

# خصائص العزل المتعلقة بالحجم لسماكات مختلفة من السيليكون تحت الإجهاد الكهربائي المتناوب العالي من الانفراغات الجزئية

د/م : علي بديع خضور

أستاذ الهندسة الكهربائية المساعد - جامعة تشرين ، سوريا  
alikhadd@aloola.sy . P.O. Box: 2223-Lattkia-Syria

## الملخص:

يتطرق البحث إلى دراسة معمقة في الخصائص الحجمية للعازلية السيليكونية من خلال التركيز على ماهية العلاقة بين عامل الضياع و ثابت العازلية من جهة و بين حجم العازلية المجهدة بالحقل الكهربائي من جهة أخرى. و تخلص الدراسة إلى إثبات تأثر خصائص العزل الحجمية و خصوصاً عامل الضياع بحجم العازلية كما أنه تم التعبير عن هذه الظاهرة من خلال موديل رياضي تجريبي. و تعزز هذه الدراسة بنتائجها عملية التحري عن جودة العازلية الكهربائية كميّاً و نوعياً.

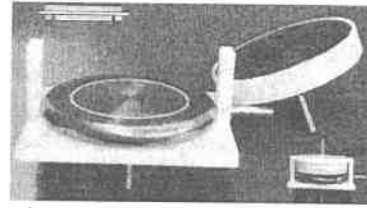
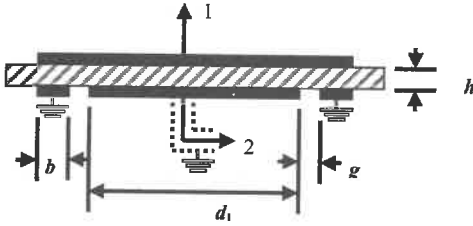
**الكلمات المفتاحية:** عامل الضياع، ثابت العزل، حجم العازلية، شدة الحقل، انفراغات جزئية.

## 1- مقدمة:

تعتبر خصائص العزل الحجمية و بالأخص لأجل العازلية السليبية غير الفعالة (المستخدمة لفصل الكمون) و المثلة للخصائص الماكروسكوبية و في مقدمتها ثابت العزل و عامل الضياع من أهم البارامترات المعبرة عن جودة عازل ما و مدى ملائمة للاستخدام في تطبيقات التوتر العالي خصوصاً. لذلك حاولنا في هذه الدراسة تسليط الضوء تجريبياً على طبيعة و ماهية علاقة البارامترات المذكورة بحجم العازلية و هل هناك إمكانية لاستنباط قانون رياضي يجسد هذه العلاقة. و في هذا السياق تم إجراء الاختبارات التالية تحت شروط محددة مسبقاً، فشذات الحقل الأعظمية المطبقة تراعي التوتر الأعظمي المسموح لكل سماكة من سماكات العزل المستخدمة في البحث. و حتى يكون بالإمكان شرح علاقة عامل الفقد أو الضياع ( $\tan \delta$ ) و ثابت العزل النسبي ( $\epsilon_r$ ) بسماكة العينات أو بالأحرى بحجمها سواء في حالة التجربة المتواصلة (تحت توتر ثابت) أو في حالة طريقة

رفع التوتر، فقد تم في هذا البحث الحصول على النتائج المرتبطة بتأثير سماكة العينات و بالتالي حجمها على عامل الضياع و ثابت العزل اعتماداً على اختبار بارامترات جديدة و في مقدمتها ( $R$ ) و  $\chi$  و  $C_0$  و الحجم و الدارات المكافئة و قبل كل شيء قانون تضخيم عامل الضياع التجريبي الجديد). و ذلك اعتماداً على التمثيل البياني و التجريبي الجديد و النوعي للبارامترات السابقة الذكر [3] [4] [5] [6].

