



## تأثير جهد التشغيل والأقطار الخارجية للملفات في منظومة الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية (EVs) بالرنين المغناطيسي (MRI)

اللالة عمران<sup>a\*</sup> وحامد السيد<sup>b</sup>

<sup>a</sup>قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة سبها، ليبيا.

<sup>b</sup>قسم الطاقات المتجددة، كلية الهندسة، جامعة سبها، ليبيا.

### الكلمات المفتاحية:

الربط بالرنين المغناطيسي.  
المركبات الكهربائية.  
المعيار الرسمي الدولي لشحن المركبات  
الكهربية.  
توصيل منظومة على التوالي.  
الربط بالاقتران الحثي.

### المخلص

في هذا البحث تستعرض نظام شحن لاسلكي للمركبات الكهربائية (EVs)، يعتمد على مبدأ الربط بالرنين المغناطيسي (MRC)، ويتميز بقدرة نقل عالية وكفاءة تشغيل جيدة خاصة عند رفع جهد التشغيل، حيث تم تصميم نظام يحقق أداء مستقراً وفعالاً عند جهود التشغيل العالية، مما يساهم في تقليل الحجم والتكلفة دون التضحية بالكفاءة. تم بناء نموذج رياضي يحقق ذلك داخل بيئة المحاكاة، حيث شمل النموذج تمثيل ملفات الإرسال والاستقبال ومعلوماته الكهربائية والحث الذاتي والمقاومة ومعامل الاقتران بين الملفين، كما تم تحليل تأثير جهد التشغيل والمسافة الفاصلة بين الملفين والأقطار الخارجية للملفات على كفاءة نقل الطاقة والقدرة المنقولة، وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في القدرة المنقولة وصلت إلى 14.24 KW وهي قدرة كبيرة نسبياً، مع كفاءة بلغت 84.61% عند جهود عالية عند قطر ملف الإرسال 400 mm.

## The Effect of Operating Voltage and External Diameters of Coils in Wireless Charging System for Electric Vehicles (Evs) By Magnetic Resonance Imaging (MRI)

Allalah Omran<sup>a\*</sup>, Hamed Said<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Physics, Faculty of Science, University of Sebha, Sebha, Libya.

<sup>b</sup>Renewable Energy Department, Faculty of Engineering, University of Sebha, Sebha, Libya.

### Keywords:

Magnetic Resonance Coupling.  
Electric Vehicles.  
The Official International  
Standard for Charging Electric  
Vehicles.  
Series System Connection.  
Inductive Coupling.

### ABSTRACT

In this research, a wireless charging system for electric vehicles (EVs), based on the principle of magnetic resonance coupling (MRC), is characterized by high transmission capacity and good operating efficiency, especially when the operating voltage is raised. A system was designed that achieves stable and effective performance at high operating voltages, which contributes to reducing size and cost without sacrificing efficiency. A mathematical model was built to achieve this within the simulation environment. The model included the representation of the transmitting and receiving coils, their electrical information, self-inductance, resistance, and the coupling coefficient between the two coils. The effect of the operating voltage, the separation distance between the two coils, and the outer diameters of the coils on the efficiency of energy transfer and the transmitted power was also analyzed. The results showed a noticeable improvement in the transmitted power, reaching 14.24 KW, which is a relatively large capacity, with an efficiency reaching 84.61% at high voltages at a transmission coil diameter of 400 mm.

تكفل الشحن بكفاءة وأمان دون المساس براحة المستخدم أو استقرار الشبكة الكهربائية. وعلى الرغم من التقدم في تقنيات الشحن اللاسلكي، إلا أنها لاتزال تعاني من بعض القيود، منها الحاجة إلى التوصيل اليدوي، والتعرض للتلوث الميكانيكي، والمحدودية في الأتمتة، لذلك برزت تقنية الشحن اللاسلكي، كحل مبتكر يعزز كفاءة التشغيل ويقلل من التدخل البشري، من بين تقنيات

### 1. المقدمة

في ظل التوجه العالمي نحو الحد من انبعاثات الكربون وتعزيز الاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة، باتت السيارات الكهربائية (EVs) تمثل أحد المحاور الأساسية في التحول المستدام لأنظمة النقل. مع تزايد الاعتماد على المركبات الكهربائية، ومؤخراً ظهرت تحديات جوهرية مرتبطة بتوفير البنية التحتية

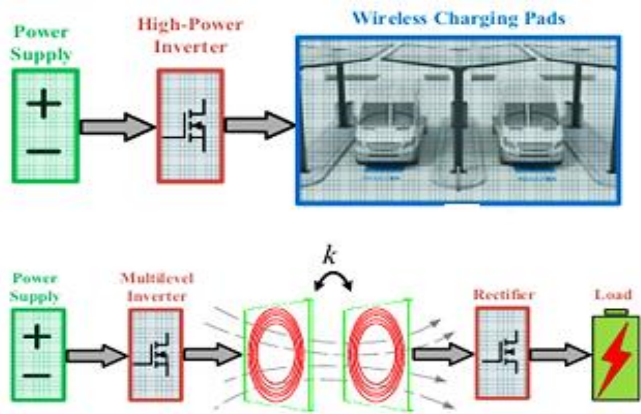
\*Corresponding author.

E-mail addresses: [all.omran@gmail.sebhau.edu.ly](mailto:all.omran@gmail.sebhau.edu.ly), (H. A.Said) [hmdhksd54@gmail.com](mailto:hmdhksd54@gmail.com).

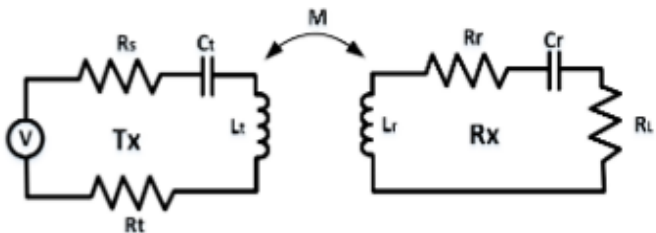
الإرسال والاستقبال ودراسة تأثير زيادة جهد التشغيل على كفاءة وقدرة نقل المنظومة ومدى زيادة قدرة الإرسال بين ملفين ويمكن الاستفادة من ذلك في تطوير الجيل القادم من أنظمة الشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية.

## 2. المواد وطرق العمل

صممت ملفات الإرسال والاستقبال أصغر من الدراسات السابقة وذلك بمحاكاة برنامج صمم ملفات وتم استخدامها في برنامج اخر يحاكي رياضياً منظومة نقل الطاقة اللاسلكية لشحن المركبات الكهربائية بواسطة برنامج ماتلاب وشكل (1) يوضح منظومة متكاملة لشحن المركبات كهربية التي تتم بها عملية الشحن في محطات موجودة على الطريق حيث يكون ملف الإرسال في الأرض تحت محطة وملف الاستقبال أسفل السيارة، تقف السيارة فوق لوح الشحن وتتم عملية الشحن.



شكل 1: مخطط متكامل لمنظومة شحن لاسلكي في المركبات الكهربائية [6].  
من الشكل (1)، ويفرض أن الحث الذاتي لملف الإرسال الدائري المسطح مساو للحث الذاتي لملف الاستقبال الدائري المسطح وعندها يتحقق الربط بالرنين المغناطيسي للمنظومة المذكورة وبذلك يتم نقل أكبر قدر من الطاقة، ونتيجةً للحث في ملف الإرسال المتكون بسبب مرور تيار متردد في ملف ينشأ تيار متردد في ملف الاستقبال والحث الذاتي لملف الاستقبال  $L_r$  مساوٍ للحث الذاتي لملف الإرسال  $L_t$  الحث الذاتي للملف، شكل (2) يبين مخطط لنوع توصيل دائري الإرسال والاستقبال توالي-توالي لمكونات دائرتين [7].



