

دراسة تأثير البارامترات الأساسية على مردود نقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً

الدكتور علي درويشو*

(تاريخ الإيداع 22 / 5 / 2019. قُبل للنشر في 28 / 7 / 2019)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة العوامل المؤثرة على انتقال الطاقة الكهربائية لاسلكياً، ومردودها باستخدام ملفات مستوية، واستخدام شرط توفيق الممانعات لتحسين مردود نقل الطاقة الكهربائية بتغيير مسافة النقل، كما تم دراسة وتحليل البارامترات المؤثرة على تقنية النقل، و تم تحقيق وتنفيذ الدارة المستخدمة لإجراء القياسات العملية، ومقارنتها مع النموذج النظري المستنتج، وكانت القياسات العملية مطابقة بشكل جيد للحسابات النظرية، وجدنا أن المردود يزداد بزيادة عامل الجودة للملفات، ويتناقص بزيادة مسافة النقل، تم تحديد المردود الاعظمي من أجل مسافات نقل متغيرة بين الملفات الداخلية من 30 cm وحتى 130 cm ، كما بينت النتائج أن الملفات ذات تردد التجاوب الأكبر ليس لها بالضرورة عامل جودة أكبر.

الكلمات المفتاحية: التجاوب، معامل الترابط، المردود، نقل الطاقة لاسلكياً، تردد التجاوب، ترابط مغناطيسي متبادل.

* أستاذ مساعد -قسم الفيزياء -كلية العلوم - جامعة تشرين -اللاذقية -سورية. البريد الالكتروني: dr.darwiso@gmail.com

Study of the effect of basic parameters on the efficiency of wireless transmission electricity

Dr. Ali Darwesho *

(Received 22 / 5 / 2019. Accepted 28 / 7 / 2019)

□ ABSTRACT □

In this search the affecting factors on wireless electricity transfer and efficiency studied using flat spiral coil and impedance matching in order to improve the efficiency of electricity transfer by changing transfer distance. The Parameter of electricity transfer that effect in transfer technology analyzed and studied. Implementation and Realization are accomplished the using circuit. Addition to, the experimental measurement was achieved and compared with the theoretical model. At the result the experimental measurements were well matched to the theoretical calculations. We found that the efficiency increases by increasing the quality factor of the coils and decreases by increasing the transfer distance. We measured the maximum efficiency for variable transmission distances between internal coils starting from 30cm up to 130 cm. The results also showed that increasing the response frequency of coils does not necessarily increase the quality factor of the coils.

Keywords: resonance, efficiency, wireless electricity transfer, resonant frequency, coupling coefficient, mutual induction.

* Associate Professor, Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.
E-mail: dr.darwesho@gmail.com

مقدمة:

ازداد الاهتمام مؤخراً بنقل الكهرباء لاسلكياً، ولكن الفكرة ليست حديثة العهد، حيث قام نيكولا تسلا بخطوات كبيرة في هذا المجال [1].

تصنف التقنيات لنقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً حسب المردود (الكفاءة) ومسافة النقل. تستخدم الأمواج الكهرومغناطيسية المنتشرة لنقل الطاقة الكهربائية بنفس طريقة إرسال إشارات الراديو، ومسافة النقل لها من مرتبة مئات الأمتار ولكنها منخفضة المردود كون الإرسال متعدد الاتجاه [2,3]. تستخدم الهوائيات ذات الريح العالي في تقنيات HF و RF و Microwaves، لنقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً، و مسافة النقل لها عدة كيلو مترات وكفاءة أكثر من 90%، ولكن هذه الأنظمة تحتاج إلى التعقب المستمر، والمعقد واصطفاف المعدات [4,5].

ان تقنيات الترابط التحريضي (Inductive coupling) والترابط السعوي (Capacitive coupling)، التي لا تعتمد على الأمواج الكهرومغناطيسية المنتشرة والتي تعمل على مسافات أقل من طول موجة الإشارة المرسله تكون كفاءتها كبيرة ولكن مسافة النقل لها محدودة عدة سنتيمترات [6].

ان تقنية الترابط التحريضي المتجاوب (Resonant inductive coupling) ذات كفاءة كبيرة ومسافة نقل متوسطة وتتميز هذه التقنية بسهولة استخدامها وتكلفتها المنخفضة نسبياً [7,8].

أهمية البحث وأهدافه:

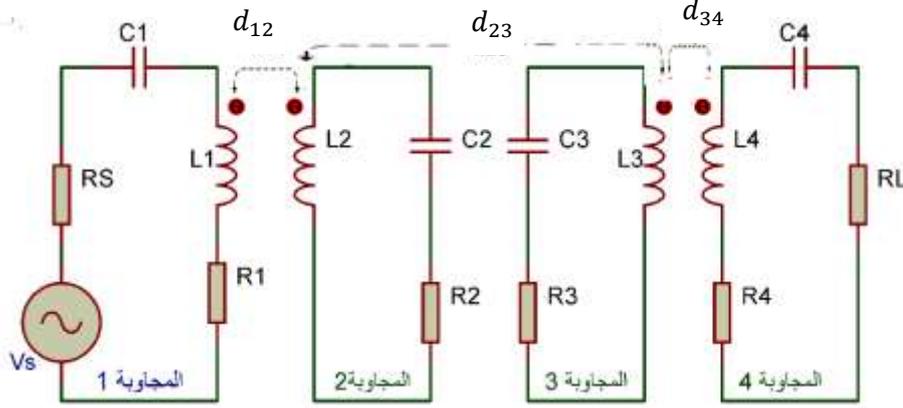
تستخدم تقنية نقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً في العديد من المجالات الطبية مثل شحن بطارية جهاز القلب المزروع داخل جسم الانسان ولتزويد الأجهزة التي تستهلك طاقات قليلة مثل الاجهزة الالكترونية المحمولة والسيارات الكهربائية. يهدف هذا البحث إلى:

دراسة البارامترات الأساسية لهذه الطريقة كمسافة النقل d وعامل الجودة Q والترابط بين الملفات k وتردد التجاوب f_0 . دراسة تأثير تردد التجاوب الذاتي على المردود وعلاقته بأبعاد الملفات المستخدمة. استنتاج العلاقة النظرية لكفاءة انتقال الطاقة الكهربائية لاسلكياً بتابعة البارامترات الأساسية وقياسها عملياً.

