

## تحليل أداء شبكات نقل الطاقة اللاسلكية

### و تحسينها

طالب الماجستير: حسين عدنان محمد كلية الهك - جامعة البعث  
اشراف الدكتور: حسام الوفائي

#### ملخص البحث:

يرجع التحدي العالمي المتمثل في تلوث الهواء إلى المركبات القائمة على محرك الاحتراق الداخلي. وبالتالي ، ظهر النقل الكهربائي كصيغةً للبيئة وأكثر موثوقية و ذكاءً .

إن التحدي الرئيسي لمالكي المركبات الكهربائية هو الوقت والجهد في شحن المركبات الكهربائية. تسبب الشواحن السلكية إزعاجًا لمالكي المركبات الكهربائية لتلبية متطلبات الشحن لبطاريات الجهد العالي بعد فترات منتظمة. الحل المحتمل هو الشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية. وظيفة الشحن اللاسلكي تحسين تجربة استخدام المركبات الكهربائية والتغلب على التحديات التي تواجهها أجهزة الشحن السلكية للكهرباء. جذب مفهوم نقل الطاقة اللاسلكية من خلال الحث الكهرومغناطيسي العديد من الباحثين لتنفيذ الشحن اللاسلكي للأجهزة الإلكترونية وكذلك بطاريات الجهد العالي للسيارات الكهربائية. تتمثل التحديات الرئيسية في التكلفة الأولية المرتفعة وكفاءة نقل الطاقة المنخفضة مقارنة بشواحن السيارات الكهربائية السلكية .

يهتم البحث بتحليل النموذج النظري الأساسي لنظام نقل الطاقة اللاسلكي لشحن المركبات الكهربائية و تطوير حلول للحفاظ على أقصى قدر من كفاءة الطاقة والتحقق من ذلك عن طريق إيجاد العلاقات اللازمة.

تم استخدام برنامج Ansys لمحاكاة طريقة التحسين المدروسة حيث تم التوصل من خلاله إلى نتائج مشجعة في مجال نقل الطاقة اللاسلكي للسيارات الكهربائية.

**كلمات مفتاحية :** نقل الطاقة اللاسلكي , الحث المتبادل , الحث الذاتي و التدفق المغناطيسي.

## Analysis and Improvement the Performance of Wireless Power Transmission Networks

### Abstract:

The global challenge represented by air pollution is because of the vehicles which powered by internal combustion engine.

Therefore, the power transmission appeared as a friend for the environment and more reliable and intelligent.

The main challenge for electric vehicle owners is the time and effort involved in charging electric vehicles. The wired chargers cause a handicap for electric vehicle owners to satisfy charging requirements for high voltage batteries after regular periods.

The probable solution is Wireless Power transmission for electric vehicle .The purpose of wireless charging is improving experiment of using electric vehicle and overcoming the challenges of wired charging. The concept of Wireless Power Transfer by electromagnetic inductance attracted many researchers to implement the wireless charging for electronic devices and high voltage batteries for electric vehicle.

The main challenges represented by the high primary cost and the efficiency of low power compared with wired chargers electric vehicle. The research is interested in analyzing the main theoretical model for WPT in charging electric vehicle and developing the solutions to keep the maximum of power efficiency and check that by finding the needed equations.

The Ansys was used to simulate the studied improving method so that it came up with encouraging results in WPT.

**Keywords:** WPT (Wireless Power transmission), Mutual inductance, Self-inductance and Mag flux.

## 1-مقدمة:

يرجع التحدي العالمي المتمثل في تلوث الهواء في المقام الأول إلى المركبات القائمة على محرك الاحتراق الداخلي. في العصر الحالي تشكل الانبعاثات الضارة مصدر قلق عميق للدول بالإضافة إلى ذلك ، يعد الاستخدام المكثف للوقود في النقل قضية رئيسية تؤدي إلى المخاوف البيئية الحالية مثل تغير المناخ وتلوث الهواء وتأثيرات الاحتباس الحراري ، مما يؤدي إلى التجديد العالمي في صناعات السيارات عن طريق تحويل مركبة ICE إلى مركبة كهربائية. وبالتالي ، فإن النقل الكهربائي يبرز كمنقذة نوعية في صناعات النقل ويعتبر صديقًا للبيئة وأكثر أمانًا وموثوقية وأكثر ذكاءً. سيؤدي النقل الكهربائي أيضًا إلى تقليل الاعتماد على الوقود. إن التحدي الرئيسي لمالكي المركبات الكهربائية هو الوقت والجهد المبذول في شحن المركبات الكهربائية. تسبب الشواحن السلكية إزعاجًا لمالكي المركبات الكهربائية لتلبية متطلبات الشحن لبطاريات الجهد العالي بعد فترات منتظمة. الحل المحتمل هو الشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية. من شأن الشحن اللاسلكي أن يعزز تجربة استخدام المركبات الكهربائية والتغلب على التحديات التي تواجهها أجهزة الشحن السلكية للكهرباء. جذب مفهوم نقل الطاقة اللاسلكية من خلال الحث الكهرومغناطيسي العديد من الباحثين لتنفيذ الشحن اللاسلكي للأجهزة الإلكترونية وكذلك بطاريات الجهد العالي للسيارات الكهربائية.

على الرغم من المزايا العديدة للشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية ، واجهت تقنية نقل الطاقة اللاسلكية العديد من التحديات في التنفيذ التجاري في قطاع السيارات. تتمثل التحديات الرئيسية في التكلفة الأولية المرتفعة وكفاءة نقل الطاقة المنخفضة مقارنة بشواحن EV السلكية. علاوة على ذلك ، فإن قضايا السلامة المتعلقة بالمجال الكهرومغناطيسي.

## 2-هدف البحث:

يهدف البحث إلى تحليل النموذج النظري الأساسي لنظام نقل الطاقة اللاسلكي لشحن المركبات الكهربائية والقيام بإجراء برنامج في تحليل هذه الدارة ودراسة الأداء للنظام

القائم على الرنين المغناطيسي لشحن المركبات الكهربائية و تنفيذ تصميمات جديدة للوحة الطاقة وتطوير حلول قابلة للتطبيق و أيضا تطوير حلول للحفاظ على أقصى قدر من كفاءة الطاقة.

### 3- أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في أنه تم حل العديد من المشكلات الرئيسية لتحقيق اقتران قوي بالمجال المغناطيسي بين ملفات الشحن لنقل الطاقة لاسلكيًا بكفاءة. من أجل الاعتماد الواسع النطاق لنظام الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية ، تم تقديم طريقة تحسين جديدة لاقتران لوحة الطاقة مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة الإجمالية لنظام WPT.