شكل 2: مخطط دائرة الإرسال ودائرة الاستقبال توصيل على التوالي.

معادلة (1) تعبر عن معادلة ويلر للحث الذاتي [8]

$$L_t = \frac{(\mu_0)(N_t B)^2}{(8B+11w)} \quad (1)$$

$$Bw = r_{outt} - r_{int} = \frac{(r_{outt} + r_{int})}{2}$$

حيث إن  $N_t$  عدد لفات ملف الإرسال و  $r_{outt}$  نصف القطر الخارجي لملف الإرسال و  $r_{int}$  نصف القطر الداخلي لملف الإرسال  $B$  متوسط نصف قطر  $W$  سمك الملف من الداخل إلى الخارج  $\mu_0$  سماحية الفراغ  $(4\pi \times 10^{-10})$ :

ومعامل الاقتران:  $K [8][9]$

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}}$$

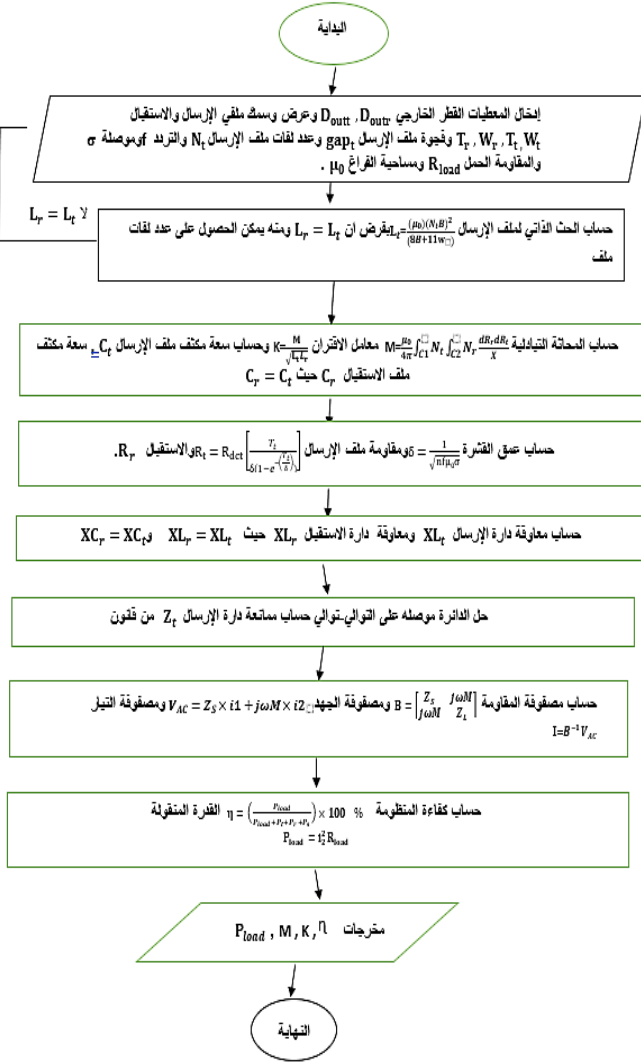
الشحن اللاسلكي، يبرز الاقتران بالرنين المغناطيسي Magnetic Resonance Coupling MRC كأحد أكثر الأساليب تقدماً وفعالية، لما توفره من إمكانية نقل الطاقة لمسافات أكبر نسبياً بالمقارنة مع الشحن التقليدي (Inductive Charging)، تعتمد هذه التقنية على استخدام ملف للإرسال مثبت في الأرضية و ملف للاستقبال مثبت في السيارة مضبوطين علي نفس تردد الرنين المشترك بين الملفين، مما يسمح بتحقيق نقل فعال للطاقة الكهربائية عبر مجال مغناطيسي متذبذب دون الحاجة إلى محاذاة دقيقة بين الملفين، وهي ميزة حاسمة في تطبيقات المركبات المتحركة أو عند وجود تفاوت في النموذج. تقنية MRC تكون فعالة في وجود فجوة هوائية تتراوح بين (100\_300) mm مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الشحن الثابت (Static Wireless Charging) إلا أن هذا المجال لا يزال يواجه عدة تحديات بحثية وهندسية، منها: تصميم وتحسين ملفات الرنين لتحقيق معامل اقتران مرتفع، وتقليل خسائر الدوائر الكهربائية عالية التردد، والحفاظ على التوافق الكهرومغناطيسي (EMC) وإدارة التأثيرات الحرارية، وتأمين الحماية البيولوجية للمستخدمين، العديد من الدراسات تشير إلى ذلك، حيث قام (Ping an Tan) ومؤلفون آخرون بهندسة ملفات سداسية توفر توزيعاً متجانساً للمجال الكهرومغناطيسي، وتحكماً ذكياً ديناميكياً ينتقي أفضل ملف بناءً على بيانات التيار وتم الحصول على نتائج كفاءة قصوى تصل إلى 79.48% عند مسافة 10 cm والقدرة المنقولة 266.9w والتردد المستخدم 86.5 KHz، وقد استخدموا ثلاث ملفات على جانب الإرسال كما وجدوا أن النظام الذي اختار الملف الأنسب تلقائياً حسب مسافة وطوبولوجيا توالي-توالي S-S [1].

قام (Bentalhik, L.; Lassioui) ومؤلفون آخرون بمحاكاة نظرية باستخدام Ansys Maxwell وتم تطبيق النتائج عملياً مما أظهر توافقاً جيداً بين الحسابات العملية ونتائج المحاكاة، والتردد المستخدم 86.5 KHz عند قطر ملفات 300mm لكل ملف وكانت القدرة المنقولة 500W عند مسافة الفاصلة (10-15) cm وكفاءة النقل 80% [2].

قام (Bouanou, T.; Elfadil) وآخرون بتطوير أسلوبٍ منهجيٍ لاختيار أبعاد وسمك لوحة الإرسال والاستقبال التي تحقق أفضل توافق مغناطيسي (Inductive Charging) عبر تحسين النظام العام من حيث القدرة والكفاءة وتبات التشغيل عند الانحراف، وتم استخدام Ansys Maxwell لتصميم ملفات الإرسال والاستقبال وضبط التردد، وكان قطر ألواح ملفات (30-40) cm وتحصل على قدرة 3.7KW وكفاءة نقل 90.02% عند 12cm [3].

قام (Foote, Costinett) ومؤلفون آخرون باستخدام FAM وهي طريقة حل عددية لحل المسائل المعقدة في المجالات الكهرومغناطيسية لتخطي الأخطاء التقليدية في أبعاد الملفات وتصميم ملفات أفضل، تم استخدام الفريت وكانت القدرة المنقولة 6.6KW بكفاءة 95% عند مسافة 21cm، والتردد المستخدم 86.5KHz، الملفات المستخدمة مسطحة (Planar) مصممة وفقاً لتحليل فورية بشكل غير تقليدي ليس دائري أو مربع بواسطة تحليل فورييه تؤدي إلى ملفات مخصصة ذات ملفات مخصصة ونوع طوبولوجيا SS [4]. قام (Vekil Sari) ومؤلفون آخرون بتحليل منهجي لمواصفات ملف (القطر، عدد لفات، مسافات بين لفات) عبر محاكاة ثلاثية الأبعاد لتحقيق معامل توصيل مرتفع وكفاءة محسنة، كان قطر ملف الإرسال 320mm وملف الاستقبال 280mm والتردد 20KHz عند مسافة فاصلة 20cm ونوع طوبولوجيا SS، تحصل على كفاءة 74.84% وقدرة 1011.85W [5].

