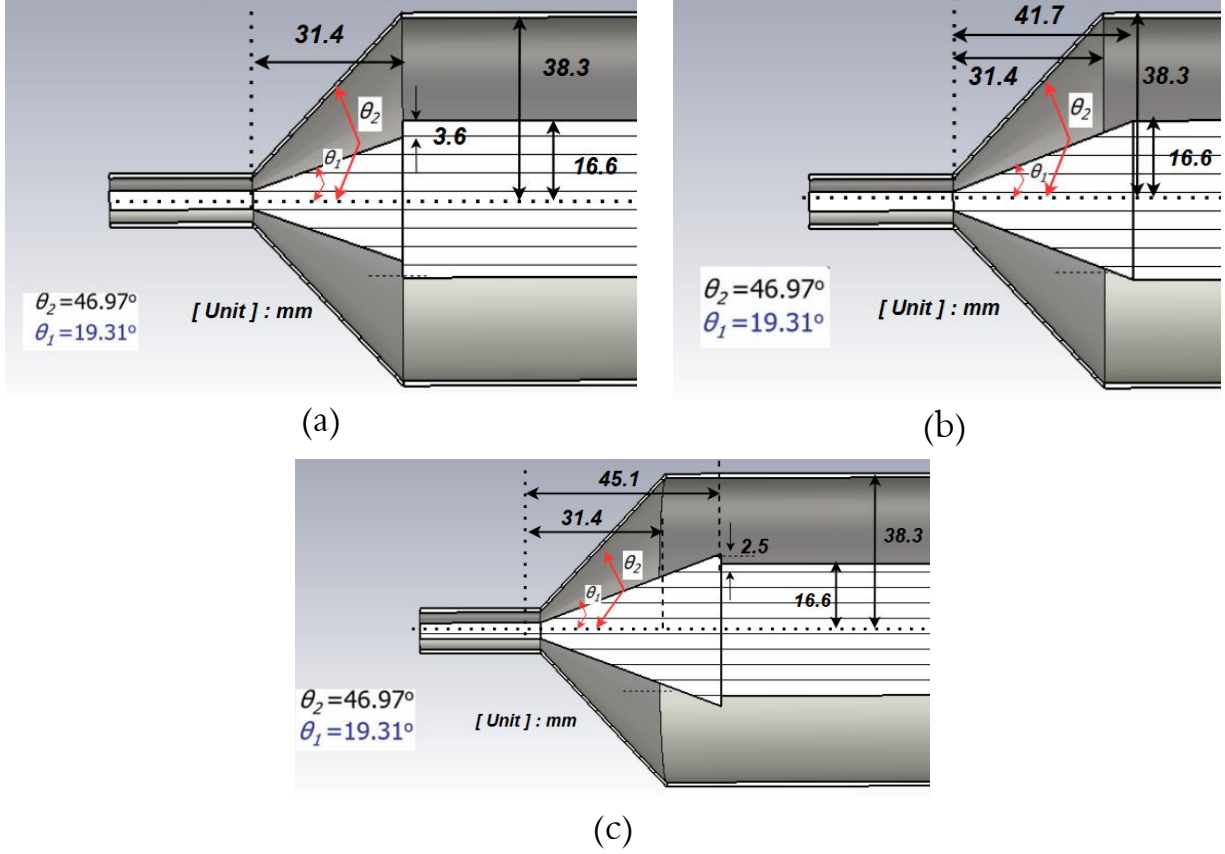
الجدول 3 - مقارنة اعلى تردد تعمل عليه الخلية بين النمذجة الجديدة تحسين بارك الحالات 2 و3 و4 .

case	park /GHz	obtained from simulation / GHz
2	1.26	1.45
3	1.24	1.44
4	2.3	2.56

يظهر الجدول 3 أن النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تقترب من تلك التي عرضها بارك في المرجع [8].

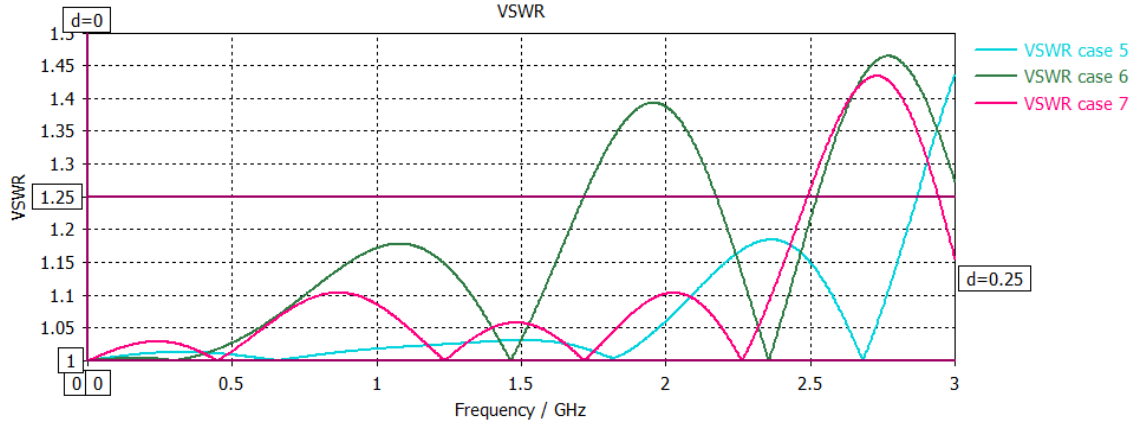
3.2.3 الحالة 5 و6 و7 التي تمثل تحسينات بارك

يوضح الشكل (59) نمذجة الحالات 5 و6 و7 من التحسينات التي قام بها بارك.



الشكل 59-محاكاة الحالات 5 و6 و7 من تحسينات بارك، a: الحالة 5، b: الحالة 6، c: الحالة 7.

يظهر الشكل 60 المعامل VSWR للحالات 5 و6 و7، ويظهر الجدول 4 المجال الترددي الموافق لكل حالة من الحالات الثلاث.



الشكل 60- VSWR للحالة 5 و6 و7 في المحاكى CST 2021.

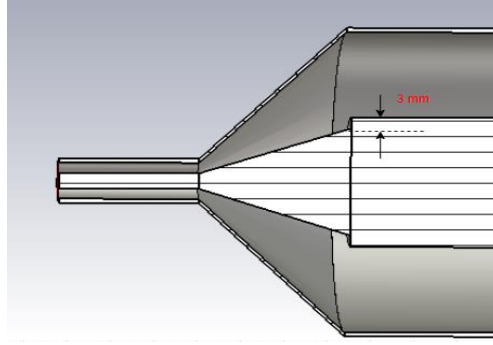
الجدول 4 - مقارنة بين تردد العمل في تصميمنا باستخدام CST 2021 ومحاكاة بارك شكل 22 للحالات 5 و6 و7.

case	park /GHz	obtained from simulation / GHz
5	2.27	2.52
6	1.59	1.71
7	2.26	2.48

يظهر الجدول 4 أن النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تقترب من تلك التي عرضها بارك في المرجع [8]. تظهر الجداول 2 و3 و4 تقارباً بين النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة والنتائج التي قدمها بارك في مقالته.

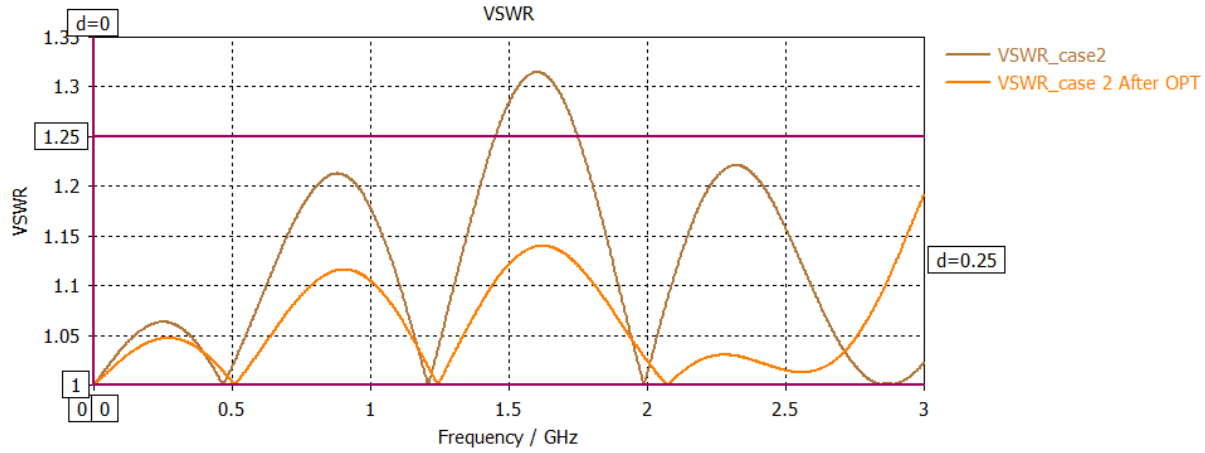
4.2.3 إضافة تحسين على خلية بارك الحالة الثانية

عند محاكاة نماذج بارك، تم ملاحظة أنه يمكن إجراء تحسين إضافي على النتائج التي حصل عليها بارك من خلال تعديل نصف قطر قاعدة المخروط الداخلي ضمن محول خط النقل. من خلال البحث الشامل عن القيمة الأمثلية، تم تعديل قيمة نصف قطر قاعدة المخروط الداخلي ليصبح 30.2mm بدلاً من القيمة التي استخدمها بارك والتي كانت مساوية لـ 29.6 كما هو موضح في الشكل 61.



الشكل 61- مقطع في خلية بارك الحالة 2 بمحاكي CST 2021 بعد التحسين.

يظهر الشكل 62 المعامل VSWR والذي يشير إلى امتداد المجال الترددي حتى التردد 3GHz.