**٢- تصميم نظام أقطاب توتر عالي بحلقات حماية لقياس الخصائص الحجمية:**  
حتى الآن تستخدم في مخابر التوتر العالي أنظمة أقطاب بحلقات حماية و التي صممت أساساً وفقاً للمعيار 4-Teil 303-VDE أي يسمح باستخدامها فقط في مجال التوتر المنخفض (أي حتى 1kV). و حسب اختبارات تجريبية فإن هذا النوع من نظام الأقطاب يظهر انقراغات جزئية كهربائية لأجل توترات مطبقة أكبر من 1kV. و تلافياً للسليبات السابقة فقد قمنا بتصميم نظام أقطاب جديد لا يظهر انقراغات جزئية (Partial-discharges-free) على الأقل حتى توترات تصل إلى 9kV.



A)

B)

الشكل ١ : A التمثيل التخطيطي لنظام أقطاب بحلقات حماية. B نظام الأقطاب الحقيقي.  
١ إلى مولد التوتر. ٢ إلى جهاز القياس. b حلقة حماية (18mm). g شق حماية (2mm).  $d_1$  القطب المحمي (90mm). h عينة الاختبار السيليكونية (2,2mm).

و الغاية الرئيسية من ذلك هو تلافي أخطاء القياس التي كانت ستسببها الإنقراغات الجزئية. حيث يتوجب لاحقاً أن تتم قياسات ثابت العزل بنظام كهذا كعلاقة مع إجهاد التوتر (الإجهاد الحقلي) لفترة طويلة نسبياً. مع العلم أن تم أثناء التصميم مراعاة الخطوط العريضة لمبادئ المعيار VDE. علماً أنه تم أيضاً أثناء التصميم مراعاة التدابير الآتية:

- المسافة بين الأقطاب h أصغر من عرض حلقة الحماية b.

- عرض شق الحماية g أصغر من المسافة بين الأقطاب h بهدف تحسين التجانس.
- السعة  $C_0$  لنظام الأقطاب الهوائي كبيرة نسبياً (الأفضل أكبر من 20pF وذلك لتسهيل عملية قياس التيار عند توترات صغيرة).
- عدم احتواء نظام الأقطاب أي حاف معدنية حادة ويتم ذلك بتدوير الحواف المعدنية.
- استخدام أقطاب متناظرة و دائرية الشكل مزودة بحلقات حماية.

### ٣- الموديل الرياضي:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

$$\tan \delta = w \cdot R_4 \cdot C_4 = w \cdot R \cdot C_x = \frac{w \cdot C_x}{\chi}$$

$$A = (d_1 + g)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 66,47 \text{ cm}^2$$

$$C_x = C_n \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

سعة نظام الأقطاب في الهواء (سعة الفراغ):

$$C_0 = 0,06954 \cdot \frac{(d_1 + g)^2}{h} = 26,75 \text{ pF} > 20 \text{ pF}$$

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \cdot h$$

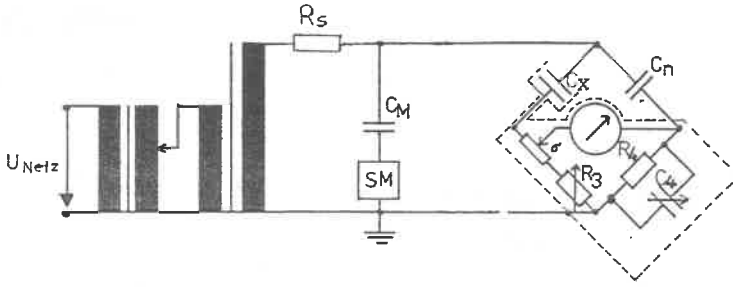
$$R = \frac{1}{\chi} = \frac{\tan \delta}{w \cdot C_x} = R_3 \cdot \frac{C_4}{C_n}$$

### ٤- الموديل التجريبي:

#### ٤-١ دائرة القياس:

في كل مرحلة قياس يتم التأكد من أن الدارة بما فيها جسم الاختبار خالية تماماً من الانفراغات