بناء على ذلك تهدف هذه الورقة لتحسين الأقطار الخارجية والداخلية للملفي



شكل 3: المخطط الانسيابي لمحاكاة منظومة نقل الطاقة اللاسلكي لشحن المركبات الكهربائية بالربط بالرنين المغناطيسي.

### 3. النتائج والمناقشة

لدراسة تأثير الأقطار الخارجية لملفي الإرسال والاستقبال وجهود التشغيل والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال على منظومة نقل الطاقة اللاسلكي لشحن المركبات الكهربائية، حيث مدي الأقطار المستخدمة في المركبات الكهربائية ما بين (600-800) mm وأعلى قدرة نقل كانت 11KW، الجدول (1)، يبين قيم كل من أقطار الملفات المختارة في الإرسال والاستقبال

جدول 1: بارامترات التصميم الأول لملفي الإرسال (1) والاستقبال (1).

الكمية	رمز	ملف الإرسال (1) (mm)	ملف الاستقبال (1) (mm)
القطر الخارجي	$D_{out}$	265	230
القطر الداخلي	$D_{in}$	175	172.5
عدد اللفات	N	50	49.36
الفجوة بين الأسلاك	Gap	0	0.2267
عرض الملف	W	10	0.25
سمك سلك الملف	T	25	25

الشكل (4)، يوضح العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500V، من النتائج يلاحظ انخفاض ملحوظ عند زيادة المسافة الهوائية بين ملفي الإرسال والاستقبال حيث سجل معامل اقتران 0.2097 عند مسافة فاصلة 100mm، واستمر

حيث إن M الحث المتبادل بين ملفين  $L_t$  الحث الذاتي لملف الإرسال و  $L_r$  الحث الذاتي لملف الاستقبال، والعوامل التي تؤثر في عمق القشرة  $\delta$  هي التردد  $\sigma$  وموصلية الكهربية لمادة السلك وقطر السلك ونوع مادة وشكل السلك [10]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma}} \quad (3)$$

نعلم أن مقاومة الموصل في حالة التيار المستمر لملف الإرسال والاستقبال تعطى بالعلاقة [11]:

$$R_{dct} = \frac{l_t}{\sigma w_t T_t} \quad (4)$$

حيث  $S/mm$  ( $\sigma = 5.8 \times 10^4$ )، طول سلك ملفي الإرسال والاستقبال،  $F$  التردد الرنيني،  $\mu_0$  سماحية الفراغ ( $4\pi \times 10^{-10} \frac{H}{mm}$ )، عرض ملف الإرسال،  $w_t$  عرض ملف الاستقبال،  $T_t$  سمك سلك ملف الإرسال،  $T_r$  سمك سلك ملف الاستقبال.

مقاومة التيار المتردد في ملف الإرسال تعطى بالعلاقة [12]:

$$R_t = R_{dct} \left[ \frac{T_t}{\delta (1 - e^{-\frac{T_t}{\delta}})} \right] \dots \dots \dots (5)$$

حيث  $R_{dct}$  مقاومة التيار المستمر لملف الإرسال  $T_t$  سمك سلك ملف الإرسال.

والحث المتبادل بين الملفين يعطى بالقانون نيومان كالتالي: [13]

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C_1}^0 N_t \int_{C_2}^0 N_r \frac{dR_r dR_t}{x} \quad (6)$$

حيث  $N_T$  عدد لفات ملف الإرسال و  $N_r$  عدد لفات ملف الاستقبال و  $dR_t$  معدل تفاضل القطر الخارجي لملف الاستقبال و  $x$  المسافة الفاصلة بين ملفين ونتيجة لمحاثة التبادلية الناشئة بين دائرة الإرسال والاستقبال ويكون الجهد كلا من دائرة الإرسال والاستقبال [14]:

$$V_{AC} = Z_S * i_1 + j\omega M * i_2 \dots \dots \dots (7)$$

$$0 = Z_L * i_2 + j\omega M * i_1 \dots \dots \dots (8)$$

$$V_{ac} = \begin{bmatrix} V_{AC} \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

$$\begin{bmatrix} Z_S & j\omega M \\ j\omega M & Z_L \end{bmatrix} \dots \dots \dots (10) B =$$

حيث  $V_{AC}$  جهد المصدر B مصفوفة المقاومة  $Z_S$  ممانعة دائرة الإرسال و  $Z_L$  ممانعة دائرة الاستقبال و I التيار المار في الدائرة من قانون [15]:

$$= B^{-1} V_{AC} \dots \dots \dots (11)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

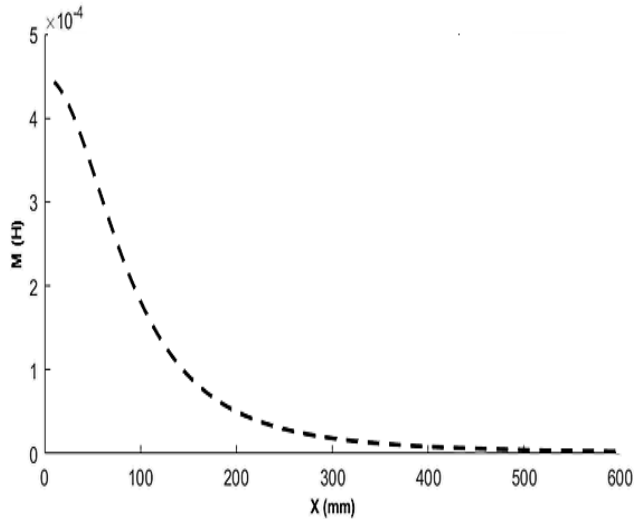
و يتم حساب كفاءة الدائرة: [15]

$$P_t = i_1^2 R_t P_s = i_1^2 R_s \quad P_r = i_2^2 R_r$$

$$P_{load} = i_2^2 R_{load}$$

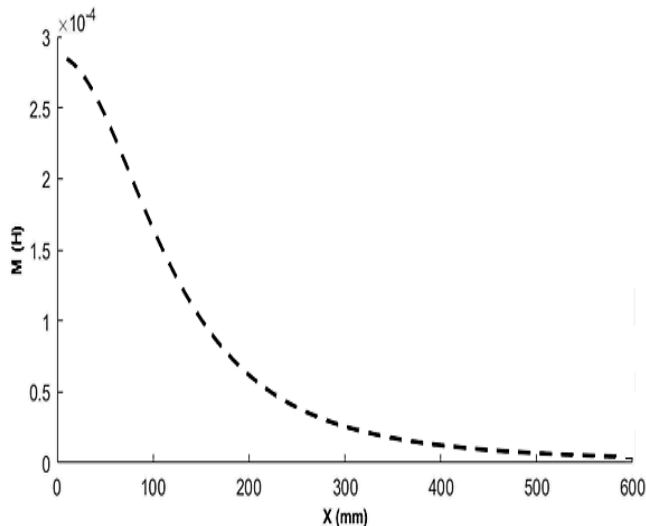
$$\eta = \left( \frac{P_{load}}{P_{load} + P_t + P_r + P_s} \right) \times 100 \% \quad (13)$$

حيث  $P_s$  القدرة الداخلة  $P_t$  قدرة ملف الإرسال و  $P_r$  قدرة ملف الاستقبال و  $P_{load}$  قدرة الحمل (3)، يوضح مخطط تصميم وتحليل منظومة نقل الطاقة اللاسلكي، حيث تم اختيار أبعاد ملفات الإرسال وتم الحصول على ملفات استقبال له نفس الحث الذاتي ليتحقق الربط بالرنين المغناطيسي، ومن تم حساب الخصائص الكهرومغناطيسية للملفات كالحث الذاتي والمتبادل ومعامل الاقتران، وبعد ذلك تدمج هذه القيم في نموذج محاكاة لتمثيل منظومة نقل الطاقة اللاسلكي ومنها تم تصميم نموذجين للملفات الإرسال والاستقبال.