### 4- مواد و طرق البحث:

يبدأ البحث بإجراء تحليل نظري لأنواع ملفات الشحن اللاسلكي ل EV واقتراح تصميم ومن ثم إجراء تحسين على هذه الأنواع بإضافة مادة الفريت للملفات و التحقق من النتائج النظرية عن طريق محاكاة الأنواع وتشغيل الدارة باستخدام برنامج ANSYS الذي أعطى نتائج إيجابية مشابهة للنتائج النظرية .

يعتبر برنامج ANSYS(ANalysis SYStem) بمثابة بيئة تصميم كهرومغناطيسي تم تطويرها من قبل شركة SASI بهدف حل المسائل الخطية وغير الخطية للكهرومغناطيسية. يحتوي البرنامج على عدد من العناصر لحل المسائل ذات البعد الواحد وذات البعدين وثلاثية الأبعاد ويمتاز بالمرونة في عمل تصاميم النماذج المختلفة حيث يقوم المستخدم بداية باستخراج العناصر المطلوبة و من ثم يتم ربطها مع بعضها و ضبط بارامتراتهما و بعد الانتهاء يجرى تشغيل البرنامج وأخذ القياسات

المختلفة مما يساعد المستخدم على التأكد من صحة النموذج و ما تم التوصل إليه نظرياً و الوصول بنفس الوقت إلى أفضل قيم للبارامترات المرتبطة به.

تم الاستعانة ببرنامج ANSYS في هذا البحث لدراسة ما يلي :

❖ دراسة تأثير إدخال قلب الفريت إلى ملفات الإرسال والاستقبال في ملفات D-

.Coil,DD-Coil & DDQ-Coil

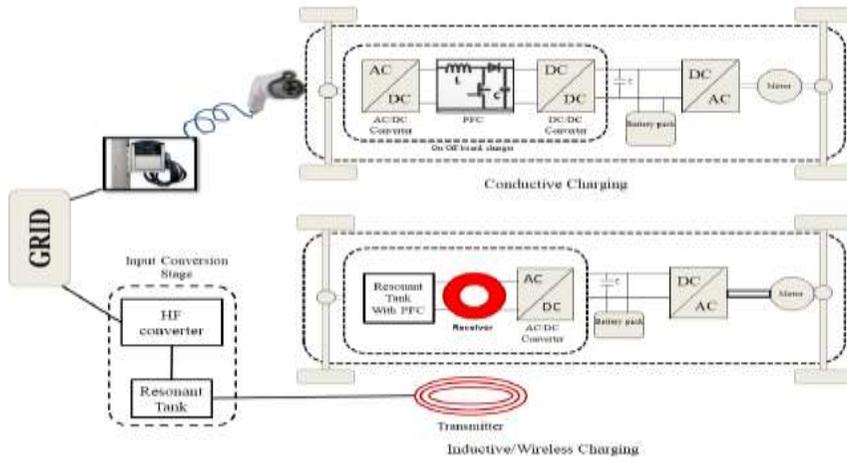
❖ تصميم ودراسة نموذج جديد من الملفات (مصفوفة الملفات) و تأثير إدخال

قلب الفريت إليها.

❖ تشغيل النظام ومراقبة النتائج.

### • الشحن السلكي و الشحن اللاسلكي :

الشحن اللاسلكي هو شحن البطارية بدون توصيل سلك حيث يتم نقل الطاقة بوسائل مختلفة. الشحن الاستقرائي هو نوع من الشحن اللاسلكي يتم إجراؤه من خلال قانون فاراداي. يوضح الشكل 1 مخططاً مقارناً لشاحن داخلي وشاحن لاسلكي. في الشحن الاستقرائي أو الشحن اللاسلكي ، لا يوجد اتصال مادي بين PS و EV. حالياً ، يُطلق على الشحن الاستقرائي الشحن اللاسلكي وينقل الطاقة على مسافة بوصات. يعمل الباحثون على زيادة هذه المسافة حتى أمتار من الفجوة الهوائية. باستخدام الأجهزة الإلكترونية الصغيرة ، يمكن بسهولة نقل الطاقة حتى أمتار ؛ ولكن مع زيادة مستوى الطاقة ، ثبت أن الشحن عن بعد يمثل تحدياً. [1]



الشكل 1: مقارنة بين مخططات الشحن التوصيلي والاستقرائي للمركبات الكهربائية

• تقنيات الشحن اللاسلكي :

تقوم SWC بشحن السيارة عندما تكون متوقفة. DWC ، المعروف أيضًا باسم الشحن الديناميكي في الطريق ، يشحن السيارة عندما تكون في حالة حركة. يُعرف QWC أيضًا بأنه مفيد بشكل أساسي لتلك المركبات التي تتوقف على فترات زمنية منتظمة مثل إشارات المرور أو محطات الحافلات أو مواقف سيارات الأجرة [8] [9].

تتمثل التقنيات في :

.SWC -1

.QWC -2

.DWC -3

• المبدأ الأساسي للشحن اللاسلكي :

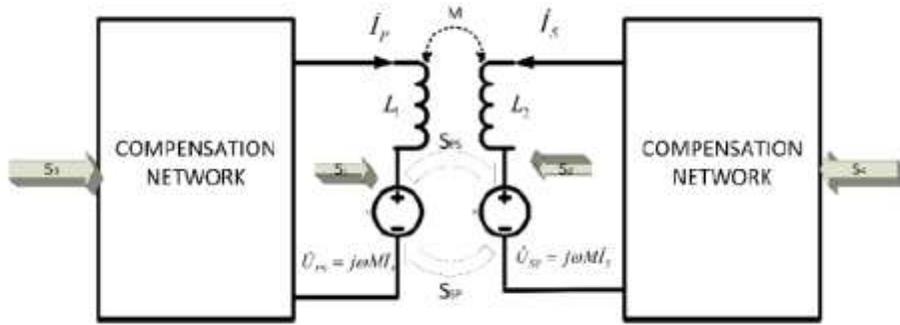
تشبه أساسيات WPT تطبيقات المحولات ، ويكون الاقتران بين الملفات الأولية والثانوية من خلال الهواء باعتباره القلب. سوف نقوم بتحليل بسيط للشحن اللاسلكي بشبكة تعويض منفصلة للملف في الشكل 2 ، مع إهمال مقاومة الملف والخسائر المغناطيسية. من  $L_S$  و  $L_P$  ، يمكننا الحصول على القوة المتبادلة على النحو التالي:

الطاقة الظاهرة المتبادلة من النظام الأساسي إلى الثانوي لنظام الملفين هي:

$$S_{PS} = - U_{PS} i_S^* = - j\omega M i_P i_S^* = \omega M I_P I_S \sin\varphi_{PS} - j\omega \cos\varphi_{PS} \quad (1)$$

الطاقة الظاهرة المتبادلة من المستوى الثانوي إلى النظام الأساسي لنظام الملفين هي:

$$S_{SP} = U_{SP} i_P^* = -j\omega M i_S i_P^* = -\omega M I_P I_S \sin\varphi_{PS} - j\omega M I_P I_S \cos\varphi_{PS} \quad (2)$$



الشكل 2: رسم تخطيطي مبسط لنظام نقل طاقة لاسلكي بملفين

يمكن التعبير عن نقل الطاقة النشط من جانب المرسل إلى جانب المستقبل على النحو التالي:

$$P_{PS} = \omega M I_P I_S \sin\varphi_{PS} \quad (3)$$

ومن ثم ، فإن إجمالي القدرة التفاعلية (Q) التي توجد في النظام بين الملفين هي:

$$Q = \omega ( L_P I_P^2 + L_S I_S^2 + 2M I_P I_S \cos\varphi_{PS} ) \quad (4)$$

لتكبير كفاءة المحول ، يجب تكبير نسبة الطاقة النشطة ( $P_{PS}$ ) والطاقة التفاعلية (Q):

$$\frac{|P_{PS}|}{Q} = \left| \frac{\omega M I_P I_S \sin\varphi_{PS}}{\omega L_P I_P^2 + \omega L_S I_S^2 + 2\omega M I_P I_S \cos\varphi_{PS}} \right| \quad (5)$$

يمكن تحقيق أقصى قيمة لـ  $f(\varphi_{PS})$  من خلال حل المعادلة التالية:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi_{PS}} f(\varphi_{PS}) = 0 \quad \frac{\partial^2}{\partial^2 \varphi_{PS}} f(\varphi_{PS}) < 0 \quad (6)$$

نظرًا لأنه محول تقليدي ، فإن k قريب من 1 ، إذا كان  $i_S$  هو التيار المستحث بواسطة  $i_P$  وعندما تكون قيمة x قريبة من 1 ، فإن القيمة  $\cos\varphi_{PS}$  تساوي 1 تقريبًا. يوجد فرق طور 180 درجة بين  $i_P$  و  $i_S$ . في حالة WPT فإن  $k \approx 0$  . تكون القيمة القصوى لـ  $f(\varphi_{PS})$  عند  $\sin\varphi_{PS} = 1$  ، وبالتالي يتم تكبير WPT. بدلاً من 180 درجة ، يوجد فرق طور بمقدار 90 درجة بين  $i_P$  و  $i_S$  . ومن ثم فإن الفرق بين الترابط المحكم والترابط الغير محكم يكون مرتين. يعتمد تصميم شبكة التعويض على درجة الاقتران. إذا أخذنا في الاعتبار اقتران السلاسل المتسلسلة ، فهناك طريقتان لتصميم مكثف الرنين. بالنسبة إلى WPT مع اقتران ضيق ،  $k > 0.5$  ، يجب زيادتها لتحقيق التردد العالي. في حالة الرنين مع الحث الذاتي للملف  $\varphi_{PS} = \pi/2$  و  $f(\varphi_{PS})$  منخفضة ، وهو أمر غير موصى به ، حيث يزداد الفقد المغناطيسي. إذا كان هناك تعويض رنيني مع عمل محول حث التسرب كالتقليدي وهناك زيادة في  $f(\varphi_{PS})$  ، لكن النظام العام لا يعمل في حالة الطنين. في الاقتران

السائب ، أي الشحن اللاسلكي للمركبة الكهربائية  $k < 0.5$  في حالة الطنين ، يتطلب المكثف الضبط باستخدام الحث الذاتي بحيث يمكن نقل الطاقة القصوى. هنا ، يتم تخزين الطاقة في الفجوة الهوائية بين المرسل والمستقبل ويتناسب فقدان النحاس مع مربع تيار التوصيل. للحصول على أقصى نقل للطاقة ، يجب أن يتأخر التيار المستحث في الملف الثانوي  $i_s$  عن التيار المستحث الأولي  $i_p$  بمقدار  $90^\circ$  درجة.  $U_{PS}$  و  $i_s$  يجب أن يكون في الطور منذ ذلك الحين  $U_{PS}$  و  $i_p$  يتأخر بمقدار  $90^\circ$  درجة على الملف المستقبلي. على الجانب الثانوي ، تظهر خاصية المقاومة النقية. في غضون ذلك ، يجب تقليل القوة الظاهرة  $S_3$  في الجانب الأولي. عندما  $\cos\varphi_{PS}=0$  تكون القوة المركبة ( $S_3$ ) هي:

$$S_3 = j\omega L_p I_p^2 + \omega M L_p I_s \quad (7)$$

$$\eta_{max} = \frac{K^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + K^2 Q_p Q_s})^2} \quad (8)$$

أقصى قدر من الكفاءة

$$\alpha_{\eta max} = \sqrt{1 + K^2 Q_p Q_s} \quad (9)$$

الذي تم تحقيقه في

النتائج مشابهة لما ورد أعلاه. بالنسبة للشحن اللاسلكي الثابت ، يكون معامل الاقتران بين الملفات حوالي 0.1 إلى 0.25 ، إذا كان لكل من الملفين عامل جودة حوالي 300 وكفاءة بحساب نظري يبلغ حوالي 96.7% [1] [2] [3].

#### • تأثير إدخال النواة على الشحن اللاسلكي للمركبة الكهربائية:

تم اختيار ثلاثة أنواع من الملف المستطيل ولوحة الفريت بنفس حجم الملف. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحليل تأثير القلب على كل نوع من أنواع الملفات ومقارنة

التحسن في خصائص نقل الطاقة بعد إدخال الفريت فوق أشكال الملفات. عندما يقترن ملفان وضبطهما على تردد طنين مع ممانعاتهما  $Z_R$  و  $Z_T$ . يمكن التعبير عن الحد الأقصى من الكفاءة عند الحد الأقصى لتوقعات الحمل لطوبولوجيا السلسلة المتسلسلة على النحو التالي :