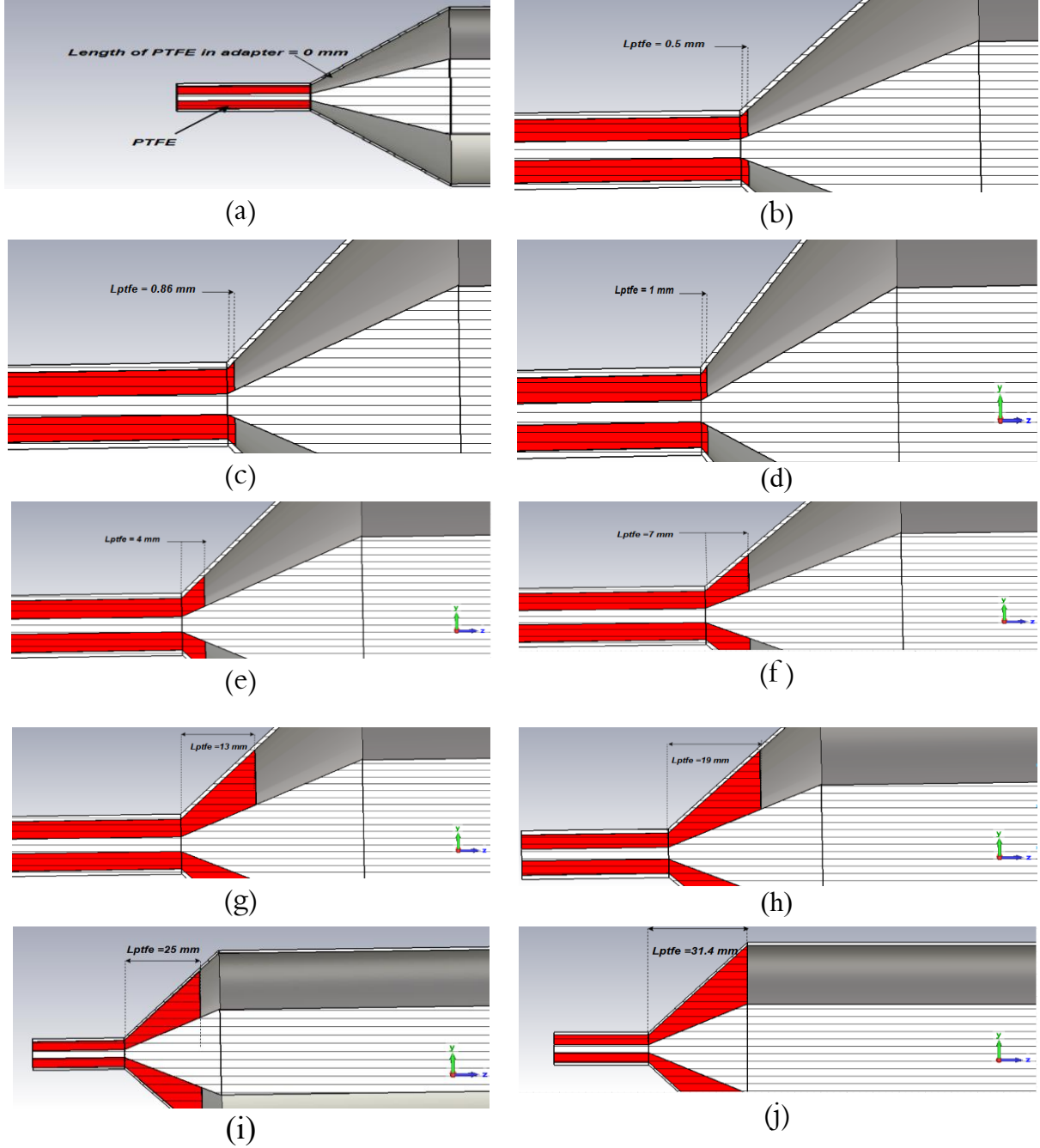
الشكل 62-VSWR للحالة 2 في المحاكي CST 2021 بعد تعديل مسافة الانقطاع ومحاكاة بارك.

من خلال تعديل قيمة نصف قطر قاعدة المخروط الداخلي أمكن زيادة المجال الترددي، إلا أن ذلك يضيف تعقيداً في التصميم. قد يمكن زيادة المجال الترددي عن طريقة إضافة مادة عازلة (التفلون) وهو ما ستتم مناقشته في الفقرة التالية.

3.3 دراسة إمكانية استخدام التفلون بدون انقطاع بقاعدة المخروط

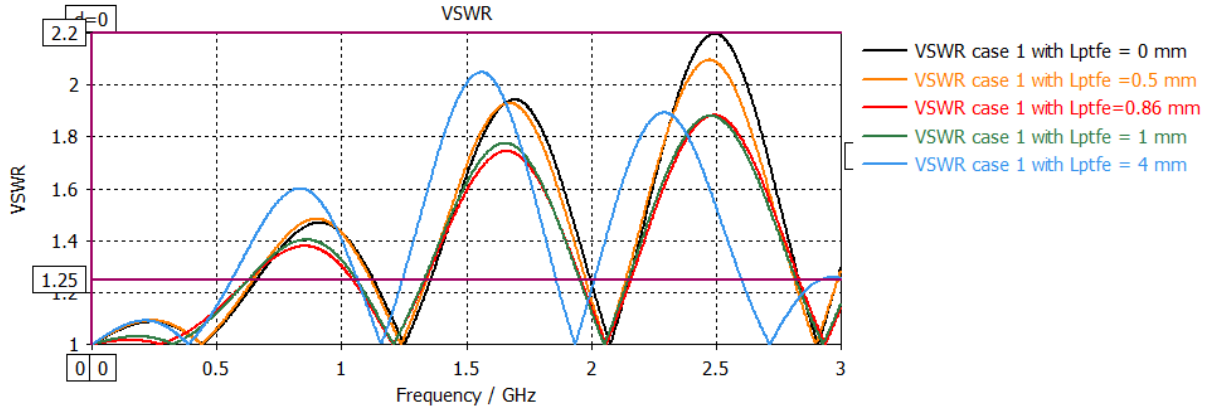
تم إعادة تصميم الحالة 1 (case 1) من بارك [8] لكن مع استبدال المنفذ الهوائي بمنفذ تفلوني 7 mm وإدخال جزء من التفلون الى داخل المخروط.

تم محاكاة الخلية الجديدة CHA وقياس الخصائص الكهرومغناطيسية للخلية اول مرة بدون ومع ادخال تفلون الى المخروط ومحاكاة اطوال مختلفة للتفلون داخل المحول المخروطي (0.5 mm، 1 mm، 4mm، 7mm، 13mm، 19mm، 25mm، 31.4mm)، الشكل 63.

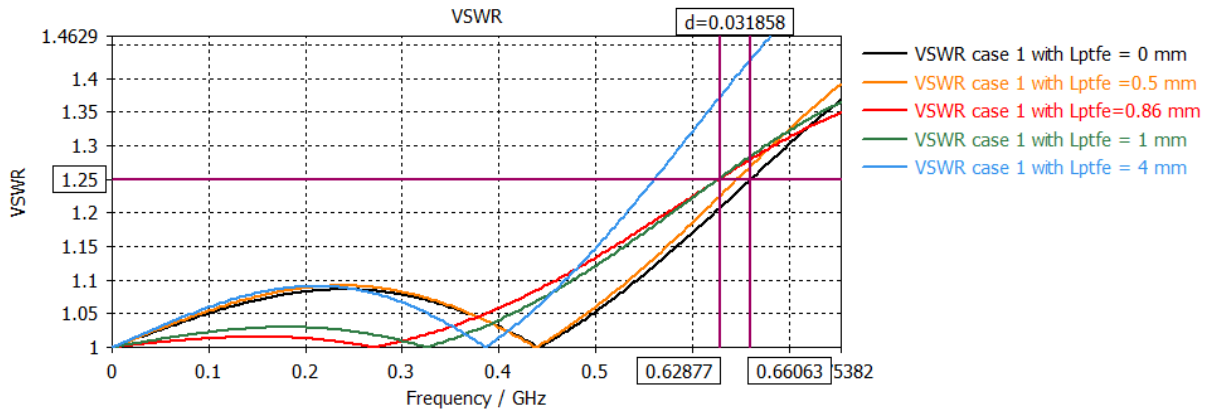


الشكل 63- الحالة 1 (case 1) من بارك أي المعيار الأساسي القصير مع اطوال مختلفة للتفلون ضمن المخروط CHA
 (a): بدون ادخال التفلون الى داخل المخروط (b) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 0.5 \text{ mm}$ مع ادخال
 تفلون بطول $L_{ptfe} = 0.86 \text{ mm}$ (d) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 1 \text{ mm}$ (e) مع ادخال تفلون
 بطول $L_{ptfe} = 4 \text{ mm}$ (f) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 7 \text{ mm}$ (g) مع ادخال تفلون بطول
 $L_{ptfe} = 13 \text{ mm}$ (h) مع ادخال تفلون بطول $L_{ptfe} = 19 \text{ mm}$ (i) مع ادخال تفلون بطول
 $L_{ptfe} = 25 \text{ mm}$ (j) مع ادخال تفلون على كامل المخروط بطول $L_{ptfe} = 31.4 \text{ mm}$.

بعد المحاكاة كانت نتيجة VSWR لخلية CHA بدون ادخال التفلون الى المخروط ومع ادخال التفلون بأطوال مختلفة للتفلون ضمن المخروط الشكل 64 والشكل 65 وأيضاً تمت المحاكاة بدون ادخال التفلون الى المخروط.



(a)



(b)

الشكل 64 - VSWR للحالة 1 (case 1) مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة (0.5 mm، 0mm ، 0.86mm، 1 mm، 4mm) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$.

من الشكل (a، 64) كانت افضل قيمة ل VSWR عند ادخال التفلون داخل المخروط بمقدار $L_{ptfe} = 0.86\text{mm}$ غير ذلك تزداد VSWR سوءاً ومنه نجد ان ادخال التفلون داخل المخروط يحسن من قيمة VSWR وذلك عند طول معين وبعده تسوء قيمة VSWR .

بالنسبة لعرض المجال الترددي الذي تعمل عنده الخلية CHA تحت شرط $VSWR < 1.25$ نجد ان الخلية بدون ادخال التفلون الى المخروط تعمل حتى تردد 0.66 GHz ، اما عند ادخال التفلون بطول 0.86 mm فانها تعمل حتى تردد 0.62 GHz لكن عند طول 086 mm تكون $VSWR$ أفضل بكثير ضمن المجال $[0-0.37] \text{ GHz}$ وهذا يعطي قراءة أفضل لخلية القياس، الشكل (b,64).

الخلية الجديدة CHA أعطت نتائج أفضل للمعيار القصير case 1 أي تحسين.