شكل 6: العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500 V.

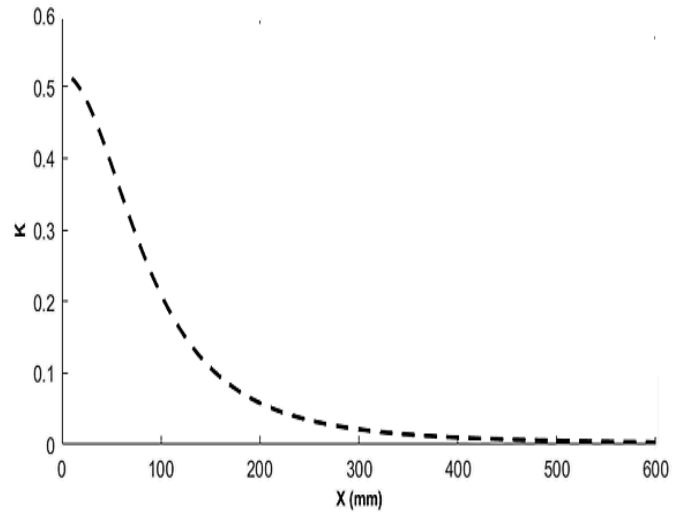
ويوضح شكل (7) العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجلت المحاطة التبادلية 0.0001817H عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر الانخفاض ليصل معامل الاقتران إلى  $5.019 \times 10^{-5}$  عند مسافة 200mm , وهي نفس النتائج عند 500V وهذا يبين أن المحاطة التبادلية لا تتأثر بجهد التشغيل.



شكل 7: العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V.

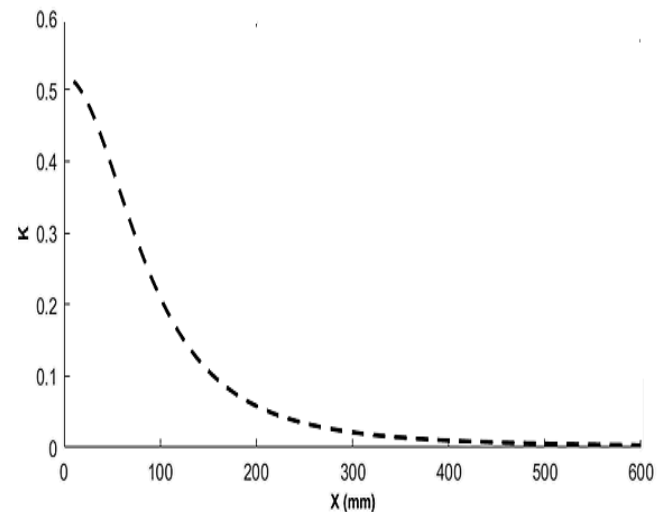
يوضح شكل (8) العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج أن القدرة المنقولة كانت 2.12 KW عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر الارتفاع لتصل القدرة إلى أقصى قيمة وهي 5.555 KW عند مسافة 184 mm وعند مسافة 200mm سجلت 5.293 KW.

الانخفاض ليصل معامل الاقتران إلى 0.05794 عند مسافة 200mm , وهذا الانحدار اللوغاريتمي في معامل الاقتران يمكن يفسر بأن المجال المغناطيسي يتلاشى بسرعة خارج نطاق الفيض فكلاً ما ابتعد الملفات زاد التسرب خارج نطاق الفيض المغناطيسي وفقد الاقتران.



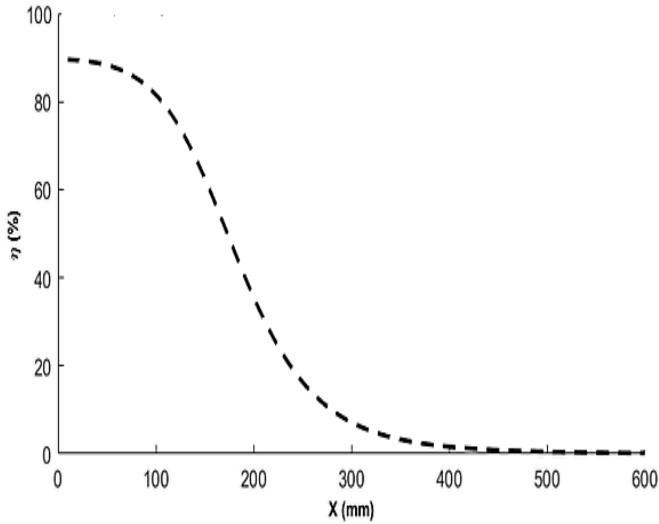
شكل 4: العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500 V.

شكل (5), يبين العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800V. حيث سجل معامل اقتران 0.2097 عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر الانخفاض ليصل معامل الاقتران إلى 0.05794 عند مسافة 200mm , وهي نفس النتائج عند 500 V , وهذا يبين أن معامل الاقتران لا يتأثر بجهد التشغيل، وذلك لأن معامل الاقتران يعتمد على أبعاد ملفي الإرسال والاستقبال فقط.



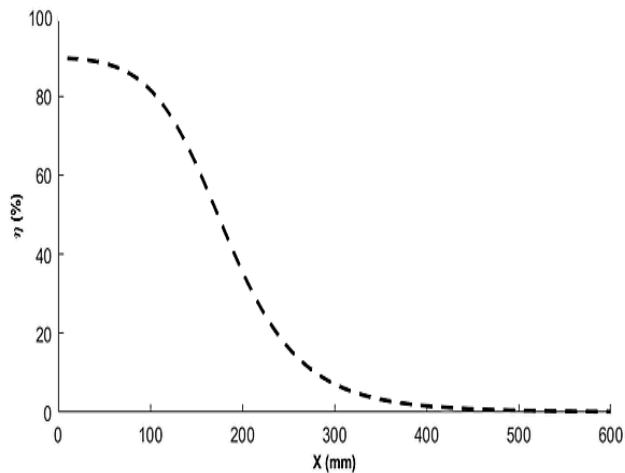
شكل 5: العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V.

شكل (6) للعلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500V , وتظهر النتائج انخفاضاً ملحوظاً عند زيادة المسافة الهوائية بين ملفي الإرسال والاستقبال، حيث سجل محاطة تبادلية  $181.7 \mu H$  عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر الانخفاض لتصل المحاطة إلى  $5.019 \times 10^{-5}$  H عند مسافة 200mm , وهذا الانخفاض في M يظهر أن المحاطة التبادلية تعتمد على الأبعاد والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال.