طرائق البحث وموارده:

ايجاد العلاقة المعبرة عن المردود بالاعتماد على قوانين الدارات الكهربائية وقوانين كيرشوف نظرياً وعملياً تحقيق دائرة الكترونية انتقال الطاقة الكهربائية لاسلكياً بتقنية الترابط التحريضي المتجاوب وقياس المردود من أجل مسافات نقل متغيرة.

- وصف الدارة المستخدمة وطريقة العمل:



الشكل (1) الدارة المكافئة المستخدمة في انتقال الطاقة

يبين الشكل (1) الدارة المكافئة المستخدمة في انتقال الطاقة الكهريائية لاسلكياً بتقنية الترابط التحريضي المتجاوب وتتألف الدارة من اربعة ملفات coils (مجاوبات Resonators):

- ملف المنبع (المجاوبة 1): يتكون من سلك نحاسي غير معزول على شكل حلقة وحيدة مقاومته R_1 وذاتية L_1 موصول بمنبع عالي التردد، مقاومته الداخلية R_s ، وقوته المحركة الكهريائية V_s ، و مكثفة C_1 على التسلسل لجعل الملف يتجاوب عند التردد المطلوب.

- ملف الحمولة (المجاوبة 4): يتكون بشكل مشابه لملف المنبع من سلك نحاسي له مقاومة R_4 وذاتية L_4 ويرتبط مع مقاومة حمولة R_L ، ومكثفة C_4 على التسلسل.

- ملفان يشكلان المجاوبتين الداخليتين (المجاوبة 2 والمجاوبة 3) واللذان يسميان ملفا الاستقبال والإرسال، ويتكونان من سلك نحاسي ملفوف بشكل حلزوني مستوي flat spiral coil، لهما عدد لفات N ، ومقاومة R_2, R_3 ، وذاتية L_2, L_3 ، وسعة طفيلية C_2, C_3 ، على الترتيب، وهي سعة تظهر بشكل واضح في الملفات في حالة الترددات العالية. إن هندسة كل ملف يحدد السعة الطفيلية والذاتية، وبالتالي يحدد تردد التجاوب له.

بما أن ملفا الإرسال والاستقبال لا يحويان على مقاومة خارجية موصولة معهما، وبالتالي عامل الجودة لهما سيكون كبيراً.

إن استخدام الملفات الداخليين يحسن من المردود، ويزيد من مسافة النقل [14,13]، بالإضافة إلى ذلك نستطيع التحكم بمعامل الترابط بين ملف المنبع، وملف الإرسال، وملف الحمولة، وملف الاستقبال، وبذلك نستطيع التعامل مع تغير مسافة النقل دون الحاجة إلى شبكة موائمة ممانعات impedance matching network، والتي تستعمل للغرض ذاته، إن إضافة شبكة موائمة ممانعات يضيف خسارات للطاقة [15].

إن الاختيار الملائم لمواصفات، وهندسة ملفا الإرسال والاستقبال (الملفان الداخليان) يلعب دوراً أساسياً في تحسين المردود ومسافة النقل.

يبعد ملف المنبع عن ملف الإرسال مسافة d_{12} كما في الشكل (1)، ويرتبطان مغناطيسياً بمعامل ترابط k_{12} ، والذي يعرف بالعلاقة:

$$k_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \quad (1)$$

حيث M_{ij} ، التحريض المتبادل بين الملفين و i, j ، يدلان على عناصر الدارة (ملفات الدارة)، مثال $i = 1$ تدل على ملف المنبع.

يبعد ملف الإرسال عن ملف الاستقبال مسافة d_{23} ، ويرتبطان بمعامل ترابط k_{23} ، ويبعد ملف الاستقبال عن ملف الحمولة مسافة k_{34} ، ويرتبطان بمعامل ترابط k_{34} . يعطى عامل الجودة في حالة دارة تسلسلية بالعلاقة:

$$Q_i = \frac{\omega_i L_i}{R_i} \quad (2)$$

ويعطى تردد التجاوب بالعلاقة:

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad (3)$$

سنهمل الترابطات العابرة k_{13}, k_{24}, k_{14} ، لصغرها ولسهولة الحسابات.

إن تحليل الدارة السابقة يمكن أن ينجز بعدة نظريات كنظرية ترابط الانماط *coupled mode theory*، والنظرية الكهرطيسية ونظرية الممانعات وغيرها، والتي غالباً ما تكون معقدة، وسنستخدم في بحثنا قوانين الدارات البسيطة وقوانين كيرشوف، بتطبيق قوانين كيرشوف على الدارة المكافئة الموصوفة بالشكل (1) وعندما $\omega = \omega_0$ التردد

المستخدم يساوي تردد التجاوب لكل ملف $\omega_i L_i = \frac{1}{\omega_i C_i}$

$$R_4 \ll R_L \Leftrightarrow R_4 + R_L \cong R_L, \quad R_1 + R_S \cong R_S, \quad R_1 \ll R_S \text{ و}$$