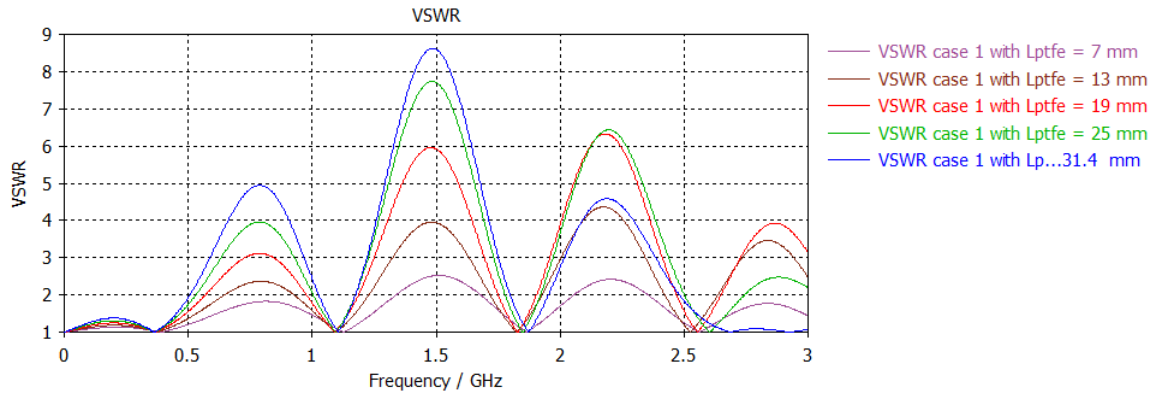
يظهر الشكل (a,65) قيمة $VSWR$ لبقية اطوال التفلون داخل المخروط

($31.4 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 19 \text{ mm}, 13 \text{ mm}, 7 \text{ mm}$)، تصبح قيمة $VSWR$ سيئة عند تعبئة كامل المخروط بمادة

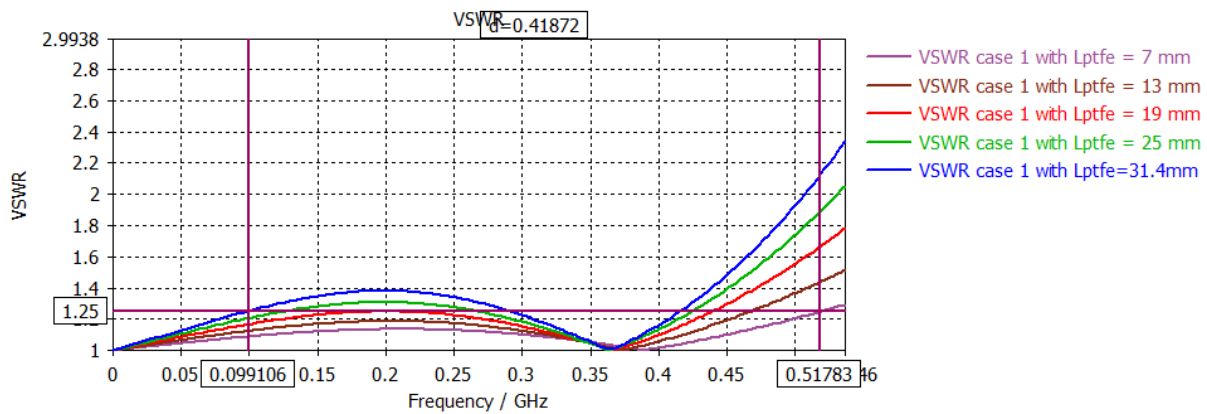
التفلون.

يظهر الشكل (b,65) أيضا ان أفضل قيمة هي اصغر طول أي 7 mm وحيث تعمل الخلية حتى تردد 0.51 GHz

وأسوء حالة عند تعبئة المخروط بالتفلون حيث الخلية بهذه الحالة تعمل حتى 0.099 GHz .



(a)



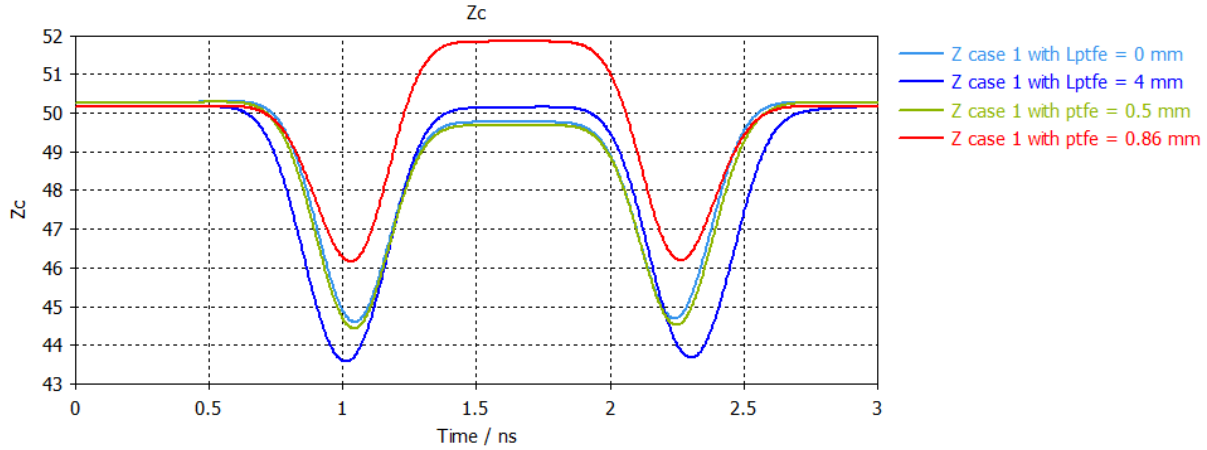
(b)

الشكل 65- $VSWR$ لخلية القياس CHA مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة ($19 \text{ mm}, 13 \text{ mm}$ ،

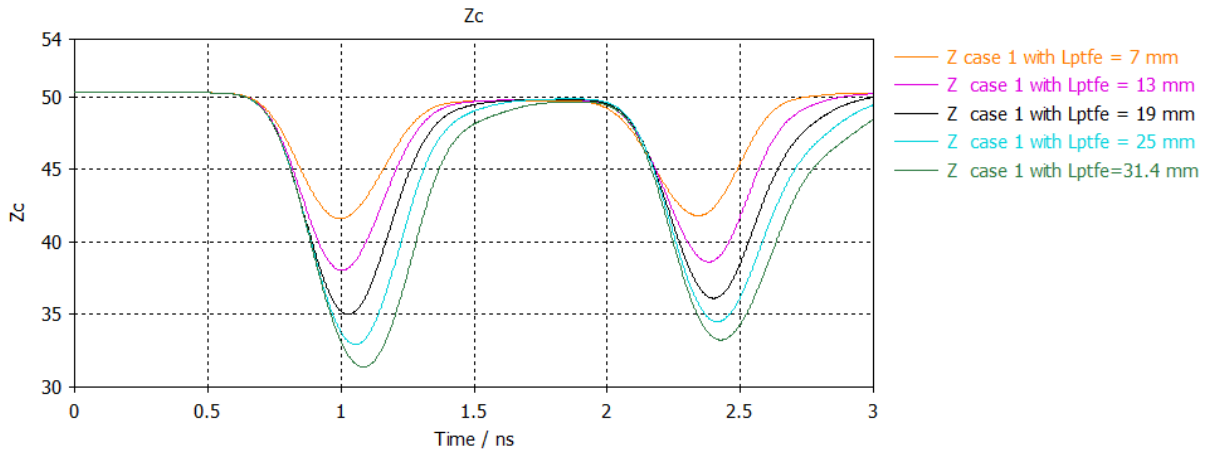
$7 \text{ mm}, 31.4 \text{ mm}, 25 \text{ mm}$) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$.

من الشكل 66 يظهر قيمة الممانعة على طول الخلية.

تكون قيمة الممانعة أفضل عند طول تفلون 0.86 mm حيث تقترب من ال 50 ohm أي توفيق أكبر للممانعة وبالتالي انعكاس أقل، من الشكل 67 يظهر قيمة الممانعة على طول الخلية حيث يكون التوفيق أفضل هنا عند الطول الأقل أي عند $.7 \text{ mm}$.



الشكل 66- الممانعة على طول خلية القياس CHA ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة.

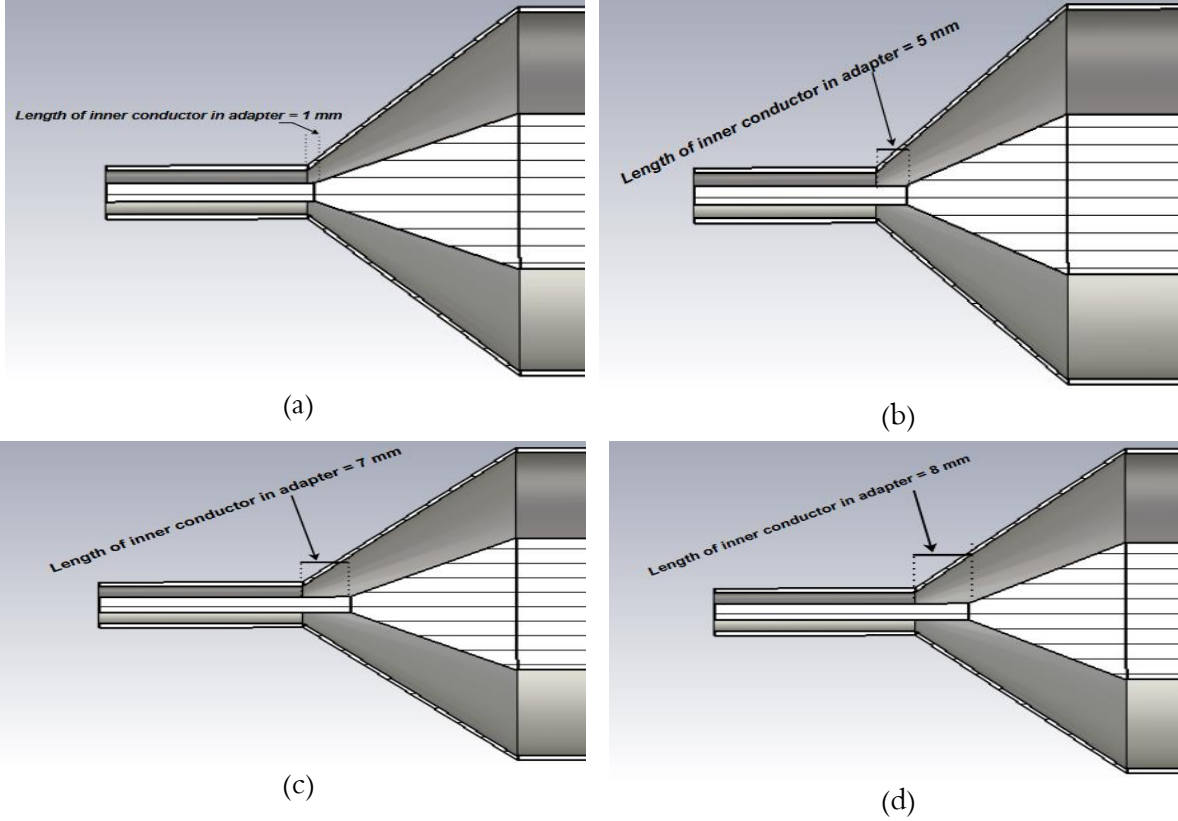


الشكل 67- الممانعة على طول خلية القياس CHA مع ادخال التفلون الى داخل المخروط باطوال مختلفة.