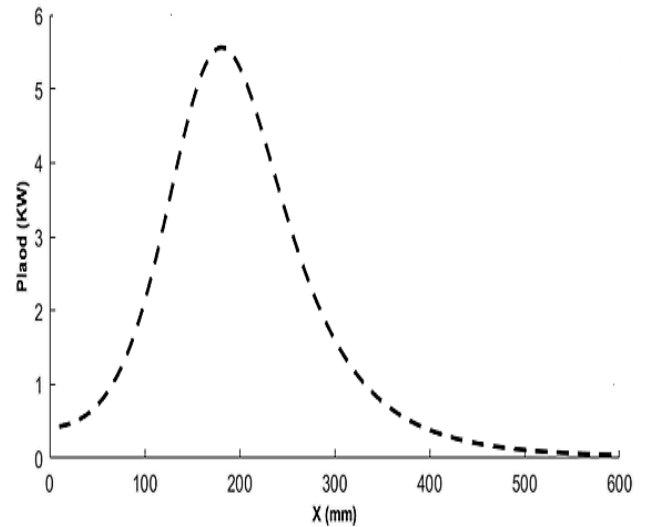
شكل 10: العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500 V.

ويوضح شكل (11) العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجلت كفاءة المنظومة نفس القيم عند جهد تشغيل 500 V وهي 81.59 % عند مسافة فاصلة 100 mm و 35.62 % عند مسافة 200mm وهذا يبين عدم تأثر الكفاءة من رفع جهود التشغيل، لأن الكفاءة تتأثر بقدرة المرسل والمستقبل وقدرة الحمل وليس بالتيار المار في المنظومة.



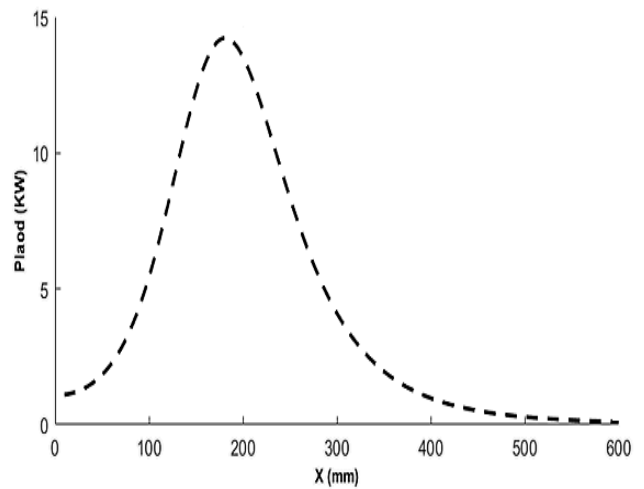
شكل 11: العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V.

شكل (12) يوضح العلاقة بين كفاءة المنظومة والقدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1)، حيث يظهر شكل كفية ثلاثية الأبعاد، المنطقة الصفراء تكون فيها قيمة الكفاءة والقدرة عالية والمسافة الفاصلة أقل ما يكون، وهنا زاد مدى الإرسال ليصل إلى أقصى قيمة عند 184mm ويستمر إلى ما بعد 200mm، أما المنطقة الزرقاء تعبر عن انخفاض قيمة الكفاءة والقدرة؛ نتيجة لزيادة المسافة الفاصلة بين الملفين وهنا يظهر تأثير سلبى لزيادة المسافة بين الملفين حيث ينخفض الفيض المغناطيسي بين الملفين كلما زادت المسافة وهذا يقلل من الكفاءة والقدرة المنقولة.



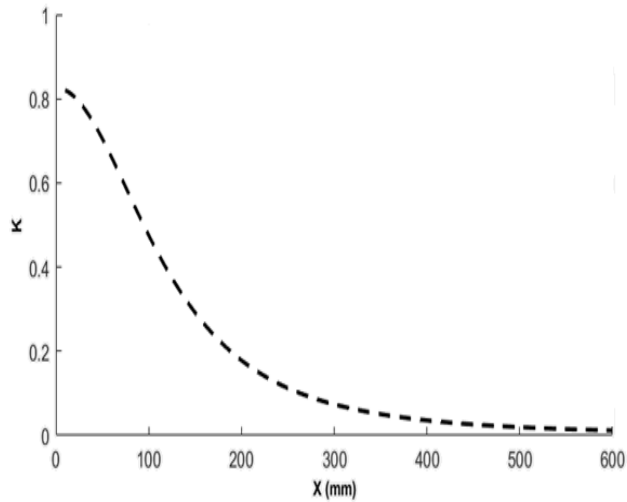
شكل 8: العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500 V.

ويوضح شكل (9) العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجلت القدرة المنقولة 5.426 KW عند مسافة فاصلة 100 mm واستمر الارتفاع لتصل القدرة إلى أقصى قيمة وهي 14.24KW عند مسافة 184 mm و عند مسافة 200 mm سجلت 13.55 KW , وعليه فإن القدرة المنقولة تتأثر بجهد التشغيل، وزيادة جهد التشغيل يرفع مقدار القدرة المنقولة وتزيد المسافة الفاصلة بين الملفين، لأن زيادة الجهد يرفع من التيار الداخل إلى الدائرة وهذا مرتبط مباشرة بالقدرة المنقولة.



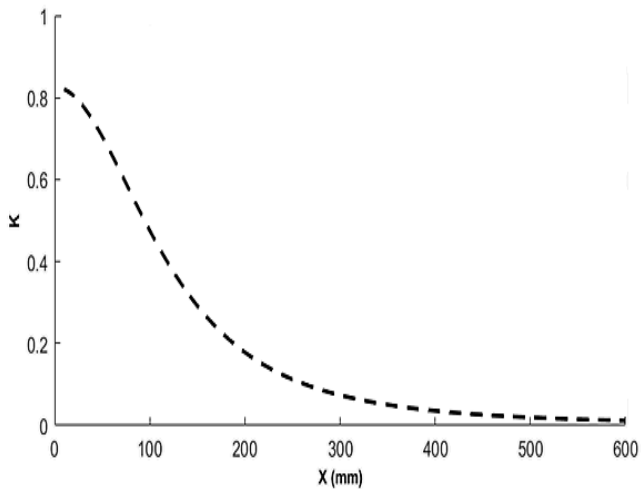
شكل 9: العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 800 V.

ويوضح شكل (10) العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج أن كفاءة المنظومة كانت 81.59 % عند مسافة فاصلة 100 mm , وسجلت 35.62 % عند مسافة 200 mm.



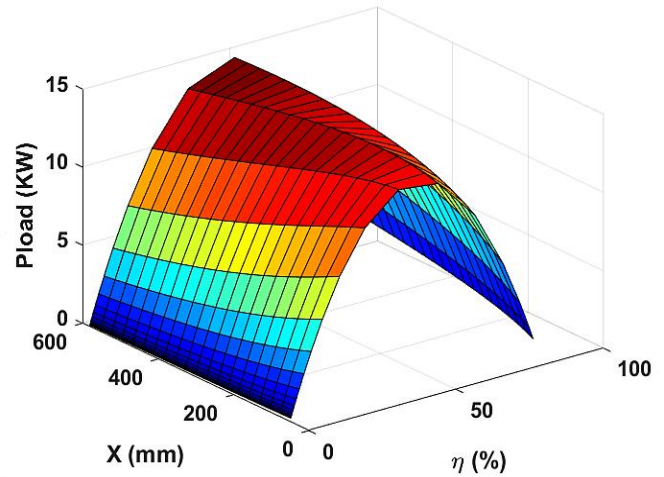
شكل 13: العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V.