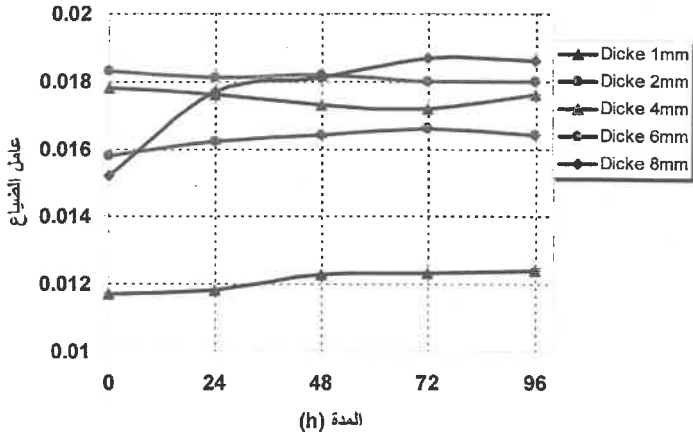
الجزئية الكهربائية وذلك بواسطة جهاز قياس الانفراغات الجزئية (TEM) والذي يمكن وصله على التوازي مع جسر القياس عن طريق مكثف ربط و رباعي أقطاب وذلك بما يتناسب مع المعيار IEC 60270. علماً بأن عينات السيليكون العازلة المستخدمة هي من نوع Silopren LSR (Electro 245). كما أنه تم ترقيدها في درجة حرارة الغرفة مدة أسبوعين وذلك حتى تصل إلى درجة التشبع [1] [2]. والشكل التالي يوضح دارة القياس التجريبي حسب شيرينغ.



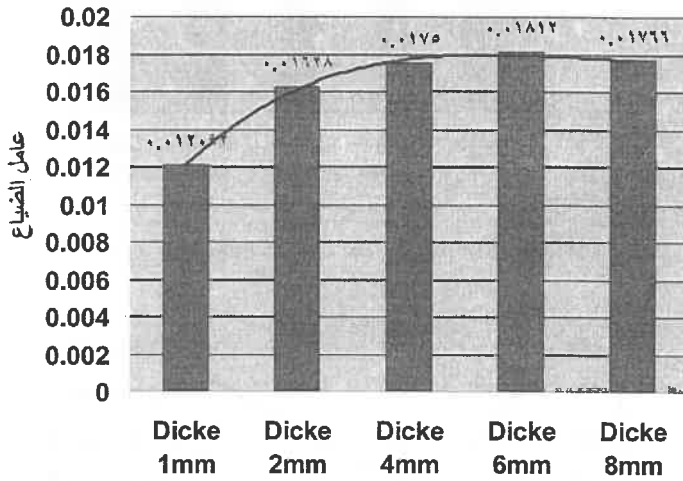
الشكل ٢: مبدأ توصيل دارة قياس ثابت العزل و عامل الضياع حسب شيرينغ:  
 $R_S$  مقاومة أمامية.  $C_M$  مكثف قياس التوتر.  $SM$  جهاز قياس التوتر.  $C_X$  سعة جسم الاختبار.  $C_N$  المكثف المعياري.  $\sigma$  و  $R_3$  و  $R_4$  و  $C_4$  باقي عناصر جسر شيرينغ.  $U_{Netz}$  توتر الشبكة المغذية (50Hz).

#### ٢-٤ طريقة الإجهاد بالتوتر الطويل الأمد نسبياً (التجربة المستمرة):

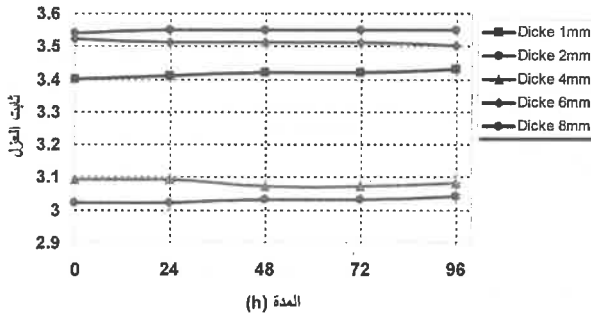
تم هنا في البدء إيجاد توتر بدء الانفراغات الجزئية حسب كل سماكة ثم تم تطبيق توترات ثابتة و أخفض من توترات البدء وذلك لمدة 96h (On-Line-Measuring). حيث نتائج القياس وفق هذه الطريقة موضحة في المنحنيات التجريبية الآتية:



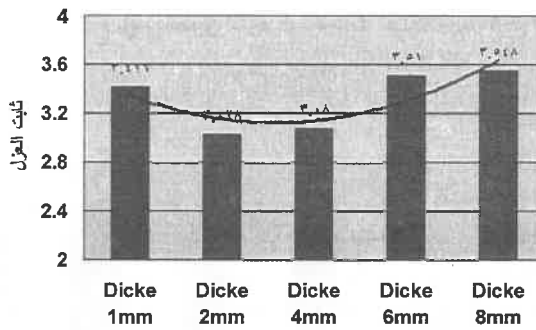
الشكل ٣: علاقة عامل الضياع بزمان تطبيق التوتر لسماكات مختلفة (Dicke 1-8mm).



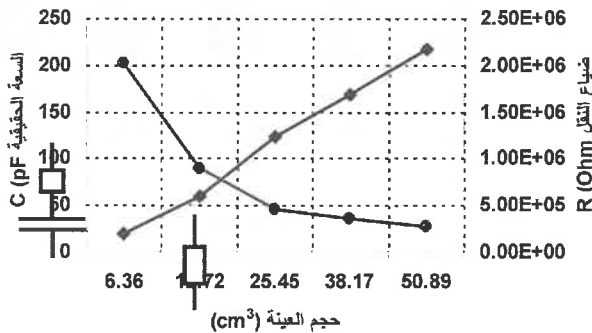
الشكل ٤: علاقة عامل الضياع بالسماكة (Dicke 1-8mm).



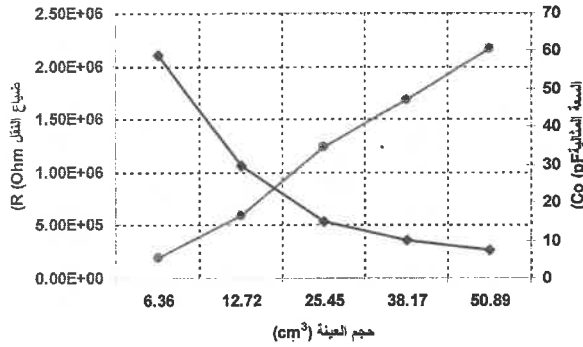
الشكل ٥ : علاقة ثابت العزل بزمان تطبيق التوتر لسماكات مختلفة (Dicke 1-8mm).



الشكل ٦ : علاقة ثابت العزل بالسماكة (Dicke 1-8mm).



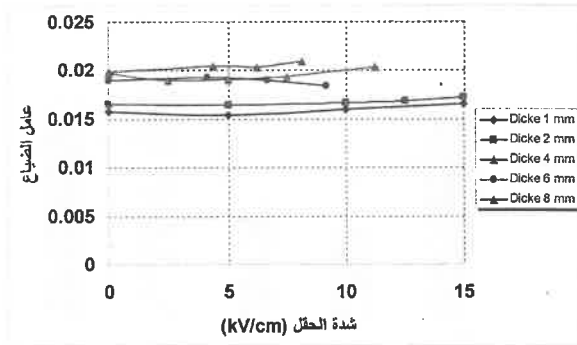
الشكل ٧ : تغير مقاومة العينة لسماكات (حجوم) مختلفة.



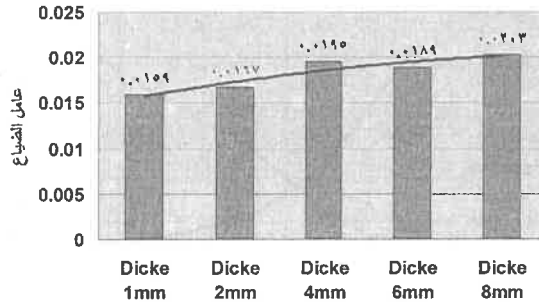
الشكل ٨ : علاقة السعة المثلثية و ضياع النقل مع الحجم.