نكتب:

$$\begin{aligned} V_s &= R_S I_1 + j\omega M_{12} I_2 \\ 0 &= R_2 I_2 + j\omega (M_{12} I_1 - M_{23} I_3) \\ 0 &= R_3 I_3 + j\omega (M_{34} I_4 - M_{23} I_2) \\ 0 &= R_L I_4 + j\omega M_{34} I_3 \end{aligned}$$

باستخدام المعادلات اعلاه يُحسب التيار في كل ملف ويُكتب بدلالة $Q_i k_{ij}$ ، ونحصل على التيار I_1 و I_4 :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4}{[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3]} \frac{V_s}{R_S} \\ I_4 &= \frac{k_{12} k_{23} k_{34} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3} \sqrt{Q_3 Q_4}}{[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3]} \frac{jV_s}{\sqrt{R_S R_L}} \end{aligned}$$

في حالة التماثل بين الملف الأول والرابع اي $Q_1 = Q_4$ ، و التماثل بين الملف الثاني والثالث اي $Q_2 = Q_3$ ، وفي حال $d_{12} = d_{34}$ اي $k_{12} = k_{34}$ ، يكون تابع النقل:

$$\left| \frac{V_L}{V_S} \right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2} \sqrt{\frac{R_L}{R_S}} \quad (4)$$

حيث V_S القوة المحركة الكهربائية للمنبع، V_L فرق الكمون بين طرفي مقاومة الحمولة

ولدينا من الدارة ممانعة الدخل:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_1} \Rightarrow Z_{in} = \frac{V_s - R_S I_1}{I_1} \quad (a - 5)$$

$$Z_{in} = R_s \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2 (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4)}{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4} \quad (b-5)$$

للحصول على كفاءة عظمى يجب ان يكون $Z_{in} = R_s$ ، وبالتعويض في العلاقة (b-5) نحصل على شرط توفيق الممانعة:

$$(k_{12}^2 Q_1 Q_2 - 1)(k_{34}^2 Q_3 Q_4 + 1) = k_{23}^2 Q_2 Q_3$$

و في حالة التماثل $k_{12} = k_{34}$ ، $Q_1 = Q_4$ ، $Q_2 = Q_3$ بالتعويض والاصلاح في شرط توفيق الممانعة نجد:

$$k_{12}^2 = \frac{\sqrt{k_{23}^2 Q_2^2 + 1}}{Q_1 Q_2} \quad (6)$$

يعرف المردود لأي نظام بأنه نسبة الاستطاعة المتوسطة للمخرج إلى الاستطاعة المتوسطة للمدخل. بزيادة مسافة النقل d_{23} يتناقص k_{23} و من العلاقة (6) نجد انه يجب انقاص k_{12} أو Q_1 للحفاظ على شرط موافقة الممانعة، وكفاءة عظمى.

يتناقص k_{12} عملياً بزيادة المسافة d_{12} و d_{34} وبذلك نستطيع الحفاظ على مردود اعظمي مع تغيير مسافة النقل d_{23} دون الحاجة لشبكة موائمة ممانعات كما ذكرنا سابقاً.

وايضاً بالعودة للعلاقة (5) وتعويض $Z_{in} = R_s$ نجد $V_s = 2V_{in}$ ، وهو الشرط العملي للحصول على كفاءة عظمى، ويكون المردود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_L^2 / R_L}{V_{in}^2 / R_s} = \frac{V_L^2 / R_L}{V_s^2 / 4R_s} = 4 \left(\frac{V_L}{V_s} \right)^2 \frac{R_s}{R_L} \quad (7)$$

وبتعويض العلاقة (4) في المردود ومن اجل $R_s = R_L$

$$\eta = 4 \left(\frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2} \right)^2 \quad (8)$$

النتائج والمناقشة:

1- طرق القياس والاجهزة المستخدمة:

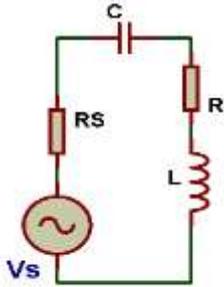
استخدمنا في بحثنا راسم الاشارة من نوع HAMEG-HM40040MHz مقاومة مدخله $1M\Omega$ لكل قياسات التردد وفرق الكمون.

ومنبع تغذية عالي التردد من نوع PHILIPS-PM 5321 HF GENERATOR بمجال ترددي 0.15MHz الى 108MHz.

تم اجراء كافة القياسات و صناعة الملفات في مخبر البحث العلمي في قسم الفيزياء، وكل الاجهزة متوفرة في مخابر قسم الفيزياء.

(a) قياس Q و L و R :

استخدمنا دائرة LC على التسلسل مع منبع تغذية متناوب متغير التردد ومكثفة معلومة السعة الشكل (2)، وعندما تصبح الدارة في التجاوب بتغيير تردد المنبع يكون فرق الكمون بين طرفي المكثفة اكبر ما يمكن، وأكبر من فرق الكمون بين طرفي المنبع Q مرة وبالتالي نستطيع تحديد كلاً من عامل الجودة و الذاتية L



لكل ملف من العلاقات (2) و (3) :

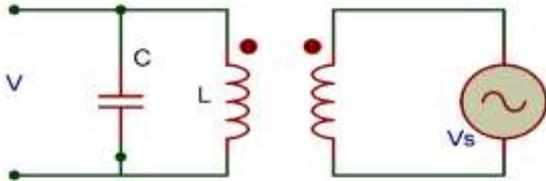
$$Q = \frac{V_C}{V_S} \quad \text{ونحدد } Q \text{ من العلاقة:}$$

ونحدد R من العلاقة (3) بعد معرفة L و Q

الشكل (2) دائرة قياس Q و L و R

(b) قياس تردد التجاوب للملفات المتوسطة f_0 و سعتها الطفيلية $C_{parasitic}$

ان قياس السعة الطفيلية ليس بالأمر السهل لان السعة الطفيلية عادة ما تكون صغيرة، وتهمل، وتظهر في الدارة المكافئة على التفرع مع الذاتية. ولكن تم قياس السعة الطفيلية بنجاح باستخدام الدارة الموصوفة في الشكل (3).