ويوضح شكل (14) العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجل معامل الاقتران 0.4757 عند مسافة فاصلة 100 mm استمر الانخفاض ليصل معامل الاقتران إلى 0.1784 عند مسافة 200mm , وهي نفس النتائج عند 500 وهذا يبين ان معامل الاقتران لا يتأثر بجهد التشغيل لكن يتأثر بتغيير بارامترات ملفي الإرسال والاستقبال؛ لزيادة معامل الاقتران عن تصميم الأول لملفي الإرسال والاستقبال.



شكل 14: العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V.

يوضح شكل (15) العلاقة بين المحاثة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج انخفاضًا ملحوظًا عند زيادة المسافة الهوائية بين ملفي الإرسال والاستقبال حيث سجل معامل اقتران 0.4757 عند مسافة فاصلة 100mm , واستمر الانخفاض ملحوظًا ليصل معامل الاقتران إلى 0.1784 عند مسافة 200 mm , وهذه النتائج تبين زيادة مقدار معامل الاقتران بزيادة الأقطار الخارجية لملف الإرسال والاستقبال بالمقارنة مع التصميم الأول لملفي الإرسال والاستقبال، وذلك لزيادة الكتلة المعدنية للملفين لاستقبال أكبر قدر من الفيض المغناطيسي، و من خلال هذه النتائج يظهر أن تغيير الأقطار الخارجية يؤثر بشكل كبير على عمل المنظومة وذلك لأنه يرفع من الاقتران بين دارة الإرسال والاستقبال وهذا يؤثر على زيادة التيار المار في الدائرة .



شكل 12: العلاقة بين كفاءة المنظومة والقدرة المنقولة ومسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1) عند جهود 800V.

تم تصميم ملفي الإرسال والاستقبال من اجل دراسة زيادة الأقطار الخارجية لهما، وجدول (2) يوضح قيم ملف الإرسال (2) والاستقبال (2). وبذلك يتم الحصول على العناصر الأساسية للملفات الموضحة في الجدول (3).

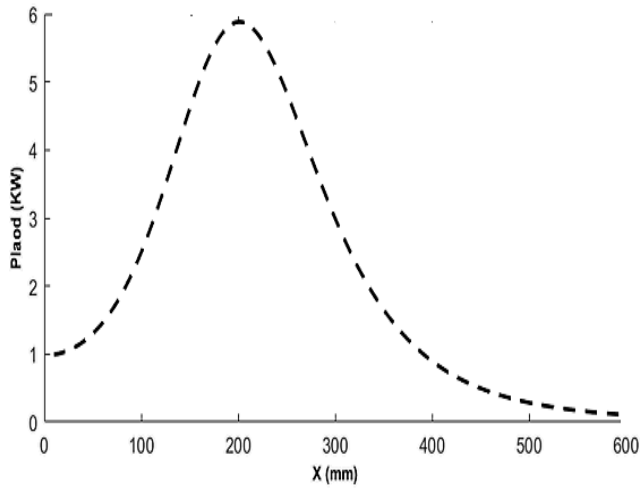
جدول 2: قيم الربط بالرنين المغناطيسي لملف الإرسال (1) والاستقبال (1).

وصف	رمز	القيمة
الحث الذاتي لملف الإرسال (1)	$L_t$	$3.953 \times 10^{-4} H$
الحث الذاتي لملف الاستقبال (1)	$L_r$	$H3.953 \times 10^{-4}$
مقاومة ملف الإرسال (1)	$R_t$	$\Omega 0.269$
مقاومة ملف الاستقبال (1)	$R_r$	$\Omega 9.4946$
سعة مكثف ملف الإرسال (1)	$C_t$	$4.0478 \times 10^{-9} f$
سعة مكثف ملف الاستقبال (1)	$C_r$	$4.0478 \times 10^{-9} f$
معامل الجودة ملف الإرسال (1)	$Q_t$	175
معامل الجودة ملف الاستقبال (1)	$Q_r$	48
مقاومة الحمل	$R_{load}$	$\Omega 100$

جدول 3: بارامترات ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2).

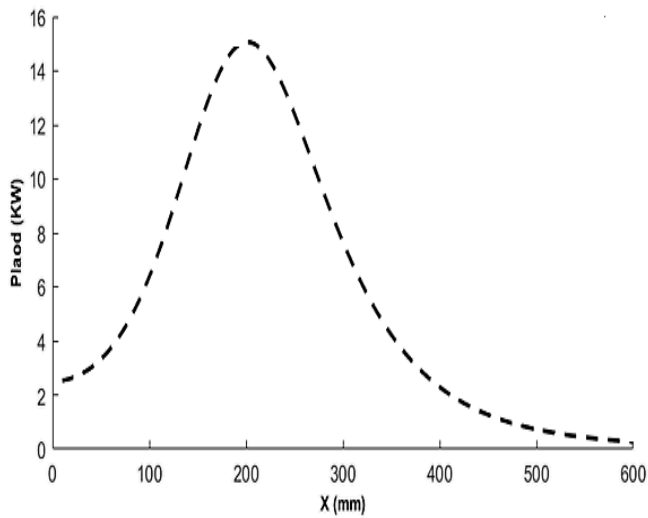
الكمية	رمز	ملف الإرسال (2)	ملف الاستقبال (2)
قطر الخارجي	$D_{out}$	400	400
قطر الداخلي	$D_{in}$	300	200
عدد لفات	$N$	23.6771	30
الفجوة بين الاسلاك	$gap$	0.5	0
عرض ملف	$W$	1.6465	10
سمك سلك الملف	$T$	20	50

يوضح الشكل (13) العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج انخفاضًا ملحوظًا عند زيادة المسافة الهوائية بين ملفي الإرسال والاستقبال حيث سجل معامل اقتران 0.4757 عند مسافة فاصلة 100mm , واستمر الانخفاض ملحوظًا ليصل معامل الاقتران إلى 0.1784 عند مسافة 200 mm , وهذه النتائج تبين زيادة مقدار معامل الاقتران بزيادة الأقطار الخارجية لملف الإرسال والاستقبال بالمقارنة مع التصميم الأول لملفي الإرسال والاستقبال، وذلك لزيادة الكتلة المعدنية للملفين لاستقبال أكبر قدر من الفيض المغناطيسي، و من خلال هذه النتائج يظهر أن تغيير الأقطار الخارجية يؤثر بشكل كبير على عمل المنظومة وذلك لأنه يرفع من الاقتران بين دارة الإرسال والاستقبال وهذا يؤثر على زيادة التيار المار في الدائرة .



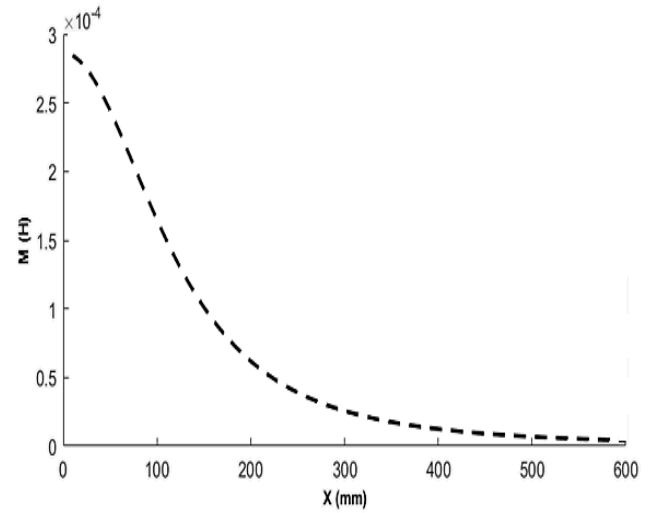
شكل 17: العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملف الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V.