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_R Q_T}}} \quad (10)$$

حيث أن  $Q_R$  و  $Q_T$  هي عوامل الجودة لبنية ملف جهاز الإرسال والاستقبال. يعتمد عامل الجودة على الحث الذاتي ومقاومة الملف كما هو معبر عنه:

$$Q_T = \frac{\omega L_T}{R_T} , Q_R = \frac{\omega L_R}{R_R} \quad (11)$$

حيث  $R_T$  و  $R_R$  مقاومات جهاز الإرسال والاستقبال. وفقاً للمعادلة 10 ، يمكن زيادة الكفاءة عن طريق زيادة معامل الاقتران وعوامل الجودة لكل ملف. يعتمد عامل الجودة على البعد المادي للملف. لا يمكن زيادة أبعاد الملف بشكل تعسفي لأن الزيادة في عدد لفات الملف ستزيد من الحث والمقاومة. نظراً لفقدان التبديل لأجهزة أشباه الموصلات ، فإن تردد نقل الطاقة سيكون محدوداً. التردد القياسي الذي حددته SAE 2954 يتراوح من 80.38 إلى 90 كيلو هرتز . العامل الثالث كما هو مذكور في المعادلة. 10 يعتمد على وصلة التدفق بين المرسل و ملف المستقبل. بالنظر إلى الأنظمة المحاذية بنسبة 100% ، يكون عامل الاقتران هو الحد الأقصى. ومع ذلك ، يمكن أن يؤدي الاختلاف الطفيف جداً في المحاذة إلى تقليل معامل الاقتران. سوف نناقش طريقة لتحسين الكفاءة عن طريق زيادة عامل الاقتران بين المرسل والمستقبل.

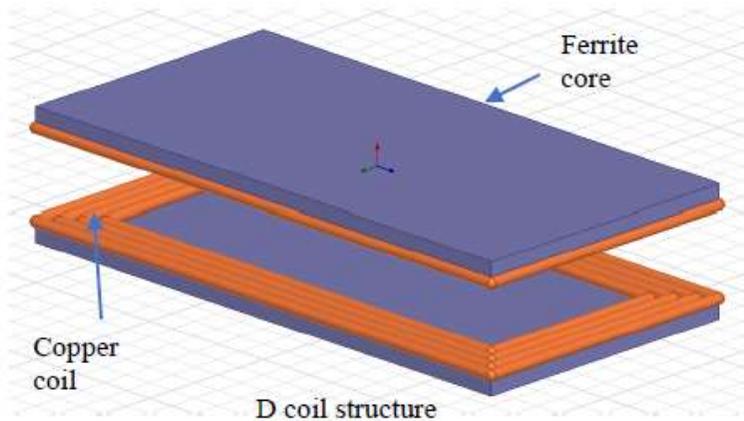
أبعاد الملف هي نفسها لجميع أنواع الملفات الثلاثة. لإجراء تحليل الدارة المغناطيسية والتحقق من المحاكاة لقلب الفريت فوق المرسل والمستقبل [4].

### 5-الدراسة النظرية:

#### • تحليل الدارة المغناطيسية لنظام ملفات D و DD و DDQ:

تم إجراء تحليل الدارة المغناطيسية لمنصات طاقة الشحن اللاسلكي لتحليل تأثير النواة على معامل الاقتران. مادة ملف الإرسال والاستقبال عبارة عن سلك نحاسي مجدول. ينبعث التدفق المغناطيسي المتولد من الملف في جميع الاتجاهات [7].

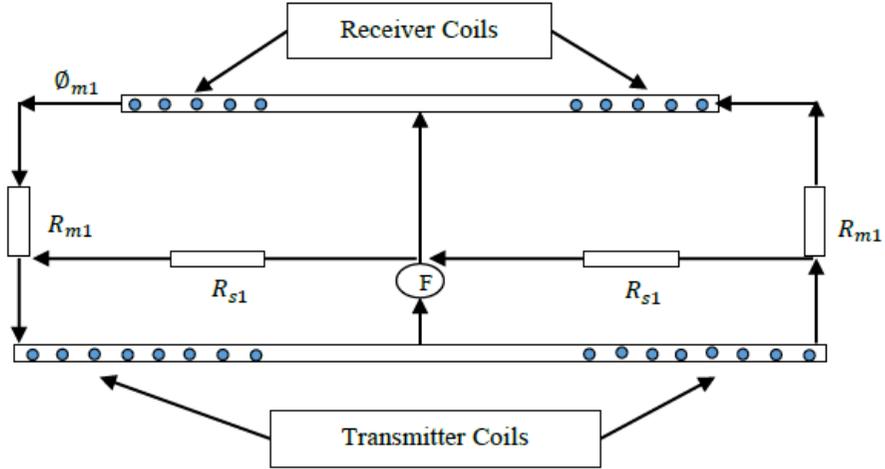
#### • الحساب النظري للحث لبنية ملف D:



### الشكل 3: الهيكل التخطيطي لملف D

ملف الهيكل D هو ملف مستطيل تقليدي ، له أبعاد مساوية لملف DD و DDQ. للتمييز عن المستطيل DD و DDQ ، تم تعديل اسم الملف المستطيل إلى ملف D. يحتوي ملف D على منطقة تدفق أفضل وتقليل تسرب التدفق في الزوايا مقارنة بملفات

DD و DDQ. ومع ذلك ، فإن ملف D مفيد جدًا في صنع ملف المسار للشحن اللاسلكي الديناميكي للسيارات الكهربائية وتحمل أفضل للمحاذاة في الاتجاه الجانبي.



الشكل 4: الدارة المغناطيسية لهيكل الملف المستطيل

علاوة على ذلك ، فإن ملفات D سهلة التصميم وخفيفة الوزن ومضغوطة وذات قيمة أفضل من حيث التكلفة وقدرة أكبر على نقل الطاقة في حالة الشحن اللاسلكي الديناميكي. يوضح الشكل 3 بنية تخطيطية للملف D مع قلب حول المرسل والمستقبل. حيث يتم تغطية السطح الخارجي والداخلي الكلي بالواح الفريت. حجم ملف جهاز الاستقبال أصغر قليلاً من ملف جهاز الإرسال. يتم إجراء التحليل لاختبار تأثير الفريت على هيكل ملف الشحن بغض النظر عن تكلفة ووزن ملفات الشحن. يوضح الشكل 4 دائرة مغناطيسية لهيكل الملف المستطيل [5] [4].

حيث:

**F:** هي القوة الدافعة المغناطيسية لملف المرسل.

$R_S$  : هو التردد الذاتي لكل ملف مثل  $R_{S1}$  و  $R_{S2}$  التردد الذاتي للمرسل والمستقبل على التوالي.

$\Phi_{S1}$  : هو التدفق الناتج عن الارتباط الذاتي للمجال المغناطيسي.

$\Phi_{m1}$  : هو التدفق الناتج عن الارتباط المتبادل للمجال المغناطيسي.