عند تغيير تردد المنبع في الدارة الاولية (على اليمين) يظهر فرق

كمون اعظمي في الدارة الثانوية التي تتكون من ملف

وصل طرفاه الى راسم اشارة، عند تردد محدد

دون سواه اي ان الدارة الثانوية في حالة التجاوب

وبذلك قسنا f_0 ، وبمعرفة كل من الذاتية للملف

والتردد استطعنا قياس $C_{parasitic}$ من العلاقة:

الشكل (3) دائرة قياس تردد التجاوب f_0

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{parasitic}}}$$

(d) قياس المردود η :

تم تحديد المردود بقياس كل من استطاعة المدخل واستطاعة المخرج بالحالة العامة:

$$\eta = \frac{V_{out} I_{out} \cos \varphi_{out}}{V_{in} I_{in} \cos \varphi_{in}}$$

$$\eta = \frac{I_{out}^2 R_L}{I_{in}^2 R_S}$$

ونستطيع ان نصيغ العلاقة السابقة :

$$\eta = \frac{\frac{V_L^2}{R_L}}{(V_S - V_{in})^2 R_S} \quad (9)$$

حيث $R_1 + R_S \cong R_S$

ويقاس كل من كمون المخرج، وكمون المدخل، وذلك بوصل طرفي قناة راسم الاهتزاز بين طرفي الحمولة، وبين طرفي منبع الإشارة، ومعرفة القوة المحركة الكهربائية للمنبع، ومقاومته الداخلية نستطيع تحديد المرود بالحالة العامة ومن اجل كل مسافة نقل. إن ملف المنبع والحمولة يحويان مكثفة متغيرة تضبط بحيث تتجاوب الدارتان على نفس تردد التجاوب للملفات الداخلية.

وفي حالة توفيق الممانعة فيكفي قياس كمون المخرج لان علاقة المرود تصبح:

$$\eta = 4 \left(\frac{V_L}{V_S} \right)^2 \frac{R_S}{R_L}$$

مع العلم اننا نقيس كمون المدخل بشكل مستمر في هذه الحالة من اجل التأكد من تطبيق الشرط العملي لتوفيق الممانعة وهو $V_{in} = \frac{V_S}{2}$. ونحقق هذا الشرط عملياً بتغيير المسافة بين ملف المنبع وملف الارسال والمسافة بين الاستقبال، وملف الحمولة ($d_{12} = d_{34}$).

2- ذاتية الملفات وشكلها الهندسي:

يتكون ملفا المنبع والحمولة من سلك نحاسي غير معزول مفرد قطر مقطعه $w = 2r_c = 1.3 \text{ mm}$ وملفوف على شكل حلقة دائرية وحيدة نصف قطرها $r_1 = 26 \text{ cm}$ وتحسب الذاتية من اجل حلقة دائرية بالعلاقة التالية [17,16]:

$$L = \mu_0 r \left[\ln\left(\frac{8r}{2r_c}\right) - 2 \right] = 1.98 \mu H$$

تم اختيار تردد التجاوب للملفات المتوسطة بحيث يكون عامل الجودة لها أكبر ما يمكن ويتناسب عامل الجودة طردياً مع تردد التجاوب وعكساً مع المقاومة الاومية وفق العلاقة

$$Q_i = \frac{\omega_i L_i}{R_i}$$

ويوضح الجدول (1) خصائص ملفي ارسال مختلفين:

الجدول (1) خصائص ملفي ارسال مختلفين

عامل الجودة Q	f_0 تردد التجاوب (MHz)	الذاتية (μH) L	التباعد بين الملفات	r_{avr} متوسط نصف القطر (cm)	N عدد اللفات	الشكل	
150	5.4	55.6	1	30.8	7.1	حلزوني مستوي	الملف الاول
110	18.75	12.2	1	12.5	6.2	حلزوني مستوي	الملف الثاني

ومن الجدول نلاحظ الملفات ذات تردد التجاوب الأكبر ليس لها بالضرورة عامل جودة أكبر، لأنه من اجل الوصول لملفات ذات تردد تجاوب اكبر يجب أن تكون الذاتية أصغر، كما ان زيادة التردد سيزيد من المقاومة الأومية، وبالتالي اخترنا الملف الاول.

يتكون ملفا الارسال والاستقبال (الملفين المتوسطين) من سلك نحاسي وحيد مفرد غير معزول قطر مقطعه $w = 2r_c = 1.8 \text{ mm}$ لف بشكل حلزوني مستوي (flat, spiral coil) بعدد لفات $N = 7.1$ وقطر خارجي $D_0 = 70 \text{ cm}$ وقطر داخلي $D_{in} = 53.5 \text{ cm}$ ونصف قطر وسطي $r_2 = 30.8 \text{ cm}$ وتباعد بين اللفات pitch $p = 1 \text{ cm}$ ، وتحسب ذاتيتها من العلاقة التالية [18]:

$$L = \frac{N^2[D_0 - N(w + p)]^2}{16D_0 + 28N(w + p)} \frac{39.37}{10^6} = 55.6 \mu H$$

3-5- تردد التجاوب والسعة الطفيلية لملف الارسال والاستقبال:

- نحسب تردد التجاوب لملفي الارسال والاستقبال المتجاوبين بوجود السعة الطفيلية من العلاقة [18]:

$$f_0 = \frac{c}{8\pi r N} = 5.466 \text{ MHz}$$

- كما نحسب السعة الطفيلية $C_{parasitic}$ للملفين المتوسطين من العلاقة:

$$C_P = \frac{1}{\omega^2 L} = 15.2 \text{ pF}$$

حيث c سرعة الضوء في الخلاء.