4.3 دراسة معالجة تأثير الانقطاعات عن طريق التحكم بطول الناقل الداخلي مع وبدون وجود التفلون

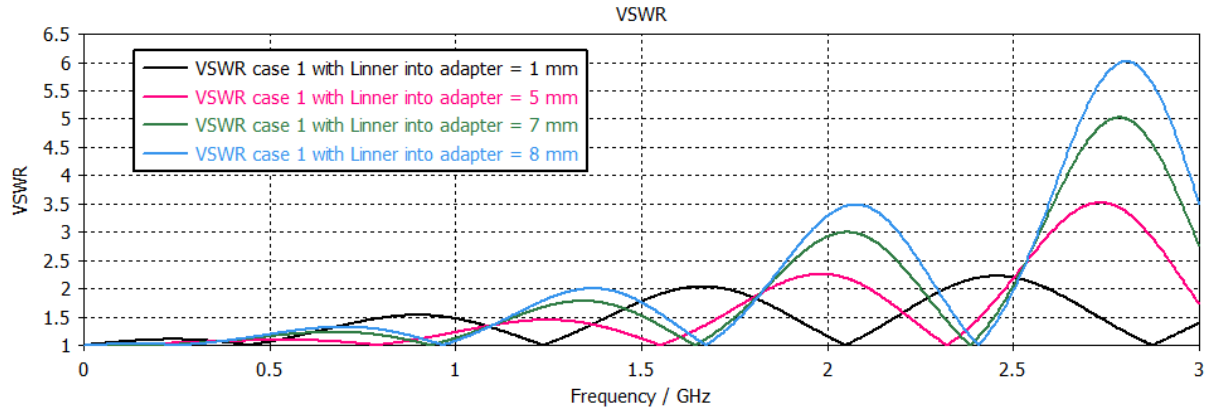
(a) محاكاة الحالة 1 (case 1) من بارك [8] مع تغيير طول الناقل الداخلي:

تم نمذجة الحالة 1 من بارك مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (1mm، 5mm، 7mm، 8mm)، الشكل 68.

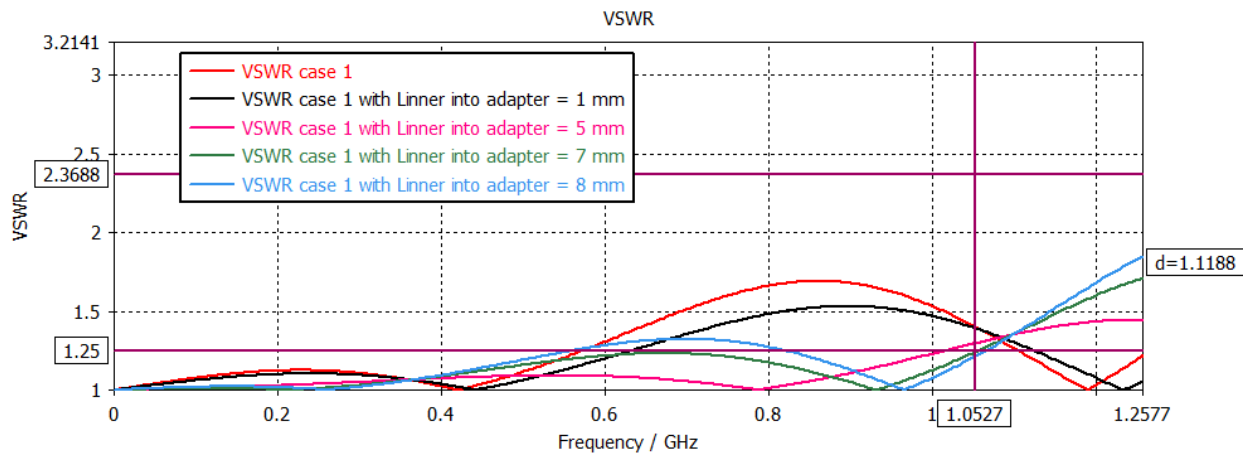


الشكل 68- الحالة 1 (case 1) من بارك أي المعيار الأساسي القصير مع اطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط Length of inner conductor in adapter: (a) 1mm (b) 5mm (c) 7mm (d) 8mm.

يظهر الشكل (a,69)، VSWR للخلية مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (1mm، 5mm، 7mm، 8mm)، أفضل قيمة ل VSWR كانت عند ال 5mm. اما بالنسبة لمجال العمل أي $VSWR < 1.25$ فان أفضل قيمة للطول كانت عند ال 7mm حيث كان المجال الترددي للخلية حتى ال 1.05 GHz، الشكل (b,69).

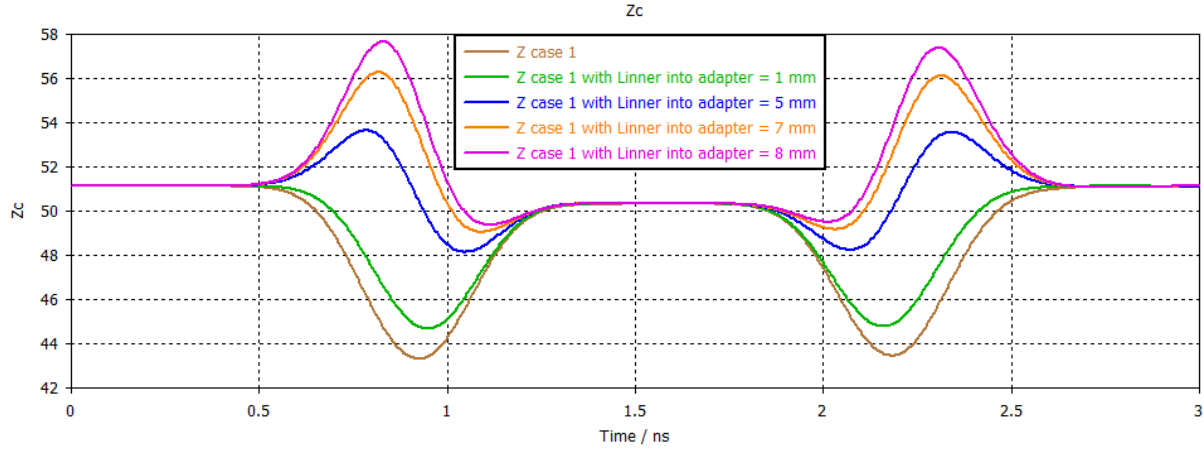


(a)



(b)

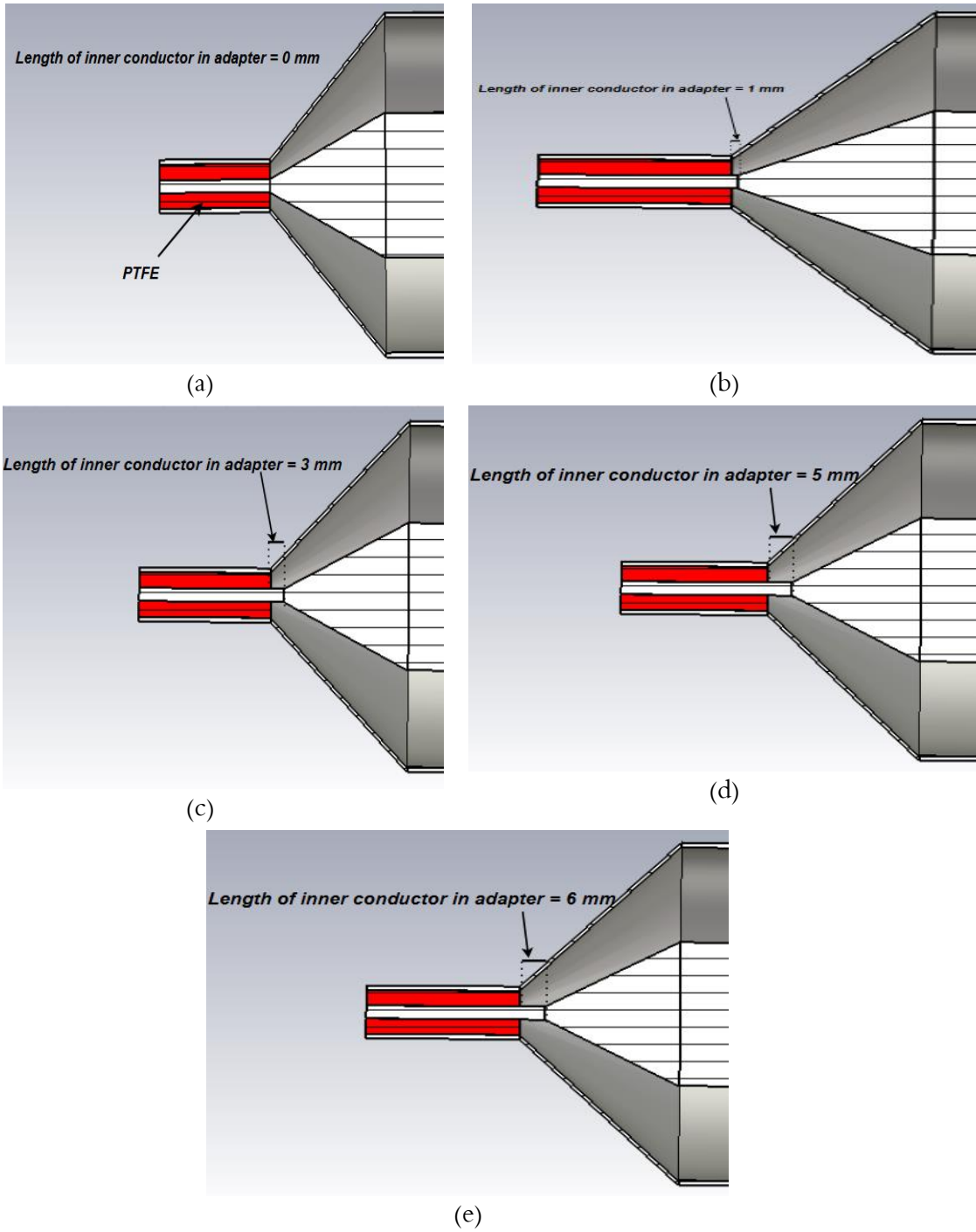
الشكل 69- VSWR على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) باطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (5 mm ، 7 mm ، 8 mm ، 1 mm) على طول المجال الترددي (a) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$. (b)



الشكل 70- الممانعة على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) بأطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (5 mm، 1mm، 8 mm، 7 mm).

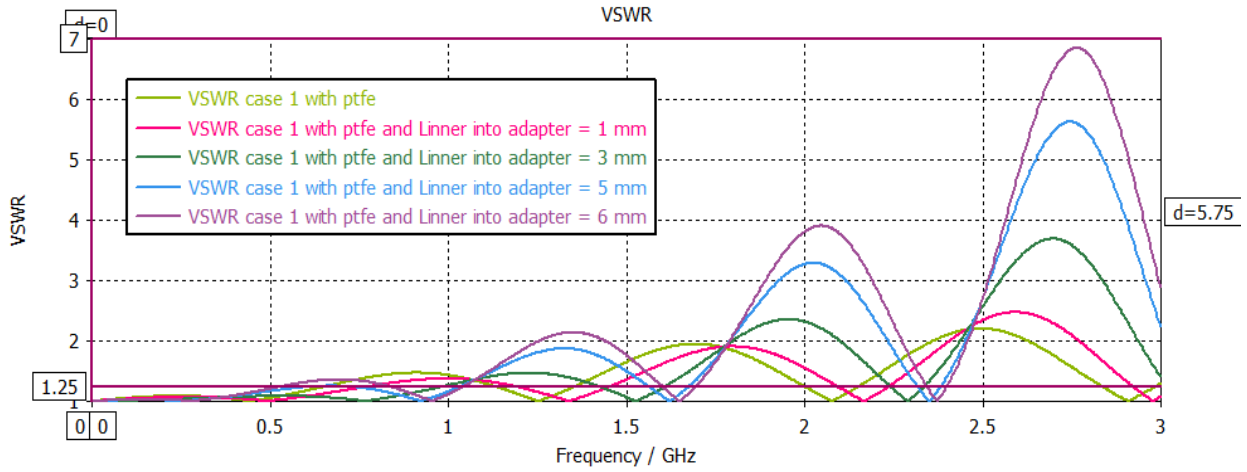
يظهر الشكل 70، الممانعة للخلية مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (8mm، 7mm، 5mm، 1mm)، أفضل قيمة للممانعة كانت عند طول الناقل الداخلي ضمن المخروط 5mm أي أقل انقطاع.