$R_{m1}$  : هو التردد المغناطيسي المتبادل.

$\Phi_{all}$  : هو إجمالي التدفق المغناطيسي المتبادل.

وفقًا للتعبير عن نموذج الدارة المغناطيسية ، يمكن الحصول على تعبير عن التدفقات المغناطيسية لكل نوع :

$$\Phi_{m1} = F/2R_{m1} \quad (12)$$

$$\Phi_{s1} = F/R_{s1} \quad (13)$$

علاوة على ذلك ، يمكن اشتقاق معامل الاقتران للنظام على :

$$K = \Phi_{m1}/\Phi_{all} = \Phi_{m1}/(\Phi_{m1} + \Phi_{s1}) = \frac{F/2R_{m1}}{\left(\frac{F}{2R_{m1}} + \frac{F}{R_{s1}}\right)} \quad (14)$$

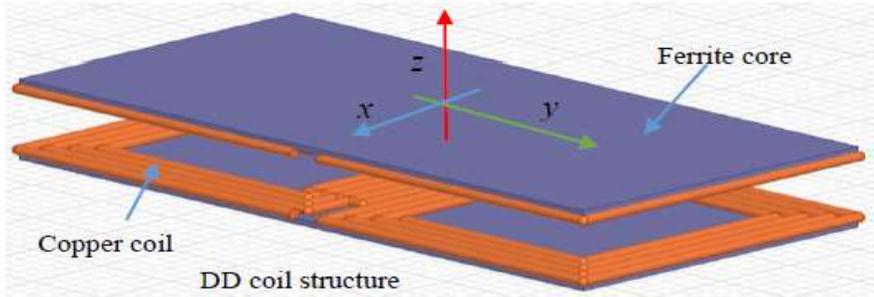
نظرًا للهيكل المتماثل ، فإن التدفقات المتبادلة هي نفسها من كلا الزاويتين. يمكن تبسيط معادلة معامل الاقتران:

$$K = R_{s1}/(R_{s1} + 2R_{m1}) \quad (15)$$

من الواضح أن معامل الاقتران يزداد بالتناقص. يمكن الاستنتاج أن معامل الاقتران يعتمد على الوضع المناسب للمادة الأساسية. يعتمد معامل اقتران بنية الملف D بشكل عكسي على الإحجام المتبادل مع عامل مضاعف 2. تم إجراء مزيد من التحقق من التحليل أعلاه من خلال تحليل العناصر المحدودة (FEA). تم اختيار أداة FEA

للتحليل المغناطيسي مثل Ansys Maxwell نظرًا لتحليلها الدقيق للكهرومغناطيسية الساكنة. لا يتطلب ماكسويل سوى البنية الهندسية لتحليل النظام [4].

• الحساب النظري للحث لهيكل ملف D مزدوج :

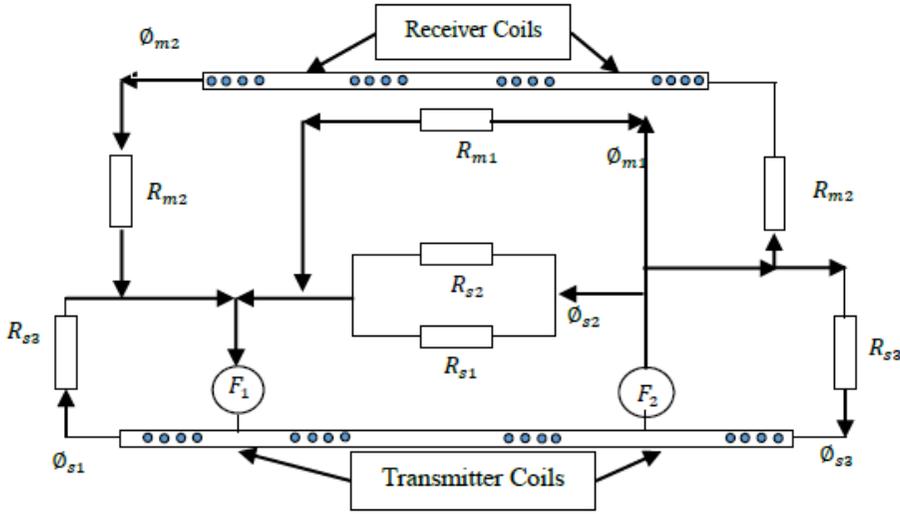


الشكل 5: الهيكل التخطيطي لملف DD

يحتوي هيكل ملف DD على معامل اقتران كبير مع تفاوت جانبي أفضل. كما هو مرسوم في الشكل 5 ، يتكون ملف DD من ملفين متساويين على شكل D مع جانب مشترك ، متصلين في سلسلة ولكن ملفوف في الاتجاه المعاكس. مثل هذا الترتيب لملف DD يجعله مستقطبًا لأن الملفين الفرعيين يولدان قطبين مغناطيسيين متعاكسين. يوضح الشكل 6 دائرة توزيع التدفق المغناطيسي مع ممانعة ، ومناطق اقتران التدفق والتوزيع التقريبي للمناطق المتبادلة والاقتران الذاتي.

يولد ملف جهاز الإرسال قوتين دافعتين مغناطيسيتين F1 و F2 من قطبين تم إنشاؤهما من ملف جهاز الإرسال. تم تصميم الدارة المغناطيسية بافتراض وجود  $R_{s1}$  ,  $R_{s2}$  ,  $R_{s3}$  ممانعة ذاتية لثلاث مناطق ناتجة عن قوتين كهربائيتين. التدفقات المغناطيسية لمنطقة الاقتران الذاتي هي  $\Phi_{s1}$  ,  $\Phi_{s2}$  ,  $\Phi_{s3}$  والتدفق الناتج عن الارتباط الذاتي للمجال المغناطيسي. بالمقابل ، فإن منطقة الاقتران المتبادل تساوي منطقتي اقتران.

$R_{m2}R_{m1}$  , هي التردد المتبادل للملفات.  $\Phi_{m2} \Phi_{m1}$  , التدفقات المغناطيسية.