يوضح شكل (18) العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجلت القدرة المنقولة 5.426 KW عند مسافة فاصلة 100 mm واستمر إرتفاعها لتصل القدرة إلى أقصى قيمة وهي 14.24KW عند مسافة 200mm , وعليه فأَنَّ القدرة المنقولة تتأثر بجهود التشغيل، فزيادة جهود التشغيل رفع من مقدار القدرة المنقولة، وزاد من مدى الإرسال بين الملفين.



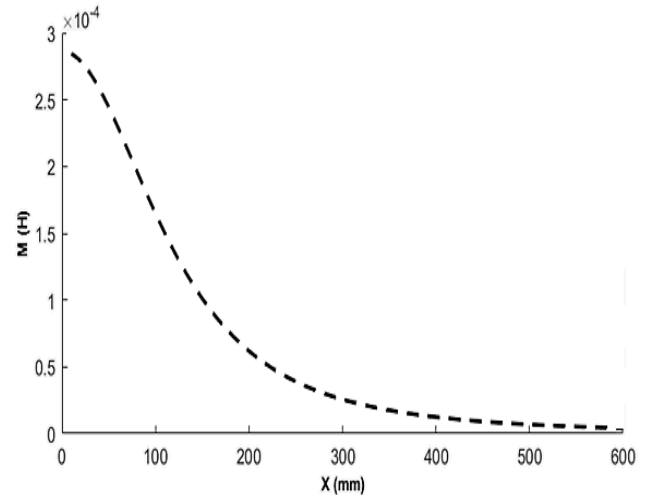
شكل 18: العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V.

يوضح شكل (19) العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج أن كفاءة المنظومة كانت % 84.61 عند مسافة فاصلة 100 mm , وسجلت % 48.73 عند مسافة 200 mm.



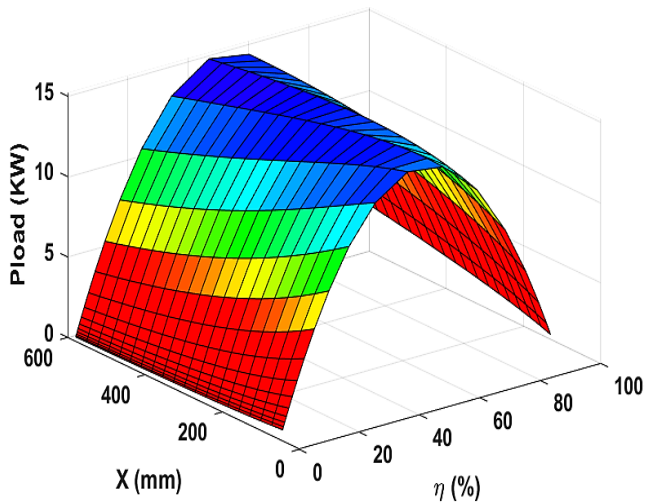
شكل 15: العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V.

ويوضح شكل (16) العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V , حيث سجل المحاطة التبادلية  $0.0001817H$  عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر الانخفاض ليصل معامل الاقتران إلى  $5.019 \times 10^{-5}$  عند مسافة 200mm , وهي نفس النتائج عند 500V وهذا يبين أن المحاطة التبادلية لا تتأثر بجهد التشغيل وفي حين أن زيادة القطر الخارجي لملي الإرسال والاستقبال الي هذا القدر خفض من المحاطة التبادلية بين ملفين بالمقارنة مع التصميم الأول.



شكل 16: العلاقة بين المحاطة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800V.

يوضح شكل (17) العلاقة بين القدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V , وتبين النتائج أن القدرة المنقولة كانت 2.12 KW عند مسافة فاصلة 100 mm , واستمر ارتفاع القدرة المنقولة ليصل إلى أقصى قيمة له وهي 5.555 KW عند مسافة 184 mm وعند مسافة 200mm سجلت القدرة 5.293 KW.



شكل 21: العلاقة بين كفاءة المنظومة والقدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2).

جدول (4) يبين قيم الربط المتحصل عليها للملف المصمم (2).

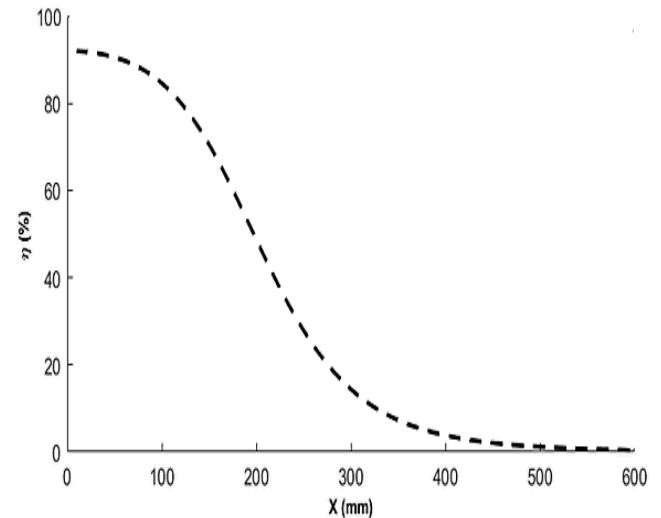
جدول 4: قيم الربط بالرنين المغناطيسي لملف الإرسال (2) والاستقبال (2).

القيمة	رمز	وصف
346.6272 H	$L_t$	الحث الذاتي لملف الإرسال (2)
346.6272 H	$L_r$	الحث الذاتي لملف الاستقبال (2)
0,2151 $\Omega$	$R_t$	مقاومة ملف الإرسال (2)
46 $\Omega$	$R_r$	مقاومة ملف الاستقبال (2)
$1.0114 \times 10^{-9}f$	$C_t$	سعة مكثف ملف الإرسال (2)
$1.0114 \times 10^{-9}f$	$C_r$	سعة مكثف ملف الاستقبال (2)
46	$Q_t$	معامل الجودة لملف الإرسال (2)
860.7830	$Q_r$	معامل الجودة لملف الاستقبال (2)
100 $\Omega$	$R_{load}$	مقاومة الحمل

#### 4. الاستنتاجات والتوصيات

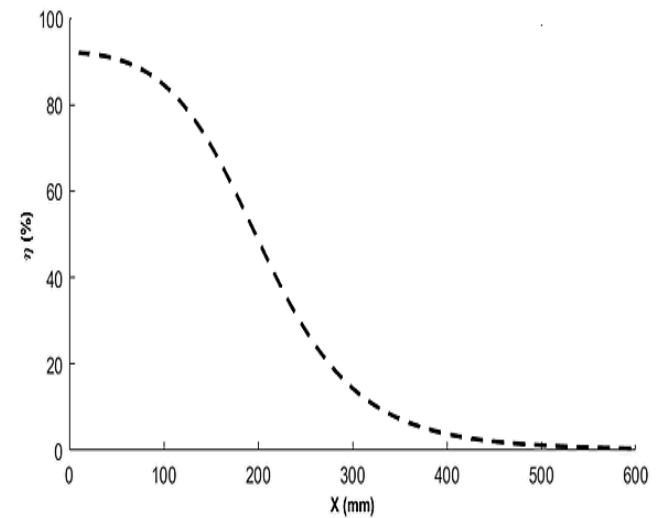
تهدف هذه الورقة لتحسين الأقطار الخارجية والداخلية للملفي الإرسال والاستقبال ودراسة تأثير زيادة جهود التشغيل على كفاءة وقدرة نقل المنظومة ومدى زيادة قدرة الإرسال بين الملفين، ويمكن الاستفادة من ذلك في تطوير الجيل القادم من أنظمة الشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية.