4-المقاومةالملفات الاربعة:

تقسم المقاومة الى مقاومة أومية ومقاومة اشعاع، وتحسب لكل من الملفات الاربعة من العلاقات التالية [19،20]:

$$R_{rad} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \left[\frac{\pi}{12} N^2 \left(\frac{\omega r}{c} \right)^4 \right]}$$

$$R_{ohm} = R_{DC} \frac{2r_c}{4\delta} ; \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_0 \mu_0 \sigma}} \Rightarrow$$

$$R_{ohm} = \sqrt{\pi f_0 \mu_0 \rho} N \frac{r}{r_c}$$

حيث μ_0 النفاذية المغناطيسية للخلاء ، ϵ_0 السماحية الكهربائية للخلاء ، δ العمق القشري skin depth ، σ الناقلية النوعية للنحاس.

باستخدام العلاقاتين السابقين نحسب المقاومة للمجاوبات الاربعة:

$$R_1 = R_4 = 0.24 \Omega$$

$$R_2 = R_3 = 1.513 \Omega$$

وهنا اهملنا مقاومة الاشعاع لأنها صغيرة جداً (0.006Ω من اجل الملف 2 و 3 مثلاً). وكانت مقاومة المنبع

$$\text{والحمولة } R_S = R_L = 70 \Omega$$

5-بارامترات الملفات الاربعة:

ومن المعطيات السابقة، والعلاقة (2) نحسب عامل الجودة للملفات Q ونكتب الجدول (2) للقيم النظرية، والعملية للمجاوبات .

جدول (2) القيم النظرية والعملية لبارامترات المجاوبات الاربعة

	$L(\mu H)$		$C(pF)$		$f_0(MHz)$		$Q_{unloaded}$		Q_{loaded}	
	عملي	نظري	عملي	نظري	عملي	نظري	عملي	نظري	عملي	نظري
Resonator 1(loop)	1.95	1.98	388	429	5.78	5.46	35	295	1.30	1.35
Resonator 2(coil)	63	55.6	12.9	15.2	5.78	5.46	150	1306	—	—
Resonator 3(coil)	63	55.6	12.9	15.2	5.78	5.46	150	1306	—	—
Resonator 4(loop)	1.93	1.98	392	429	5.78	5.46	34	295	1.28	1.35

- نلاحظ بالمقارنة بين القيم النظرية والعملية الاختلاف الكبير في قيمة Q ، وذلك لاختلاف قيمة المقاومة نظرياً وعملياً ويعود ذلك الى:

التشوهات الميكانيكية الحاصلة للسلك مما يزيد من قيمة المقاومة [21]، و بالإضافة الى طبقة اكسيد النحاس رديئة النقل التي تتشكل (أو تكون متشكلة اثناء التصنيع) على سطح السلك النحاسي حيث يكون التيار محصور بطبقة رقيقة محددة بالعمق القشري δ والتي تساوي $\delta \approx 27 \mu m$ عند التردد المستخدم حسب ظاهرة المفعول القشري skin effect مما يزيد المقاومة [22].

ولذلك سنستخدم القيم المقاسة في الجدول (2) في حساب المردود نظرياً، مع العلم اننا أوجدنا المقاومة النوعية للنحاس من المقاومة المقاسة للملف الاول، و تم استخدامنا القوانين اعلاه لحساب المقاومة للملف الثاني والثالث وبالتالي عامل الجودة.

6- التحريض المتبادل ومعاملات الترابط:

تُحسب معاملات الترابط من العلاقة (1) ويحسب التحريض المتبادل من علاقة نيومان [21]:

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0 \pi N_i N_j r_i^2 r_j^2}{2d_{i,j}^3} \quad ; r_i r_j \ll d_{i,j}$$

ولكن في هذا البحث تكون صيغة نيومان قاصرة ولذلك سنستخدم صيغة يعتمد حلها على التكاملات القطعية وهي صيغة عامة بلا شروط ويكون الحل:

$$M_{i,j} = 2\mu_0 \frac{\sqrt{a+b}}{b} \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) K(\beta) - E(\beta) \right]$$

حيث

$$a = \frac{r_i^2 + r_j^2 + d_{i,j}^2}{r_i^2 + r_j^2} \quad , \quad b = \frac{2}{r_i r_j} \quad , \quad \beta = \sqrt{\frac{2b}{a+b}}$$

r_i نصف قطر الحلقة i من الملف a ، r_j نصف الحلقة j من الملف b
 $d_{i,j}$ البعد بين الحلقتين (نفس البعد بين الملفين).