الشكل 6: عرض بسيط لهيكل ملف DD

هي التدفق الناتج عن الارتباط الذاتي للمجال المغناطيسي.  $\Phi_{s3}$  ,  $\Phi_{s2}$  ,  $\Phi_{s1}$

هي التدفق الناتج عن الارتباط المتبادل للمجال المغناطيسي.  $\Phi_{m2} \Phi_{m1}$

وفقاً للتعبير عن نموذج الدائرة المغناطيسية ، يمكن الحصول على التعبير عن التدفقات المغناطيسية بسبب الحث المتبادل في صورة المعادلة (16) و (17).

$$\Phi_{m1} = (F1 + F2)/R_{m1} \quad (16)$$

$$\Phi_{m2} = (F1 + F2)/2R_{m2} \quad (17)$$

يمكن التعبير عن التدفق الناتج بسبب الحث الذاتي على أنه (18) و (19) و (20).

$$\Phi_{s1} = F1/R_{s3} \quad (18)$$

$$\Phi_{s2} = (F1 + F2)/(R_{s1} // R_{s2}) \quad (19)$$

$$\Phi_{s3} = F2/R_{s3} \quad (20)$$

يمكن اشتقاق معامل الاقتران للنظام العام ك :

$$K = \frac{(\Phi_{m1} + \Phi_{m2})}{\Phi_{all}} \quad (21)$$

$$K = \frac{\Phi_{m1} + \Phi_{m2}}{\Phi_{m1} + \Phi_{m2} + \Phi_{s1} + \Phi_{s2} + \Phi_{s3}} \quad (22)$$

$$K = \frac{\left(\frac{(F1+F2)}{R_{m1}}\right) + \left(\frac{(F1+F2)}{2R_{m2}}\right)}{\frac{F1}{R_{s3}} + \frac{F1+F2}{R_{s1} // R_{s2}} + \frac{F2}{R_{s3}} + \frac{F1+F2}{R_{s3}} + \frac{F1+F2}{2R_{m2}}} \quad (23)$$

نظرًا للهيكل التماثل والاتصال بين الاثنتين المقابل D يكون متسلسلاً F1=F2

يمكن تبسيط معادلة معامل الاقتران

$$K = \frac{1}{\frac{\alpha_{s3} + \alpha_{//}}{\alpha_{m1} + 1/2\alpha_{m2}} + 1} \quad (24)$$

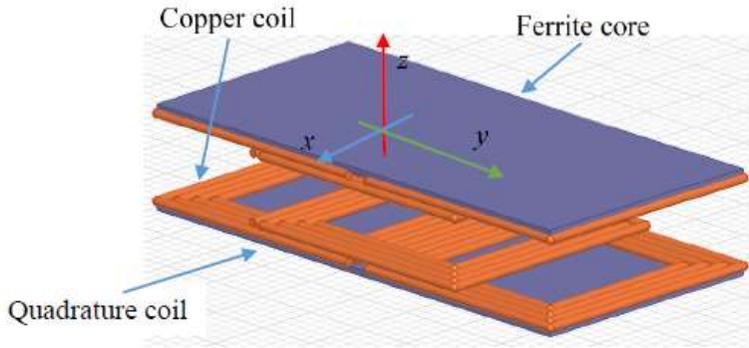
حيث :  $\alpha = 1/R$

$$\alpha_{//} = \frac{1}{R_{s1} // R_{s2}} \quad (25)$$

يزداد معامل الاقتران بتناقص  $(\alpha_{s3} + \alpha_{//})$  وزيادة  $(\alpha_{m1} + 0.5 \alpha_{m2})$  في نفس الوقت. . ومن ثم يمكن استنتاج أن معامل الاقتران يعتمد على الوضع المناسب للمادة الأساسية. بالمقارنة مع بنية ملف D ، يكون توزيع المجال المغناطيسي لهيكل ملف DD أكثر تعقيداً. . قد يؤدي الموضع الأمثل للقلب الفريت فوق هيكل الملف إلى تعزيز معامل الاقتران بنسبة تصل إلى 30%. لقد استخدمنا FEA من خلال Ansys Maxwell للتحقق من تأثير وضع الفريت فوق هيكل الملف [6] [4] .

- الحساب النظري الحثي لهيكل ملف D التربيع المزوج :
- DDQ هو إضافة ملف تربيعي في ملف DD . الملف التربيعي عبارة عن ملف دائري مسطح أو مستطيل قليلاً يتم فصله بشكل متبادل عن هيكل ملف

DD التقليدي ، ويتم وضعه بشكل متماثل بين ملفي DD. يولد ملف DD كلا من المكونات الأفقية والرأسية للتدفق. يتمتع DDQ بقدر أكبر من التسامح مع اختلال المحاذاة في كلا الاتجاهين الأفقي والأفقي . يظهر الرسم التخطيطي الهيكلي لـ DDQ في الشكل 7 [4].



الشكل 7: الهيكل التخطيطي لملف DDQ

لا يظهر التحليل المغناطيسي لـ DDQ هنا لأن الدائرة المغناطيسية تشبه إلى حد بعيد بنية ملف DD. نظرًا لأن السلوك السلبي للملف التربيعة لن يساهم في دائرة المجال المغناطيسي ، وبالتالي لن يقوم الملف التربيعة بتوليد أي EMF. ومع ذلك ، فإن الملف التربيعة سوف يساهم في محاذاة المجال المغناطيسي. تمت محاكاة هيكل ملف DDQ وتحليله من خلال تحليل FEA باستخدام Maxwell Simulation.



التحقق من الاتجاهات الحالية بأقل تداخل بين الملفات المقابلة من خلال تحليل العناصر المحدودة (FEA) باستخدام ANSYS Maxwell.

بعد إجراء تحليل نظري لمصفوفة الملفات 2\*2 تبين أن الحث المتبادل لنظام نقل الطاقة اللاسلكي يعتمد على توزيع التدفق المغناطيسي. وبالتالي ، فإن التوزيع المنتظم للتدفق المغناطيسي يمكن أن يعزز معامل الاقتران. يتم إجراء التحقق من التحليل أعلاه من خلال FEA ، باستخدام Ansys Maxwell [5].