من النتائج المتحصل عليها تبين أن التصميم الثاني يحقق أداءً أفضل مقارنةً بالتصميم الأول. فقد أظهر قيمة أعلى في معامل الاقتران والمحاثة التبادلية، إضافةً إلى تحقيق قدرة منقولة تصل إلى 14.24 KW بكفاءة 84.61%. كما ساهم هذا التصميم في زيادة المسافة الفاصلة بين الملفين إلى 200 mm مع الحفاظ على أداء جيد للنقل، وهو ما يعد ميزة مهمة في تطبيقات نقل القدرة اللاسلكية. كذلك أظهرت النتائج أن زيادة جهود التشغيل يؤدي إلى زيادة القدرة المنقولة فقط، دون تأثير ملحوظ على باقي البارامترات المدروسة. وبناءً على ذلك يمكن اعتبار التصميم الثاني الخيار الأكثر كفاءة وملاءمة لتحسين أداء نظام نقل القدرة، خاصة في الحالات التي تتطلب مسافة فصل أكبر بين الملفين وقدرة نقل عالية مع الحفاظ على كفاءة جيدة للنقل، وعلى الرغم من أن القدرة المنقولة في التصميم الأول كانت أقل قليلاً مقارنةً بالتصميم الثاني، إلا أنه يُعد تصميمًا فعالاً ومناسباً، حيث تمكن من تحقيق قدرة منقولة 13.55KW عند مسافة 184 mm بكفاءة 81.59% باستخدام أقطار ملفات أصغر مقارنةً بما ورد في الدراسات السابقة. ويُعد ذلك مؤشراً على التحسن في تصميم النظام من حيث تقليل حجم الملفات مع الحفاظ على قدرة نقل جيدة. إن هذا التحسن في تقليل أبعاد الملفات يسهم بشكل مباشر في خفض حجم النظام الكلي وتقليل التكلفة، يمكن اعتبار التصميم الثاني الخيار



شكل 19: العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملف الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 500V.

ويوضح شكل (20) العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V، حيث سجلت كفاءة المنظومة نفس القيم عند جهد تشغيل 500 V وهي 84.61% عند مسافة فاصلة 100 mm و 48.73% عند مسافة 200mm وهذا يبين عدم تأثير الكفاءة برفع جهود التشغيل ولكن زيادة الأقطار الخارجية رفعت من كفاءة المنظومة.



شكل 20: العلاقة بين كفاءة المنظومة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (2) والاستقبال (2) عند جهد تشغيل 800 V.

شكل (21) يوضح العلاقة بين كفاءة المنظومة والقدرة المنقولة والمسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال (1) والاستقبال (1)، حيث يظهر شكل كعبة ثلاثية الأبعاد، ويظهر فيها المنطقة الصفراء التي تكون فيها قيمة الكفاءة والقدرة عالية و مسافة الفاصلة أقل ما تكون و هنا زاد مدى الإرسال عند 200mm يستمر إلى ما بعد ذلك و المنطقة الزرقاء تعبر عن انخفاض قيمة الكفاءة و القدرة؛ نتيجة لزيادة المسافة الفاصلة بين الملفين، وهنا يظهر التأثير السلبي لزيادة المسافة بين الملفين حيث ينخفض الفيض المغناطيسي بين الملفين كلما زادت المسافة وهذا يقلل من الكفاءة والقدرة المنقولة.

Conference and Expo (ITEC)\*, Chicago, IL, USA, Jun, pp. 1–5, 2024.

[7] X. Li et al., “A wireless magnetic resonance energy transfer system for micro implantable medical sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 8, 2012.

[8] R. Wu, S. Raju, M. Chan, J. K. O. Sin, and C. P. Yue, “Silicon-embedded receiving coil for high-efficiency wireless power transfer to implantable biomedical ICs,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 34, no. 1, pp. 9–11, Jan. 2013.

[9] F. Jolani, J. Mehta, Y. Yu, and Z. (David) Chen, “Design of wireless power transfer systems using magnetic resonance coupling for implantable medical devices,” *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 40, pp. 141–151, 2013.

[10] E. G. Kilinc, M. A. Ghanad, F. Maloberti, and C. Dehollain, “A remotely powered implantable biomedical system with location detector,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 113–123, Feb. 2015.

[11] M. Schormans, V. Valente, and A. Demosthenous, “Frequency splitting analysis and compensation method for inductive wireless powering of implantable biosensors,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, Art. 1229, Aug. 2016.

[12] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007.

[13] M. K. Alghairi, N. B. Sulaiman, R. B. M. Sidek, and S. Mutashar, “Optimization of spiral circular coils for bio-implantable micro-system stimulator at 6.78 MHz ISM band,” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, pp. 7046–7054, June 2016.

[14] X. Zhang, X. Zhang, C. Zhang, S. Yao, H. Qi, and Y. Xu, “Optimal design and analysis of wireless power transfer system with converter circuit,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, Article no. 27, 2017.

[15] A. Salman, A. Abbas, J. Maqbool, and K. M. L. Bhatti, “Efficient wireless electric power transmission using magnetic resonance coupling,” *Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 2235–2238, 2014.

الأكثر كفاءة وملاءمة لتحسين أداء أنظمة نقل القدرة اللاسلكية في مثل هذه التطبيقات.

من ناحية أخرى، يُعد التصميم الأول خيارًا عمليًا ومناسيًا للتطبيقات التي تتطلب أنظمة نقل قدرة لاسلكية مدمجة وذات كفاءة جيدة؛ نظرًا لصغر أبعاد ملفاته وانعكاس ذلك على تقليل حجم النظام الكلي.

وفي الختام، توصي هذه الورقة بإجراء دراسات مستقبلية تتناول استخدام ملفات مستطيلة مسطحة، بالإضافة إلى دراسة تأثير التردد على أداء منظومة نقل الطاقة لاسلكيًا، لما لذلك من دور محتمل في تحسين الكفاءة وزيادة مرونة التصميم.

## 5. قائمة المراجع

[1] P. Tan, L. Wang, B. Wang, and X. Xu, “Dynamic analysis and optimization of wireless power transfer systems considering misalignment and coupling variations,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 4, pp. 4123–4131, 2024.

[2] A. Bentalhik, A. Lassioui, H. E. Fadil, T. Bouanou, A. Rachid, Z. E. Idrissi, and A. M. Hamed, “Analysis, design and realization of a wireless power transfer charger for electric vehicles: theoretical approach and experimental results,” *Veh. J.*, vol. 13, no. 7, p. 121, 2022.

[3] T. Bouanu, H. E. Fadil, and A. Lassioui, “Design methodology and circuit analysis of wireless power transfer system applied to electric vehicles wireless chargers,” *Veh. J.*, vol. 14, no. 5, p. 117, 2023.

[4] A. Foote, D. Costinett, R. Kush, M. Mohammad, and F. Onar, “Fourier analysis and design of a shielded 120 kW inductive wireless system,” *IEEE Trans.*, vol. 39, no. 11, pp. –, Jul. 2024.

[5] V. Sari, “Design and implementation of a wireless power transfer system for electric vehicles,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 3, p. 110, Mar. 2024.

[6] J. Chevinly, S. Salehi Rad, E. Nadi, B. Proca, J. Wolgemuth, A. Calabro, H. Zhang, and F. Lu, “Gallium Nitride (GaN) based high-power multilevel H-bridge inverter for wireless power transfer of electric vehicles,” in \*2024 IEEE Transportation Electrification