و $E(\beta)$ ، $K(\beta)$ تكاملات قطعية من النوع الاول والثاني :

$$K(\beta) = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-\beta^2 t^2)}}$$

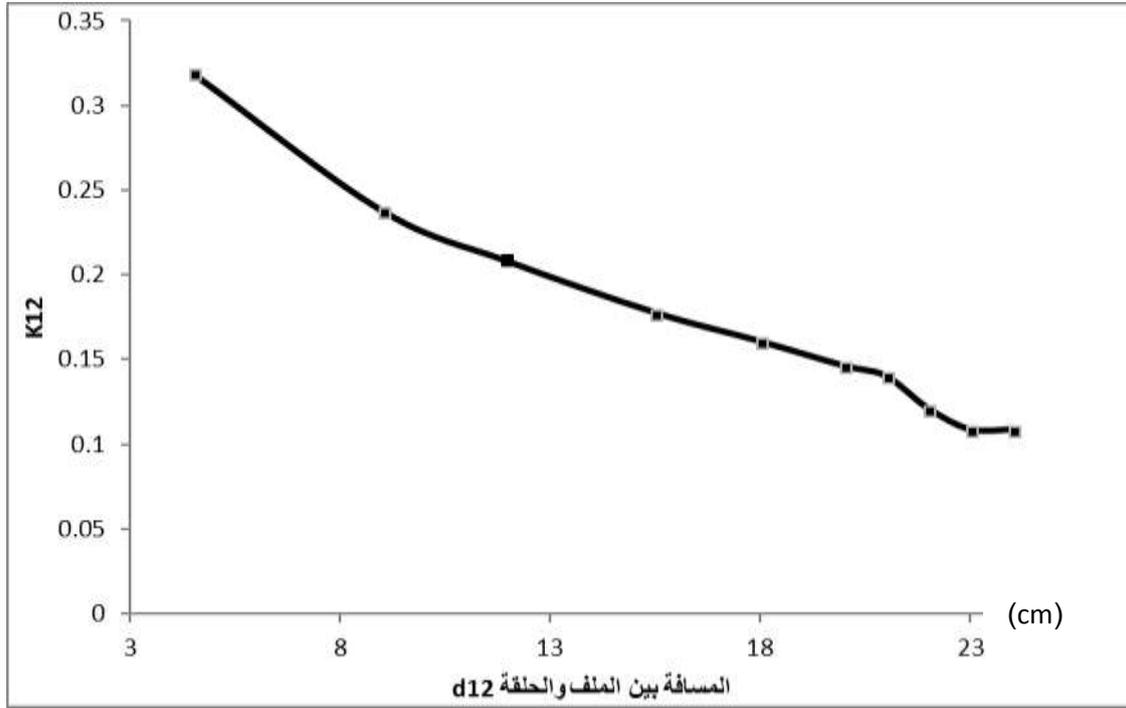
$$E(\beta) = \int_0^1 \sqrt{\frac{(1-\beta^2 t^2)}{(1-t^2)}} dt$$

و تُعطى $E(\beta)$ ، $K(\beta)$ من جدول للتكاملات القطعية [25].

وعندئذ يكون التحريض المتبادل بين الملفين a و b :

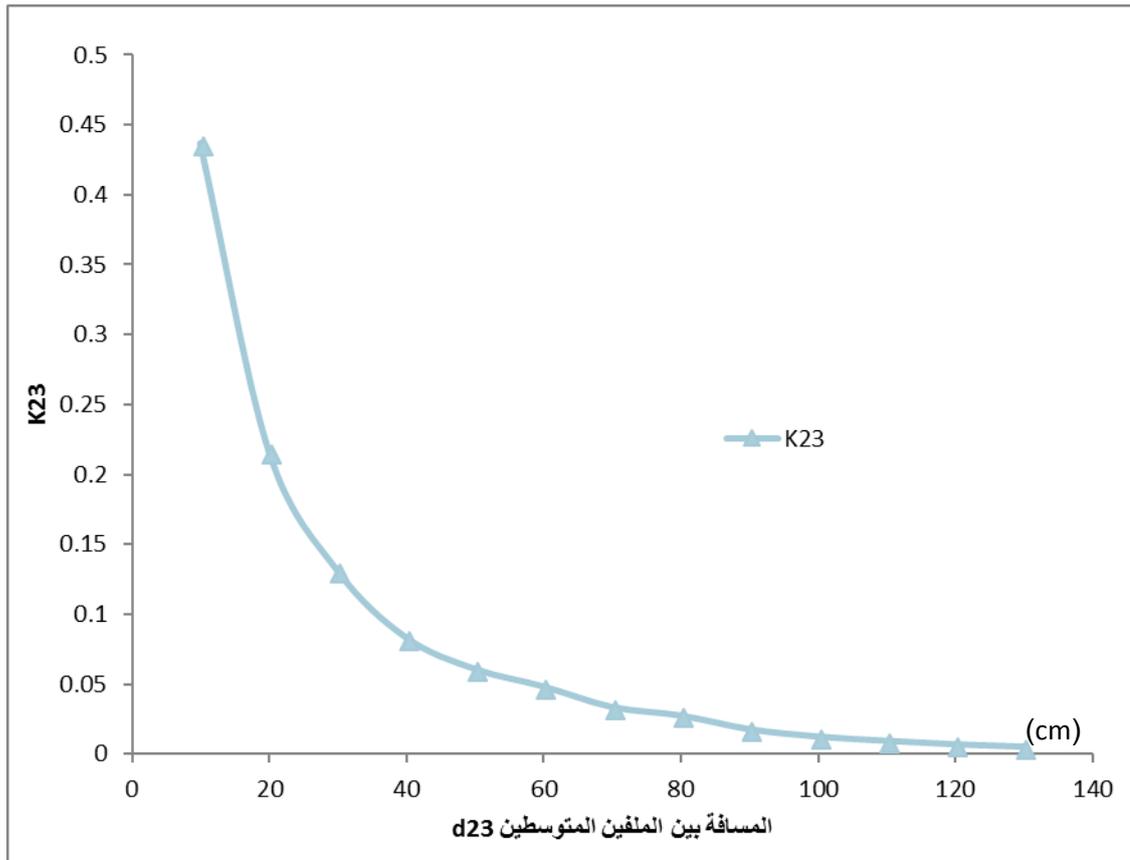
$$M_{a,b} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M M_{i,j}$$

حيث N عدد لفات الملف a و M عدد لفات الملف b .
 يبين الشكل (4)، معامل الترابط k_{12} بتابعية المسافة d_{12} .