#### ٣-٤ طريقة رفع التوتر:

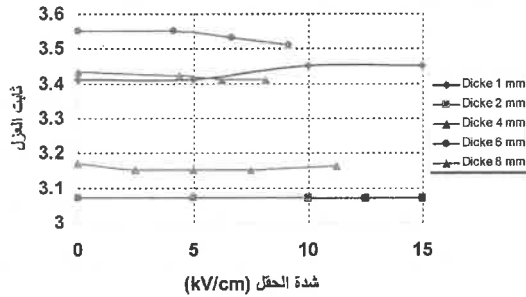
في هذه الحالة يرفع التوتر بالتدرج حتى توتر أصغر من توتر بدء الانفراغات الجزئية الكهربائية و حسب السماكات المستخدمة، حيث تترك كل مرحلة توتر بشكل ثابت مدة يوم واحد ثم يجري القياس عند نفس التوتر بعدها يرفع التوتر إلى مرحلة أعلى و هكذا حتى آخر قياس. والمنحنيات التالية توضح القياسات التجريبية وفق هذه الطريقة:



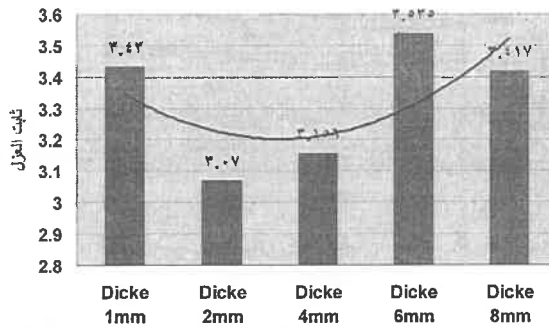
الشكل ٩ : علاقة عامل الضياع بشدة الحقل لسماكات مختلفة (Dicke 1-8mm).



الشكل ١٠ : علاقة عامل الضياع بالسماكة (Dicke 1-8mm).

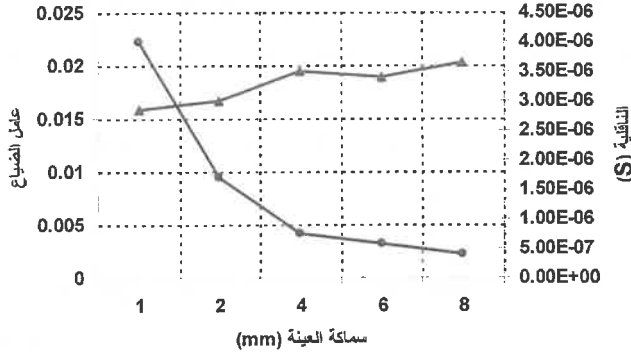


الشكل ١١ : علاقة ثابت العزل بشدة الحقل لسماكات مختلفة (Dicke 1-8mm).



الشكل ١٢ : علاقة ثابت العزل بالسماكة (Dicke 1-8mm).





الشكل ١٣ : العلاقة بين الناقلية و عامل الضياع لسماكات مختلفة.

#### ٥- مناقشة النتائج:

عند التمعن بالنتائج المتعلقة بدراسة خصائص العزل الحجمية وفق طريقة التجربة المستمرة بتوتر ثابت نجد بأن الزيادة في الحجم تقود إلى تغير ملحوظ في عامل الضياع وبالتحديد يميل ثابت العازلية إلى الارتفاع مع زيادة السماكة (الشكل ٤) بالمقابل تبقى قيمة عامل الضياع مستقلة عن الزمن على خلاف العلاقة مع السماكة، أما بالنسبة إلى ثابت العزل فالاستقلالية عن زمن تطبيق التوتر موجودة بينما التزايد مع زيادة السماكة يبقى أقل تمايزاً.