(b) محاكاة الخلية CHA مع تغيير طول الناقل الداخلي ضمن المخروط وبدون ادخال التفلون: تم نمذجة الخلية CHA مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (6mm، 5mm، 3mm، 1mm)، الشكل 71.

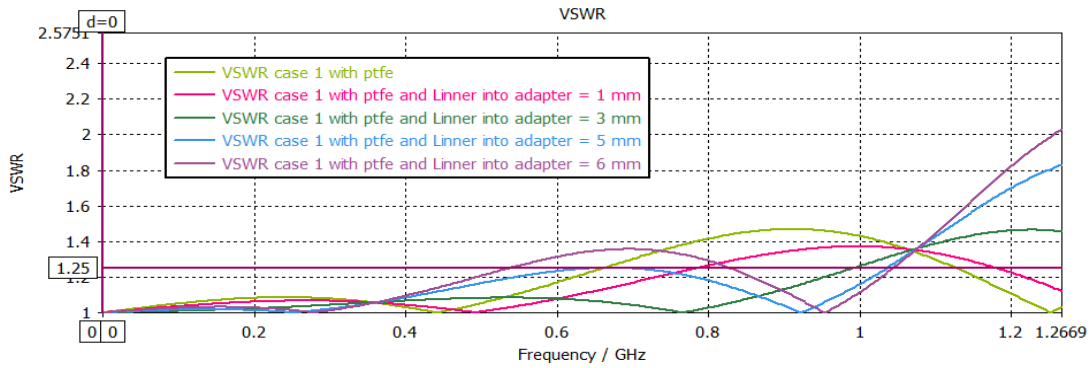


الشكل 71- الحالة 1 (case 1) من بارك بوجود التفلون مع اطوال مختلفة للناقل الداخلي ضمن المخروط (a) 0mm (b) 1mm (c) 3mm (d) 5mm (e) 6mm.

يظهر الشكل (a,72) V_{SWR} للخلية مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (6mm,5mm,3mm,1mm)، أفضل قيمة ل V_{SWR} كانت عند ال 3mm. اما بالنسبة لمجال العمل أي $V_{SWR} < 1.25$ فان أفضل قيمة كانت عند ادخال الناقل الى الداخل المخروط بمقدار 5mm حيث كان المجال الترددي للخلية حتى ال 1.035GHz، الشكل (b,69).

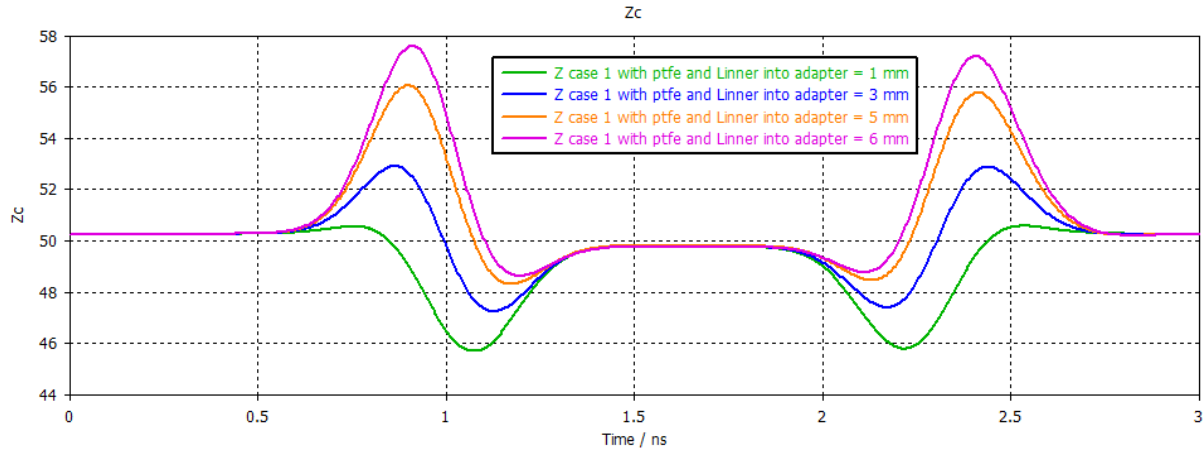


(a)



(b)

الشكل 72- V_{SWR} على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) بوجود التفلون مع أطوال مختلفة (3 mm,1mm)، (6 mm,5mm) للناقل الداخلي داخل المخروط (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $V_{SWR} < 1.25$.



الشكل 73- الممانعة على طول خلية القياس للحالة 1 (case 1) بوجود التفلون مع أطوال مختلفة (3 mm، 1mm ، 5mm، 6 mm) للناقل الداخلي داخل المخروط.

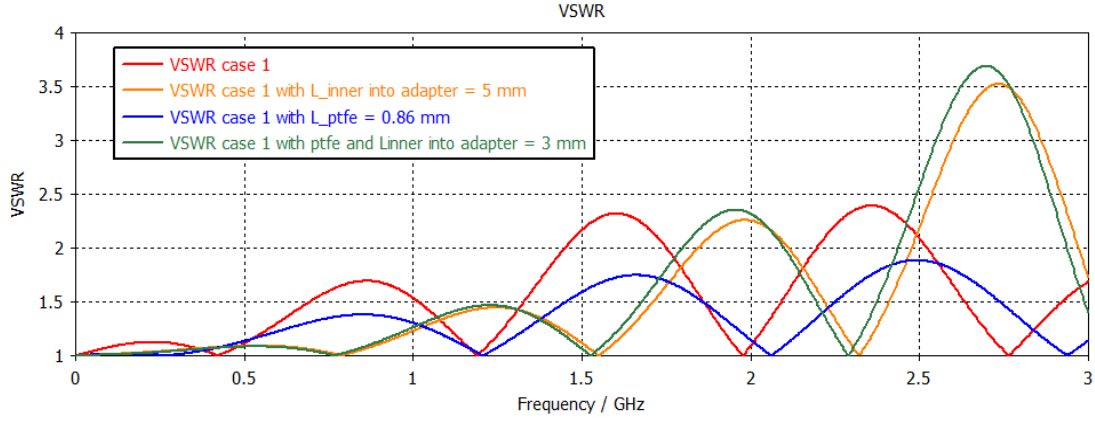
يظهر الشكل 73، الممانعة للخلية مع إدخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط بأطوال مختلفة (6mm، 5mm، 3mm، 1mm)، أفضل قيمة للممانعة كانت عند طول الناقل الداخلي ضمن المخروط 3mm أي أقل انقطاع.

5.3 مقارنة الحالات الثلاثة (خلية القياس القصيرة case 1، تغيير طول التفلون ضمن المخروط، تغيير طول الناقل الداخلي لخلية CHA ضمن المخروط بدون وجود التفلون)

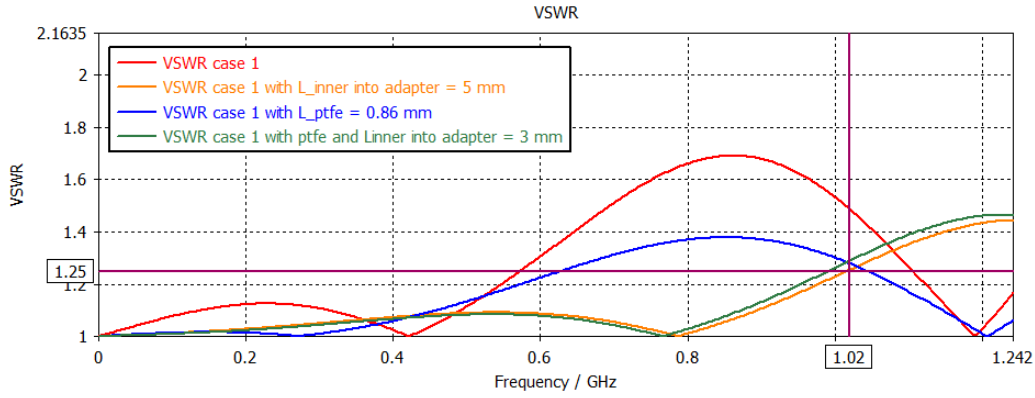
(a) مقارنة من حيث الممانعة على طول خلية القياس:

يظهر الشكل (a,74) VSWR على طول خلية القياس case1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA) ومع ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة 3mm بدون ادخال التفلون (6mm,5mm,3mm,1mm)، إن أفضل قيمة ل VSWR كانت عند ادخال الناقل الداخلي ضمن خلية case1 مسافة 5mm.

اما بالنسبة لمجال العمل أي $VSWR < 1.25$ أفضل قيمة كانت عند ادخال الناقل الداخلي ضمن خلية case1 مسافة 5mm حيث كان المجال الترددي للخلية حتى ال 1.02GHz، الشكل (b,74)

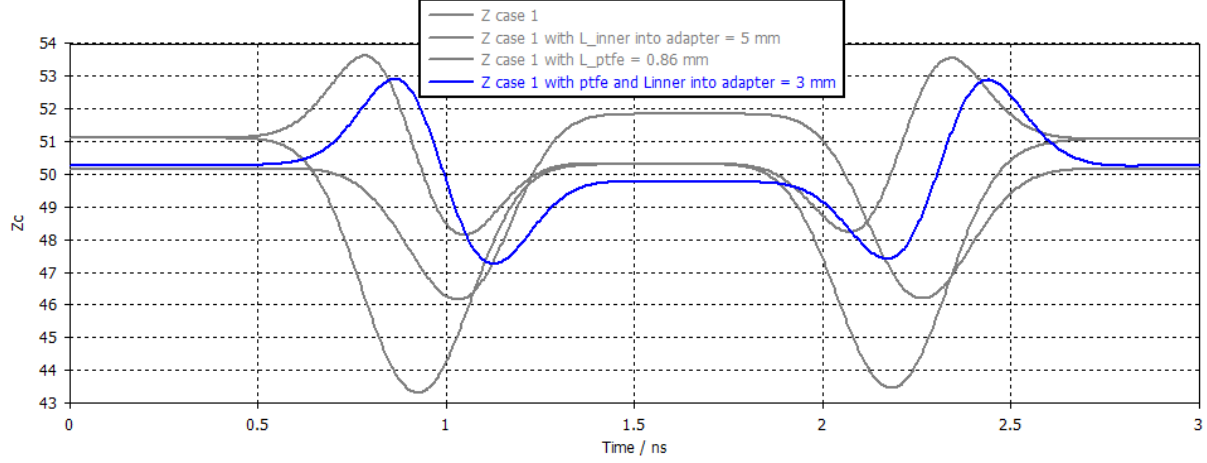


(a)



الشكل 74 - VSWR على طول خلية القياس case 1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA) ومع ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case 1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة 3mm بدون ادخال التفلون: (a) على طول المجال الترددي (b) ضمن مجال العمل أي $VSWR < 1.25$.