الشكل (4) معامل الترابط k_{12} بتغير المسافة d_{12}

نلاحظ من الشكل (4) تناقص معامل الترابط k_{12} بزيادة المسافة d_{12} .
 يبين الشكل (5) معامل الترابط k_{23} بتابعية المسافة d_{23} .



الشكل (5) معامل الترابط k_{23} بتغير المسافة d_{23}

نلاحظ من الشكل (5) تناقص معامل الترابط k_{23} بزيادة المسافة d_{23} .

7- المردود:

يُحسب المردود النظري من العلاقة (8) ويُمثل بتابعية المسافة d_{23} كما في الشكل (6).

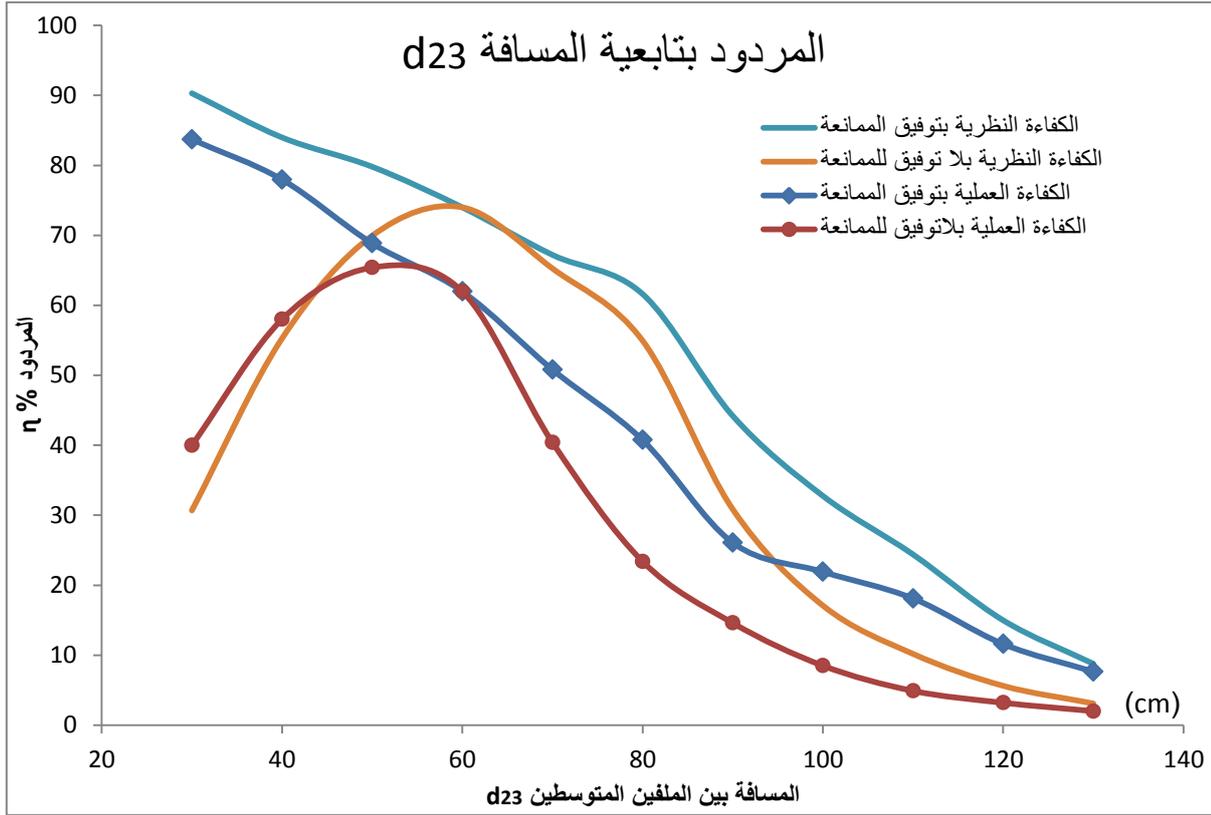
أولاً: في حالة عدم توفيق الممانعة ويكون k_{12} ثابت اي المسافة d_{12} ثابتة عند 15.5cm

وثانياً: في حالة عدم توفيق الممانعة اي k_{12} تابع لـ k_{23} حيث تم اخذ المسافات عملياً، وحساب k_{12} ، k_{23} .

ويحسب المردود عملياً من العلاقة (7) بقياس كل من V_L ، V_s ، V_{in} ، مع مراعاة الشرط العملي للكفاءة العظمى

$V_s = 2V_{in}$ ، ويمثل المردود العملي بتابعية المسافة d_{23} أولاً بحالة عدم توفيق الممانعة اي بثبات k_{12} وثانياً في

حالة توفيق الممانعة k_{12} تابع لـ k_{23} كما في الشكل (6).



الشكل (6) المردود النظري والعملي بتابعية مسافة النقل

نلاحظ من الشكل (6) ان المردود النظري والعملي في حالة توفيق الممانعات أكبر من المردود النظري والعملي في حالة عدم توفيق الممانعات، اي أن المردود تحسن باستخدام توفيق الممانعات، كما نلاحظ تناقص المردود النظري والعملي بزيادة مسافة النقل d_{23} .