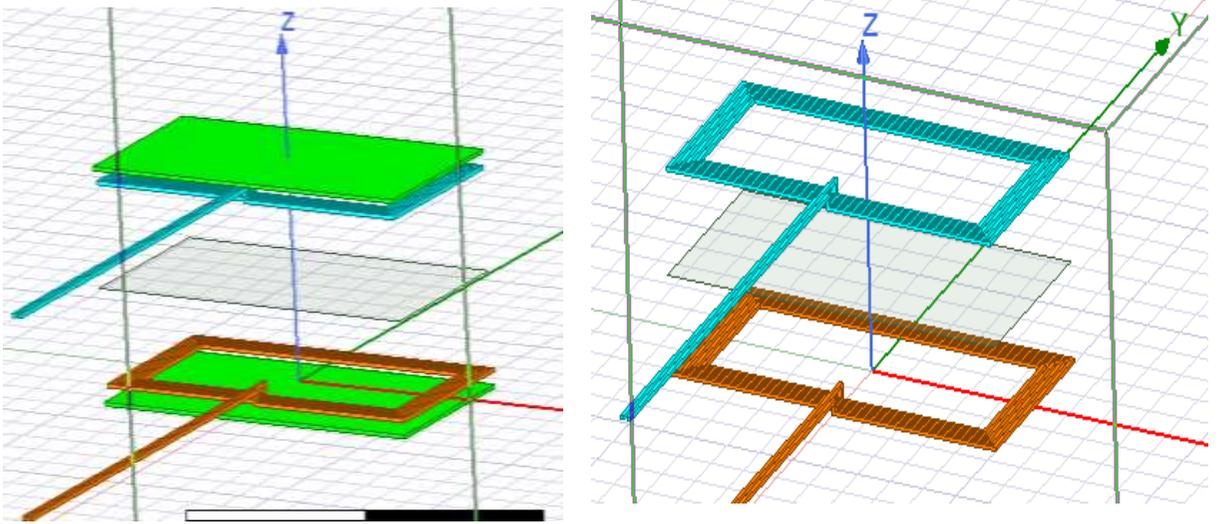
#### 6-المحاكاة:

الجدول أدناه يوضح البارامترات المستخدمة في المحاكاة من أجل D-Coil , DD-Coil & DDQ-Coil :

Parameters	Values
Air gap Distance	100 mm
Transmitter coil current	10 A
Receiver coil current	10 A
Coil material	Copper
Core material	ferrite
Number of coils turns	4
Conductor thickness	2 mm

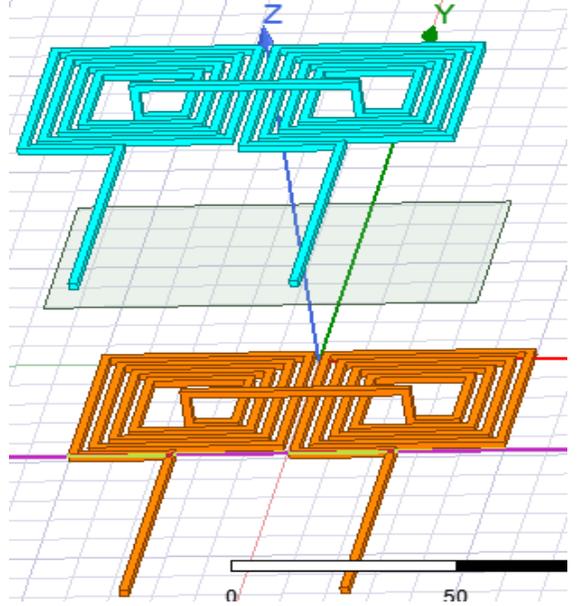
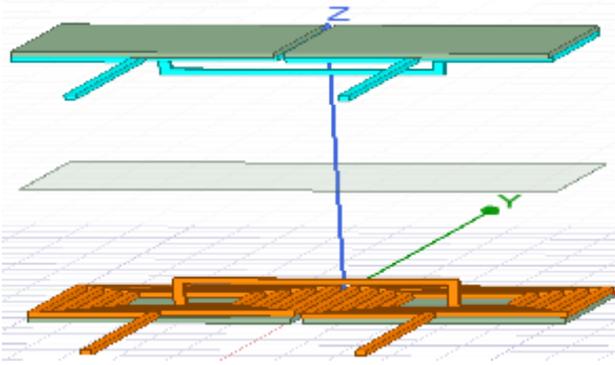
▪ ملف D-Coil:

تم تحليل تأثير النواة المغناطيسية على ملف D باستخدام تحليل الدارة المغناطيسية حيث يحتوي ملف D على إثارة ملف واحد فقط ، وبالتالي يقل تعقيد نمط التدفق. بدون قلب الفريت ، تم إصدار خطوط التدفق في جميع الاتجاهات. بعد إدخال قلب الفريت عبر ملف الإرسال والاستقبال ، تمت محاذاة خطوط التدفق والحصول على الاتجاه. تم تقييد تدفق التسرب بواسطة قلب الفريت وتركيزه في المركز .



الشكل 9: محاكاة D-Coil على ANSYS بدون ومع إدخال الفريت

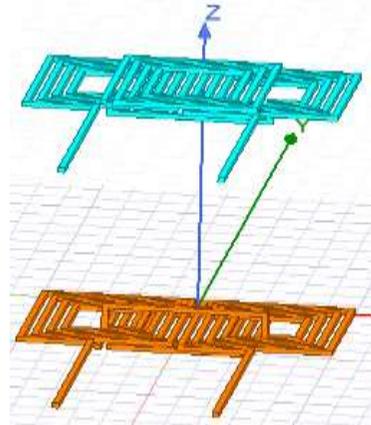
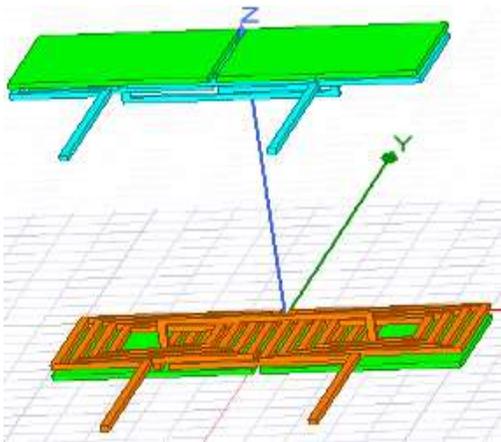
▪ ملف DD-Coil :



الشكل 10: محاكاة DD-Coil على ANSYS بدون ومع إدخال الفريت

▪ ملف DDQ-Coil :

التدفق المغناطيسي الناتج عن بنية ملف DDQ. يتركز الحقل في الوسط ، ولا يوجد تدفق يخرج من القلب.