يظهر الشكل 75، الممانعة للخلية على طول خلية القياس case 1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA) ومع ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case 1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة 3mm بدون ادخال التفلون (1mm، 3mm، 5mm، 6mm)، أفضل قيمة كانت عند ادخال الناقل الداخلي ضمن خلية case 1 مسافة 5mm.



الشكل 75- الممانعة على طول خلية القياس case1 وبوجود التفلون ضمن المخروط طوله 0.86 mm (خلية CHA) ومع ادخال الناقل الداخلي ضمن المخروط لخلية case1 مسافة 5 mm ومع ادخال الناقل الداخلي لخلية CHA مسافة 3mm بدون ادخال التفلون.

(b) مقارنة من حيث مجال العمل على طول خلية القياس:

يظهر الجدول 5 مقارنة بين خلية case1 وخلية case1 مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل التفلون وخلية CHA مع وبدون ادخال التفلون وخلية CHA مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ وبدون تفلون ضمن المخروط.

أعطت خلية Case1 مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ لدخل المخروط أفضل قيمة من حيث المجال الترددي وخلية CHA مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط وبدون ادخال التفلون قيمة أفضل للمجال الترددي ومنه ادخال الناقل الداخلي الى داخل المخروط اعطى تحسين كبير في المجال الترددي.

الجدول 5 - مقارنة بين خلية case1 وخلية case1 مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل التفلون وخلية CHA مع وبدون ادخال التفلون وخلية CHA مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ وبدون تفلون ضمن المخروط.

الخلية	اقصى تردد تعمل عنده الخلية / GHz	طول الناقل الداخلي داخل المخروط / mm	طول التفلون داخل المخروط / mm
Case1	0.57	-	-
Case1 مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ لداخل المخروط	1.05	7	-
خلية CHA	0.62	-	0.86
خلية CHA بدون ادخال التفلون	0.66	-	-
خلية CHA مع ادخال الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المخروط وبدون ادخال التفلون	1.035	5	-

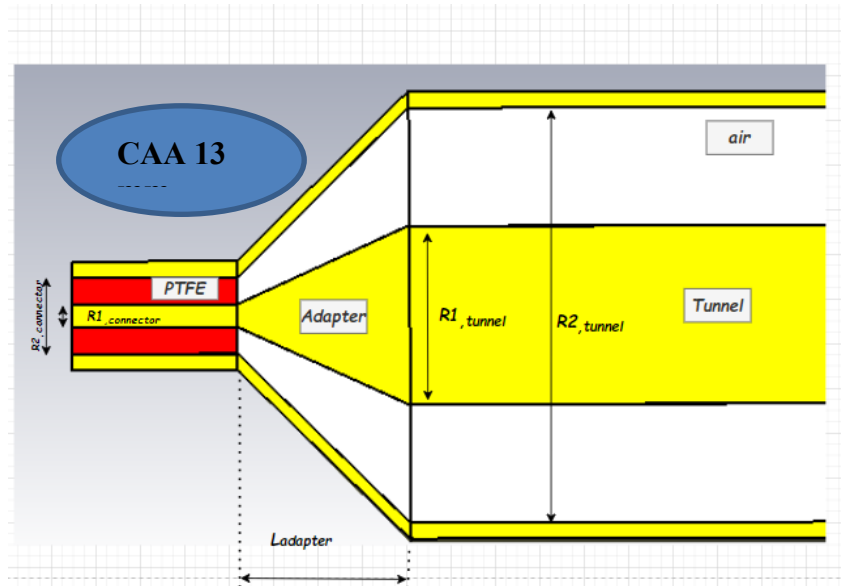
من نتائج المقارنة من اجل تخفيف الانعكاسات يجب تقليل وجود تعديل مفاجئ في ابعاد خط النقل. وجد ان الخلية التي تمتلك عازل هواء مع تغيير طول الناقل الداخلي ضمن المخروط أفضل من حيث المجال الترددي اما بالنسبة لخلية CHA الهجينة وجد ان ادخال الناقل الداخلي الى داخل المخروط وبدون ادخال التفلون اعطى نتائج قريبة من الخلية ذات العازل الهواء السابقة. وجد ايضا ان ادخال تفلون الى داخل المخروط ضمن خلية CHA اعطى تحسين في قيمة VSWR واستقرارا أفضل على كامل المجال القراءة أي [0-3]GHz لكنه لم يكن الأفضل من حيث المجال الترددي تحت شرط $VSWR < 1.25$.

6.3 الخلية المخروطية 13mm

في هذا الجزء من العملي تمت نمذجة خلية القياس المخروطية 13mm وتطبيق التحسينات عليها.

1.6.3 خلية القياس 13mm مع منافذ تفلون ومحول مخروطي من الهواء (CAA 13 mm) Conical Air Adapter 13mm

يوضح الشكل 76 خلية قياس ثابت العازلية الكهربائي والسماحية المغناطيسية ذات المنافذ التفلون CAA 13 mm مع بارامترات التصميم حيث تم استبدال منفذ الهواء بمنفذ تفلون من نوع 7mm.



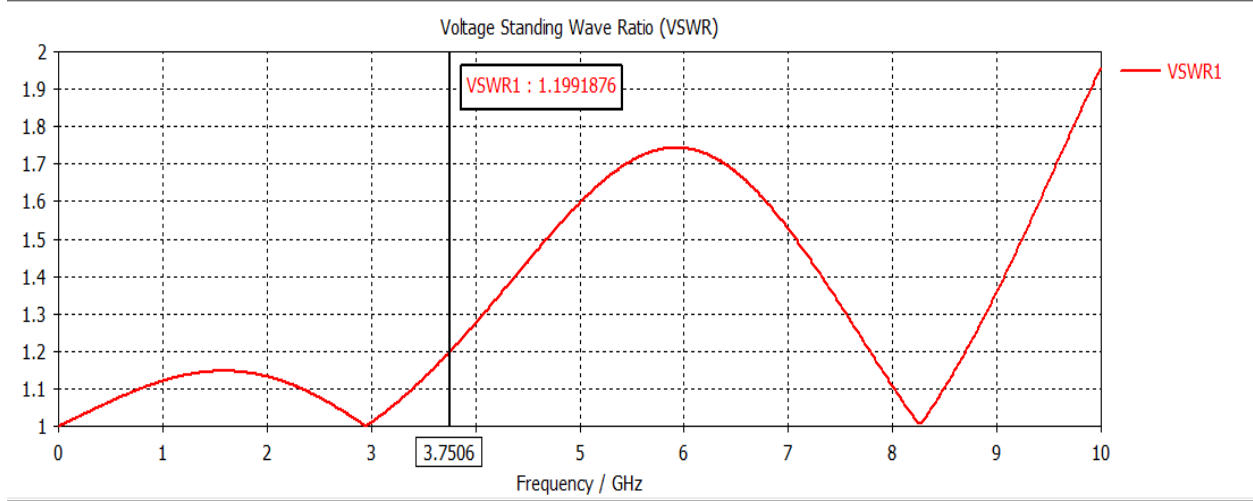
الشكل 76- خلية CAA 13 mm.

يوضح الجدول 6 الأبعاد بال mm.

الجدول 6- أبعاد خلية CAA 13 mm.

parameter	dimension / mm
$R_{1,connector}$	7
$R_{2,connector}$	2.09
$R_{1,tunnel}$	5.65
$R_{2,tunnel}$	13
$L_{adapter} = L_{conical}$	10
L_{tunnel}	4.6

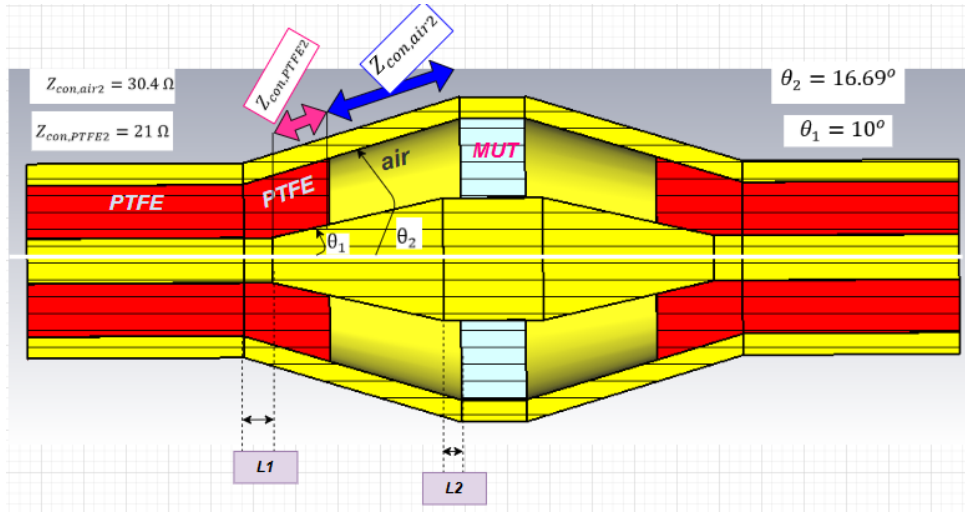
بعد المحاكاة كانت VSWR للخلية CAA 13 mm شكل 77، حيث أن الخلية قبل التحسين تعمل حتى تردد 3.7506 GHz.



الشكل 77- VSWR خلية CAA 13 mm.