أما بالنسبة للنتائج وفق طريقة رفع التوتر أو بالأحرى شدة الحقل نلاحظ أن كلاً من ثابت العزل و عامل الضياع مستقلين عن مقدار الحقل المطبق بالنسبة لسماكات مختلفة وهذا يمكن إرجاعه إلى ارتفاع نسبة مواد الحشو المضافة عند صناعة العينات العازلة، أما بالنسبة لعامل الضياع فتزايد أكثر وضوحاً مع زيادة السماكة (الشكل ١٠) مقارنة بثابت العازلية (الشكل ١٢).

والتفسير الفيزيائي لتغيرات كل من عامل الضياع (تزايد مع زيادة الحجم) بالإضافة إلى تغير ثابت العازلية يتضح من خلال تمثيل البارامترات الإضافية كضياع النقل المتمثل بالمقاومة R و السعات الحقيقية و المثالية (الشكل ٧ و الشكل ٨) إضافة إلى الناقلية كعلاقة مع حجوم العينات (الشكل ١٣). حيث نلاحظ أنه من أجل حجوم صغيرة (ضياع نقل منخفض) تتصرف العينات بشكل سعوي بينما من أجل حجوم كبيرة (ضياع نقل كبير) فتتصرف العينات بشكل مقاومي خصوصاً و أن الإجهاد المطبق متناوب. أما التغير الملحوظ في ثابت العزل فيعود إلى تناقص سماكة السعة المثالية بشكل رئيسي. إن التمعن أيضاً في النتائج المتعلقة خصوصاً بتزايد عامل الضياع مع تزايد الحجم يقودنا إلى النتيجة بأن هناك تناسباً من النوع الأسّي بين عامل الضياع و الحجم و بالتشابه مع قانون

التضخيم الشهير الموافق للمتانة الكهربائية يمكن أن نتوصل إلى قانون التضخيم التجريبي التقريبي التالي الهام جداً الخاص بعامل الضياع و الذي تقدمه لأول مرة في هذا البحث و الذي يأخذ الشكل التالي :

$$V_2 > V_1 \Rightarrow \tan \delta_2 > \tan \delta_1 \text{ \& } m_1 \cdot \tan \delta_1^k = m_2 \cdot \tan \delta_2^k$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \left( \frac{\tan \delta_1}{\tan \delta_2} \right) = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{k}}$$

K: ثابت تناسب آسي تجريبي يتعلق بنوع المادة العازلة و حجمها.

## ٦- التوصيات:

- تفادي استخدام سماكات كبيرة من العازلية السلبية غير الفعالة بغية تخفيض قدر الإمكان من احتمال ارتفاع قيم عامل الضياع في الدرجة الأولى و ثابت العزل في الدرجة الثانية و بالتالي انخفاض جودة العازلية.
- تلافي استخدام المواد العازلة القابلة للاستقطاب بشكل ضعيف بسماكات كبيرة كونها بالأساس تملك عامل ضياع كبير، لذلك لا ننصح باستخدامها أبداً في عازلية الكابلات. في هذه الحالة الحل باللجوء إلى استخدام العازل ذات الجزئيات غير القطبية (كالبولي إيثيلين) كونها بالأساس تتميز بعامل ضياع منخفض.
- بناء على الدراسة السابقة تتضح ضرورة التركيز في الأبحاث اللاحقة على دراسة و تقصي خصائص العزل المختلفة للعازلية ذات السماكات الصغيرة جداً (المكروية) لما سيكون لها من أثر بالغ على جودة الصناعات الكهربائية الفائقة الدقة في المستقبل.

## ٦- المراجع:

- 1- LSR-Silicone (Silopren Electro 245) from Bayer Company-Germany.
- 2- TEM for partial discharge-Measurement and Schering-Bridge from Institute of High Voltage Engineering, University of Dortmund, Germany.
- 3-Muench, W. V., Werkstoffe der Elektrotechnik, Teubner, Stuttgart, 1985.
- 4- Kuechler, A., Hochspannungstechnik, VDI Verlag GmbH, Duesseldorf, 1996.
- 5- Hornbogen, E., Werkstoffe, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- 6- Hilgarth, G., Hochspannungstechnik, Teubner, Stuttgart, 1997.