8- مناقشة النتائج:

تدل النتائج التجريبية والنظرية ان نظام نقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً بتقنية تجاوز الترابط المغناطيسي يكون كفوء للمسافات المتوسطة، وعند تغيير المسافة و استخدام فكرة موائمة الممانعات (أربعة مجاوبات) وتغيير معامل الترابط k_{12} بين الملفات المتوسطة وملفا المنبع والحمولة وعملياً بتغيير المسافة d_{12} حيث تحسن المردود بتغيير k_{12} وفقاً لتغيير d_{23} (اي تغيير k_{23}) كما ذكرنا سابقاً حسب الشرط (6) والشرط العملي $V_s = 2V_{in}$ كما هو مبين بالشكل (6). تم الوصول إلى مردود عملي أعظمى $\eta = 83.7\%$ عند مسافة بين الملفات المتوسطة $d_{23} = 30cm$ ، ومسافة كلية من ملف المنبع الى ملف الحمولة $d = 40cm$.

و مردود عملي لأكثر من $\eta = 50\%$ من اجل مسافات d_{23} اقل من $70cm$ ، ومسافات كلية d اقل من $88cm$.

ومردود عملي $\eta = 22\%$ عند مسافة $d_{23} = 100cm$ ، ومسافة كلية $d = 144cm$.

ومردود عملي $\eta = 7.6\%$ عند مسافة $d_{23} = 130cm$ ومسافة كلية $d = 178cm$.

كما بينا ان المردود المحسوب من العلاقة النظرية تطابق بشكل جيد المردود المقاس عملياً، ويعود الاختلاف الى الاخطاء بالقياسات، واستخدامنا لنموذج مبسط أهملنا فيه الترابطات العابرة k_{13} ، k_{14} ، k_{24} .

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث ايجاد نموذج نظري مطابق تقريباً للقياسات العملية، ويحدد البارامترات التي تلعب الدور الرئيسي والحاسم في مردود نقل الطاقة الكهربائية لاسلكياً مثل عامل جودة الملفات Q الذي كلما كان أكبر ازداد المردود و يرتبط Q بذاتية الملف، وتردد التجاوب، والخسارات فيها كالمقاومة الأومية المسؤولة بشكل رئيسي عن تناقص عامل الجودة .
- كما وجدنا أنه بتغيير معامل الترابط k_{12} نستطيع موائمة الممانعة، وتحسين المردود بشكل ملحوظ.
- ان تردد التجاوب يلعب دور اساسي في اختيار الملفات المستخدمة، وهندستها، وبالتالي يحدد المسافة التي تكون فيها المردود عالي.
- كان المردود $\eta = 50\%$ من اجل مسافات d_{23} اقل من $70cm$ ومسافات كلية d اقل من $106cm$.
- يمكن العمل مستقبلاً على ملفات ذات عامل جودة كبير، وخسارات اقل، وبالتالي مردود نقل أكبر بالإضافة الى تحسين شكل الملفات، وهندستها ونوع السلك المستخدم في الملفات.

المراجع:

- [1] N. Tesla, U.S. patent 1,119,732 (1914).
- [2] S. Ahson and M. Ilyas, RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [3] A. Sample, D. Yeager, P. Powledge, A. Mamishev, and J. Smith, "Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 11, pp. 2608–2615, Nov. 2008.
- [4] W. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1230–1242, Sep. 1984.
- [5] J. McSpadden and J. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 46–57, Dec. 2002.
- [6] PowerMat Inc., Nov. 2009. [Online]. Available: <http://www.powermat.com>.
- [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [8] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, M. Soljačić, *Ann. Phys.*, 10.1016/j.aop.2007.04.017 (2007).
- [9] N. Fletcher and T. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.
- [10] A. Sample and J. Smith, "Experimental results with two wireless power transfer systems," in *Proc. IEEE RWS*, Jan. 2009, pp. 16–18.
- [11] T. Aoki et al., *Nature* 443, 671 (2006).
- [12] L. Ka-Lai, J. W. Hay, P. G. W. Beart, U.S. patent 7,042,196(2006).
- [13] J. M. Fernandez, J. A. Borras, U.S. patent 6,184,651 (2001).
- [14] A. Esser, H.-C. Skudelny, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 27, 872(1991).
- [15] E. R. Giler, K. L. Hall, M. P. Kesler, M. Soljacic, A. Karalis, A. B. Kurs, Q. Li, and S. J. Ganem, "Wireless Energy Transfer Using Repeater Resonators," U.S. Patent 2010/0259108, Oct. 14, 2010.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Wiley, New Jersey, 2005.
- [17] Olutola Jonah, Stavros V. Georgeakopoulos and Manos M. Tentzeris, "Optimal Design Parameters for Wireless Power Transfer by Resonance Magnetic", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, no., pp. 1390-1393, 2012.
- [18] F. Grover, *Inductance calculations*, ser. Dover phoenix editions. Dover Publications, Incorporated, 2004.

- [19] J. Ferreira, "Appropriate modelling of conductive losses in the design of magnetic components," in Power Electronics Specialists Conference, 1990. PESC '90 Record., 21st Annual IEEE, 1990, pp. 780–785.
- [20] K. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, ser. Electrical engineering handbook series. Taylor & Francis, 2004. [Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=nZzOAsroBIEC>
- [21] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [22] A. Sample, B. Waters, S. Wisdom, and J. Smith, "Enabling seamless wireless power delivery in dynamic environments," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1343–1358, 2013.
- [23] Poon, A.S.Y. A general solution to wireless power transfer between two circular loops. *Prog. Electromagnets. Res.* 2014, 148, 171–182
- [24] C. R. Valenta, M. M. Morys, and G. D. Durgin, "Theoretical Energy Conversion Efficiency for Energy Harvesting Circuits Under Power Optimized Waveform Excitation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 5, pp. 1758-1767, May 2015.
- [25] J. M. Hammersley. *Tables of Complete Elliptic Integrals*. Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol. 50, No.1, January 1953 Research Paper 2386