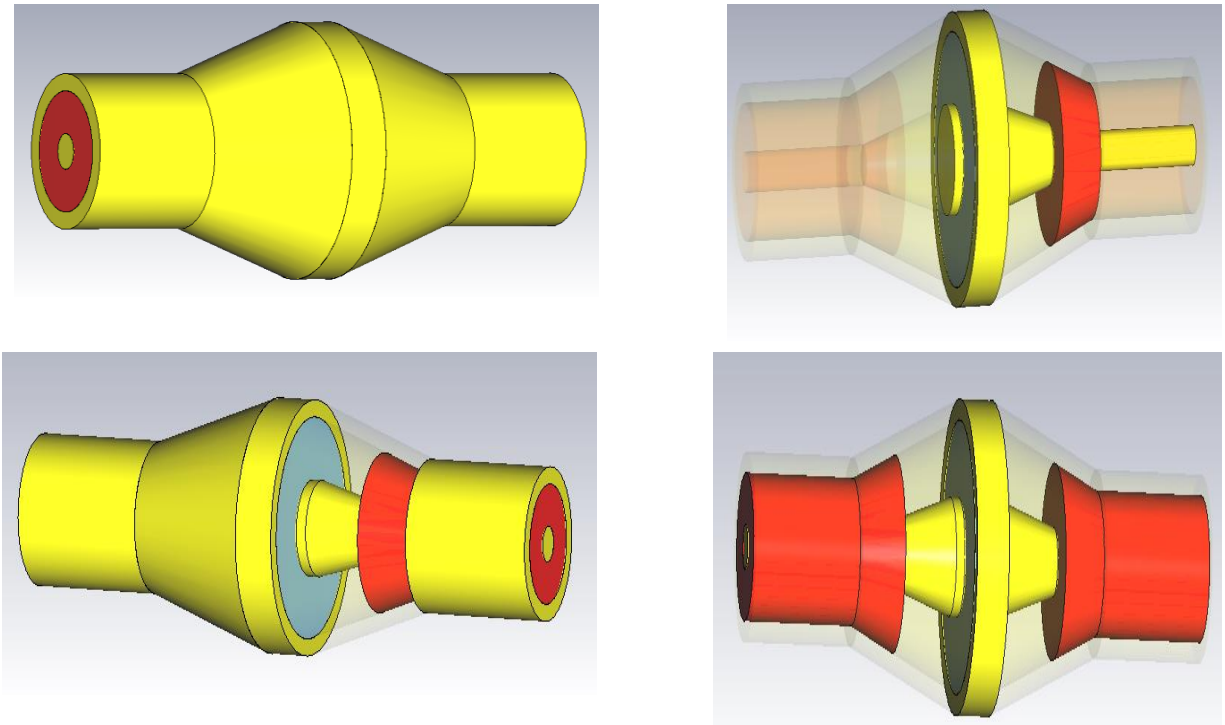
2.6.3 خلية القياس 13mm مع منافذ تفلون ومحول مخروطي هجين من التفلون والهواء Conical Hybrid Adapter 13mm (CHA 13 mm)

تم تصميم خلية 13mm النهائية من التحسين الأخير لخلايا CHA الهجينة، حيث تم تهجين المحول المخروطي من مادتين الأولى الهواء والثانية التفلون مع تغيير نقاط الانقطاع المفاجئ في الممانعة (L1، L2) وكان الشكل النهائي لخلية القياس CHA 13 mm، الشكل 78.



الشكل 78- خلية القياس 13mm CHA.

من أجل رؤية أجزاء الخلية تم وضع منظور لخلية القياس 13 mm CHA، الشكل 75.



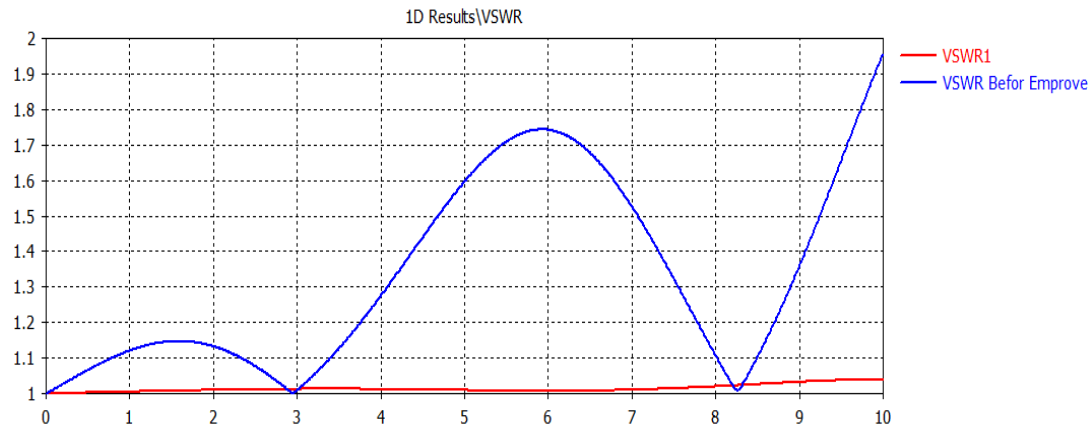
الشكل 79- منظور يمثل أجزاء خلية 13 mm CHA.

الجدول 7 يبين بارامترات تصميم خلية 13 mm CHA.

الجدول 7- بارمترات تصميم CHA 13 mm.

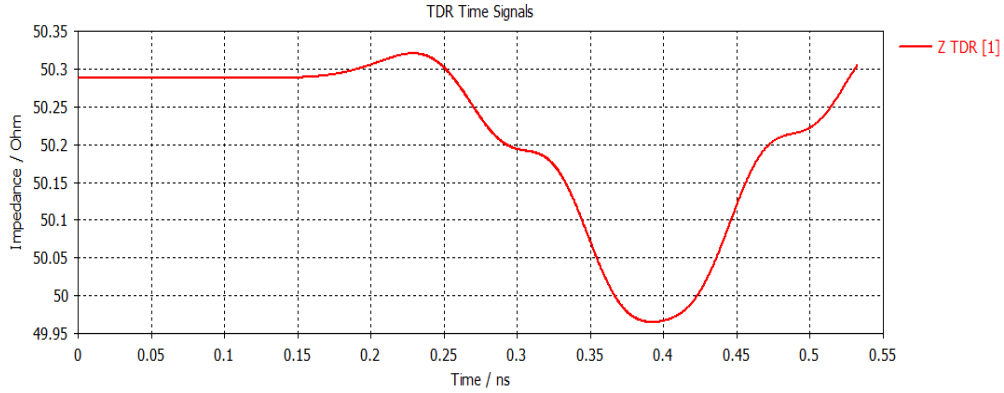
parameter	dimension / mm
$R_{1,connector}$	7
$R_{2,connector}$	2.09
$R_{1,tunnel}$	5.65
$R_{2,tunnel}$	13
$L_{adapter}$	3.95
L_{tunnel}	4.6
L_1	1.3
L_2	0.8
$L_{conical}$	10

بعد إجراء المحاكاة كانت نتيجة VSWR الشكل 80، حيث نلاحظ التحسين الكبير بالنسبة لمعامل العبور لخلية CHA 13mm مقارنة بخلية CAA 13 mm.



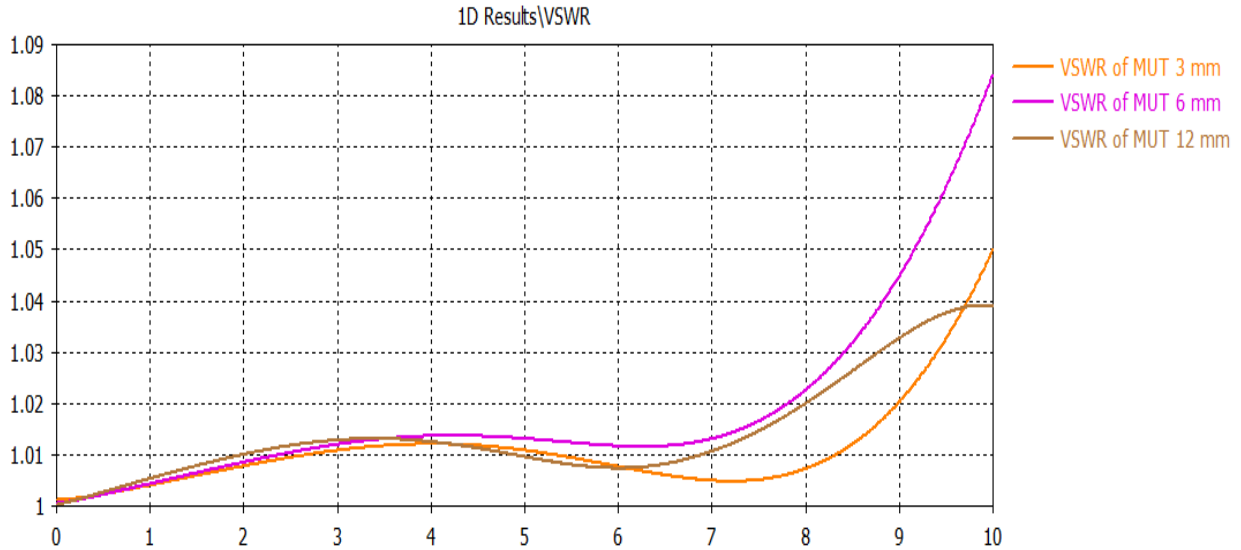
الشكل 80- VSWR للخلية CAA 13 mm والخلية CHA 13 mm (قبل وبعد التحسين).

الشكل 81 يوضح تغيرات الممانعة الموجية على طول خلية القياس ونلاحظ اقتراب القيمة الموقفة للممانعة عند نقاط الانقطاع الذي بدوره ينقص قيمة VSWR أي اقل انعكاس حيث ان قيمتها تراوحت بين 50.4 اوم و 49.8 اوم وهذا جيد.



الشكل 81- الممانعة الموجية على طول خلية القياس CHA 13 mm.

الشكل 82 يوضح VSWR لخلية القياس CHA 13 mm حيث ان المنحنيات الثلاثة لخلايا قياس تختلف بطول حامل العينة (3mm، 6 mm، 12 mm) حيث نلاحظ أن VSWR عند الترددات المنخفضة متقاربة حتى 3 GHz بعدها تستقر نسبيا حتى تردد 6 GHz حيث بعدها تبدأ بالارتفاع أي عند الترددات العالية. نلاحظ أن VSWR أقل من 1.02 حتى تردد 8GHz وأقل من 1.01 حتى تردد 2 GHz وبشكل عام على كامل المجال الترددي أقل من 1.09.

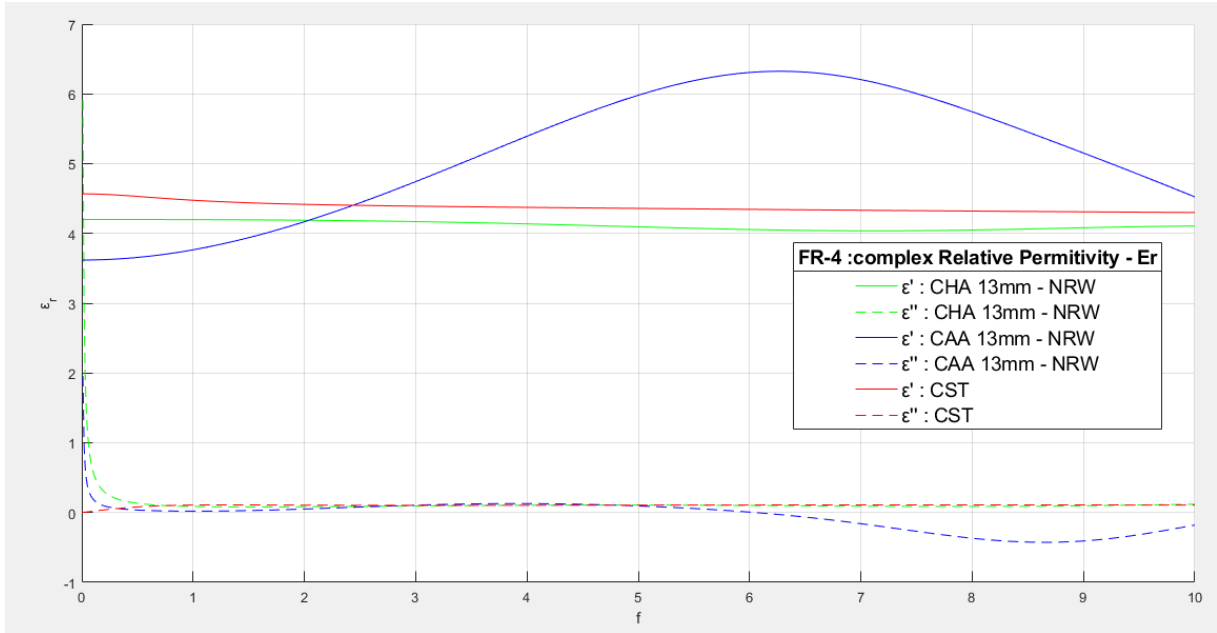


الشكل 82- VSWR لخلية القياس CHA 13 mm مع اطوال مختلفة لحامل العينة.

3.6.3 قراءة ثابت العازلية الكهربائي

لمعرفة تأثير تحسين المجال الترددي لخلية القياس تم قراءة ثابت العازلية الكهربائي لمادة (FR-4) بواسطة الخوارزمية الحسابية (NRW) في كلا الخليتين CAA 13 mm و CHA 13 mm لحامل عينة 6 mm. يبين الشكل 83 قراءة الخوارزمية لثابت العازلية الكهربائي قبل تحسين الخلية (CAA 13 mm) المنحني الأزرق وبعد تحسين الخلية (CHA 13 mm) المنحني الأخضر وتم المقارنة مع قراءة برنامج CST 2021 حيث يوفر البرنامج قراءة الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد.

من الشكل نلاحظ هامش الخطأ الكبير في خلية CAA 13 mm مقارنة مع قراءة CST 2021 حيث أن قيمة الخطأ 1.8 تقريبا بينما قراءة خلية CHA 13 mm أفضل أظهرت ثبات في قراءة قيمة ثابت العازلية الكهربائي وقد تكون أفضل حتى من قراءة برنامج CST 2021 لان البرنامج يصف الخصائص الكهرومغناطيسية للعينة بغض النظر عن خلية القياس (موصفة كهربيسيا مسبقا).



الشكل 83- ثابت العازلية الكهربائي لمادة FR-4 باستخدام خوارزمية NRW قبل التحسين (CAA 13 mm) وبعد التحسين (CHA 13 mm) حامل عينتهما 3mm في برنامج ماتلاب.

7.3 خاتمة

في ختام هذا الفصل، يمكن القول إن نتائج الدراسة أظهرت بوضوح التأثير الكبير لتغيير مناطق الانقطاع المفاجئ على قيمة الممانعة على طول خط النقل، حيث أدى هذا التعديل إلى تقليل الانعكاسات الكلية، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على أداء خلية القياس ككل.

تم اتباع ثلاث طرق من اجل دراسة إمكانية زيادة المجال الترددي لخلية القياس.

الطريقة الأولى كانت بتغيير نصف قطر قاعدة المحول المخروطي لخلية الحالة 2 (فقرة 3.2.4) حيث أصبحت خلية القياس قادرة على القياس على كامل المجال الترددي $[0-3]GHz$.

الطريقة الثانية كانت بنمذجة ومحاكاة خلية القياس CHA ثم إدخال التفلون الى داخل المحول المخروطي، كان المجال الترددي لها $[0-0.66]GHz$.

الطريقة الثالثة كانت بإدخال جزء من الناقل الداخلي للمنفذ الى داخل المحول المخروطي، كان المجال الترددي لخلية القياس $[0-1.035]GHz$.

مما سبق نستنتج ان الطريقة الأولى كانت الأفضل من حيث بساطة التصميم والمجال الترددي.

لم يكن ادخال التفلون الى داخل المحول المخروطي مجدياً كثيراً لكنه اعطى استقراراً في قيمة VSWR الشكل (74,a) على المجال $[0-3]GHz$ هذا الاستقرار مفيد في قراءة الخلية.

تم تطبيق النماذج السابقة على خلية قياس ثابت العازلية الكهربائي، ونتج عن ذلك تطوير خلية جديدة CHA 13mm ذات معامل انعكاس منخفض للغاية حيث كانت VSWR أقل من 1.02 حتى تردد 8GHz وأقل من 1.01 حتى تردد 2 GHz وبشكل عام على كامل المجال الترددي أقل من 1.09، الأمر الذي أدى إلى تحسين دقة القياس دون الحاجة إلى تعديل الخوارزمية الحسابية المستخدمة.

الخاتمة والافاق المستقبلية

في ختام هذا البحث، يمكننا التأكيد على أن العمل المقدم يمثل مساهمة علمية نوعية في مجال تصميم خلايا القياس الكهرومغناطيسية، وذلك من خلال تطوير نماذج مبتكرة باستخدام برنامج المحاكاة CST، والتحقق من كفاءتها وموثوقيتها عبر سلسلة من التجارب والمحاكاة الدقيقة. ان تغيير نصف قطر قاعدة المحول المخروطي الحالة 2 الأفضل من حيث القراءة على كامل المجال الترددي حيث تم تحسين خلية بارك.

لم يكن ادخال التفلون الى داخل المحول المخروطي مجددا كثيرا (خلية CHA) لكنه اعطى استقرارا في قيمة VSWR على المجال [0-3]GHz هذا الاستقرار مفيد في قراءة الخلية. تم تطبيق هذا النموذج على خلية قياس ثابت العازلية الكهربائي، ونتج عن ذلك تطوير خلية جديدة CHA 13mm ذات معامل انعكاس منخفض للغاية، الأمر الذي أدى إلى تحسين دقة القياس دون الحاجة إلى تعديل الخوارزمية الحسابية المستخدمة، مما يعزز من موثوقية النتائج ويقلل من هامش الخطأ في التطبيقات العملية. انطلاقاً من هذه النتائج المشجعة، تفتح الدراسة آفاقاً بحثية متعددة يمكن استثمارها في المستقبل، من أبرزها دراسة الأنماط التي تظهر فوق تردد عمل الخلية القياسي، مع التركيز على تقنيات كبت الأنماط غير المرغوبة التي قد تؤثر سلباً على دقة القياس. وتوسيع نطاق التطبيقات واستكشاف إمكانية استخدام الخلية المطورة في قياسات المواد ذات العازلية الكهربائية عند ترددات غير مقاسة، بما يخدم مجالات مثل الاستشعار الصناعي والطب الحيوي. إن هذه الدراسة تمثل خطوة مهمة نحو تطوير أدوات قياس أكثر دقة ومرونة، وتفتح المجال أمام أبحاث مستقبلية قد تسهم في إحداث نقلة نوعية في تقنيات القياس الكهرومغناطيسي.

المراجع

- [1] H. J. Kwon, H. D. Choi, J. I. Choi and J. G. Yook, "Development of Apparatus for Measuring Electromagnetic Shielding Effectiveness at GHz Frequency Band," 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISEMC.2007.180.
- [2] A. Tamburrano, D. Desideri, A. Maschio and M. Sabrina Sarto, "Coaxial Waveguide Methods for Shielding Effectiveness Measurement of Planar Materials Up to 18 GHz," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 6, pp. 1386-1395, Dec. 2014, doi: 10.1109/TEMC.2014.2329238.
- [3] Soyaslan, D., Çömlekçi, S., & Göktepe, Ö. (2010). Determination of electromagnetic shielding performance of plain knitting and 1X1 rib structures with coaxial test fixture relating to ASTM D4935. The Journal of The Textile Institute, 101(10), 890–897. <https://doi.org/10.1080/00405000902945360> .
- [4] Y. Yamaguchi and Y. Sato, "Measuring method of complex dielectric constant with monostatic horn antenna in W-band using multiple distance measurements and analysis," 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017, pp. 666-669, doi: 10.1109/APMC.2017.8251534.
- [5] R. Valente, C. De Ruijter, D. Vlasveld, S. Van Der Zwaag and P. Groen, "Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz," in IEEE Access, vol. 5, pp. 16665-16675, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2741527.
- [6] Philippe Pouliguen and Pierre Sabouroux, "Electromagnetic Characteristics Measurement Setup at Variable Temperatures Using a Coaxial Cell", Volume 2019 .
- [7] Ali Al Takach, Franck M. Moukanda2, Fabien Ndagijimana, Mohammed Al-Husseini, and Jalal Jomaah,
- [8] Design of compact transition from conical to coaxial transmission lines with a low return loss, Hyun Ho Park, School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Suwon, Hwaseong, Republic of Korea, doi.org/10.1080/00207217.2020.1870739 .
- [9] Issa M. Mashriki1, S.M.J. Razavi2, S.H.M. Armaki2, "Design, Fabrication and Parametric Study of Bulk Current Injection Probe and Its Calibration Fixture", Journal of Communication Engineering, Vol. 9, No. 1, January-June 2020 .
- [10] A V Demakov and M E Komnatnov 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 734 012077.
- [11] P. G. de Francisco, D. Poyatos Martinez, B. P. Gallardo, D. Escot Bocanegra and S. F. Romero, "Limitations in the Measurement of the Shielding Effectiveness of Aeronautical Multiply CFC Laminates," 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Barcelona, Spain, 2019, pp. 662-667, doi: 10.1109/EMCEurope.2019.8872136.
- [12] K. Mal, S. Kumar, G. Rodrigues, and R. Singh, "Study and improvements of a radially coupled coaxial Fast Faraday cup design toward lower intensity beams", AIP Advances 12, 125223 (2022).

- [13] Floriane Sparma, Sarah Sennoun, and Pierre Sabouroux, “Detection of Water Content in Honey by Electromagnetics Characterization Measurements” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 111, 1–7, 2023.
- [14] Han-Hee Lee, Sang-Wook Yoon, Haeseong Lee, Jung Soo Kim, Jae-Wook Lee, “Development of a Sample Preparation Method and Coaxial Jigs to Measure the Shielding Effectiveness of SWCNTs” , doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.1.36.
- [15] Sivakumar, R.; Azemi, S.N.; Yengseng, L.; Yeow You, K.; Jack Soh, P. A Free Space Material Measurement System. *Preprints 2023*, 2023060505.
- [16] Zva, S.; Znb, S. Measurement of Dielectric Material Properties Application Note Products. Available online: *Measurement of Dielectric Material Properties | Rohde & Schwarz*.
- [17] Edward J. Rothwell, Jonathan L. Frasc, Sean M. Ellison, Premjeet Chahal, and Raoul O. Ouedraogo, “Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials” , *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 157, 31–47, 2016.
- [18] Élodie Georget, Redha Abdeddaim, Pierre Sabouroux, “A quasi-universal method to measure the electromagnetic characteristics of usual materials in the microwave range” , 1631-0705/© 2014 Académie des sciences.
- [19] Guillermo Gonzalez, “MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIERS ANALYSIS AND DESIGN , second Edition”.