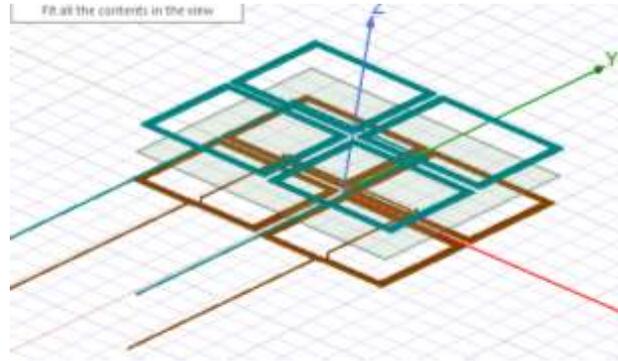
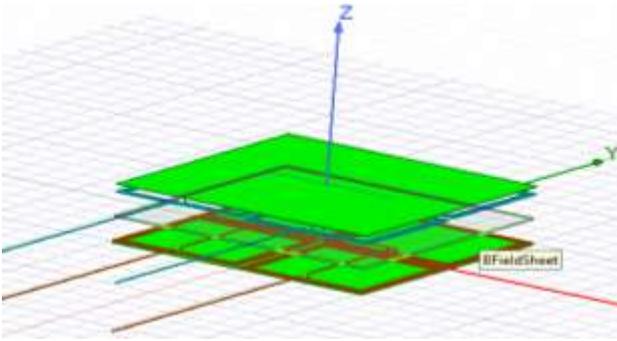
الشكل 11: محاكاة DDQ-Coil على ANSYS بدون ومع إدخال الفريت

## ■ مصفوفة الملفات :

تم إجراء التحليل و التحقق من تحليل FEA للحصول على القيمة الأكثر دقة للتحريض المتبادل. تم تطوير النموذج في بيئة ANSYS Maxwell لتحقيق الأداء الأمثل بأقل قدر من القوة الحسابية. كان التحليل الذي تم إجراؤه في Maxwell عبارة عن تحليل مغناطيسي ثابت لقياس الحث الذاتي والمتبادل للملفات. بمجرد التحقق من صحة قيم الحث الذاتي والحث المتبادل لكل ملف ، يمكن إجراء المحاكاة التالية للتحليل العابر باستخدام ANSYS Maxwell للعثور على تحليل تيار النقل.

الجدول أدناه يوضح البارامترات المستعملة في المحاكاة :

Coil Specification	Size (mm)
Coil Dimension	500*500
Coil wire diameter	2
Number of coil Turns	4
Outer region	air
Primary Current	10A

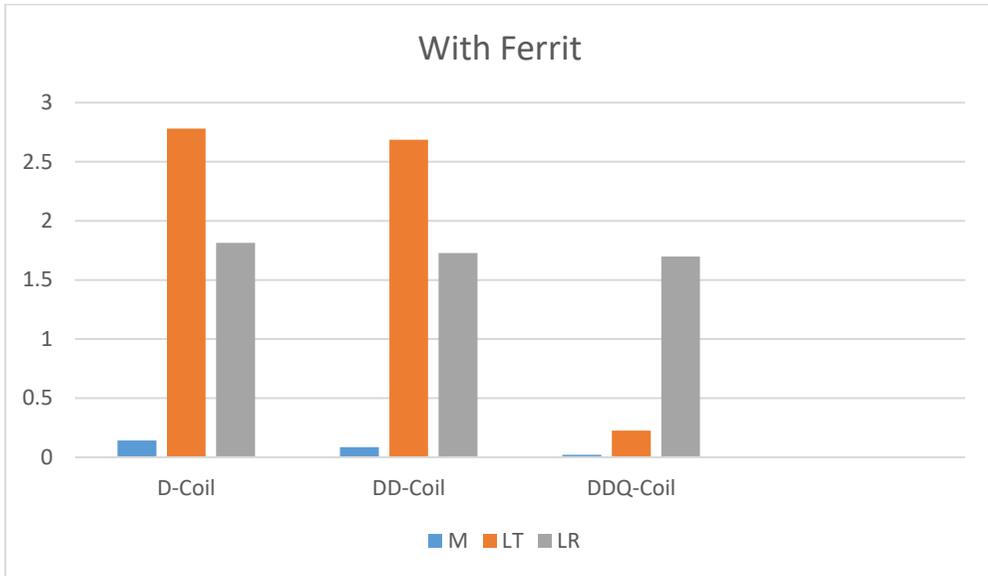


الشكل 12: محاكاة مصفوفة الملفات على ANSYS بدون ومع إدخال الفريت

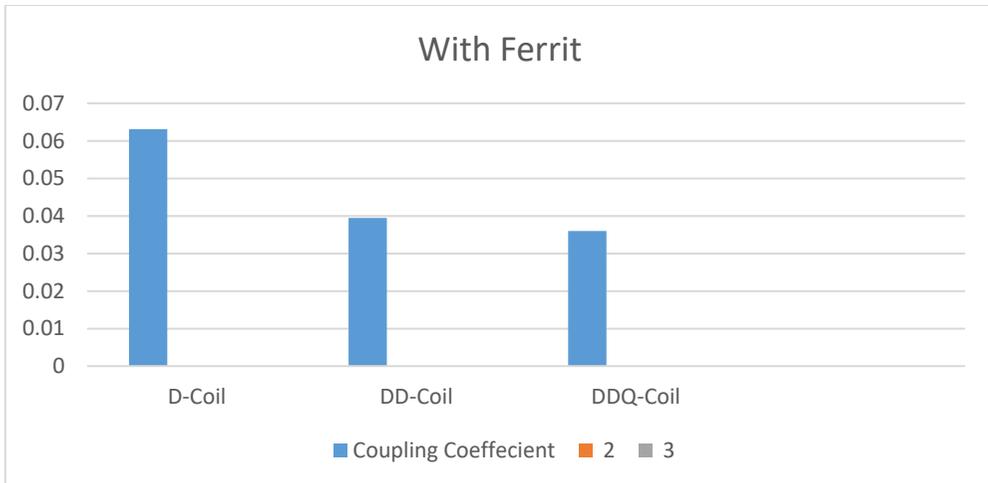
7-النتائج و المناقشة:

• D-Coil , DD-Coil & DDQ-Coil :

يوضح الشكل 13 المقارنة الرسومية بين الحث الذاتي المتبادل D و DD و DDQ. يوضح الشكل 14 معامل الاقتران لجميع أنواع بنية الملف الثلاثة. يُظهر D منطقة الشحن الأكبر من مجموعات ملفات DD و DDQ. بالنسبة لنظام نقل الطاقة العالية ، تعد وسادة الطاقة ذات النواة الفريتية أكثر ملاءمة بالمقارنة مع لوحة الطاقة عديمة النواة.



الشكل 13 : الحث المتبادل والحث الذاتي للمرسل والمستقبل



### الشكل 14 : معامل الاقتران (الكفاءة)

يقدم الجدول أدناه النتائج المقارنة لجميع أنواع الملفات الثلاثة بين نتائج الدراسات السابقة باللون الأحمر ونتائج الدراسة الحالية باللون الأخضر:

Parameters	Without Ferrit			With Ferrit		
	D-Coil	DD-Coil	DDQ-Coil	D-Coil	DD-Coil	DDQ-Coil
Mutual Inductance ( $\mu\text{H}$ )	0.101905606	0.055872368	0.017394682	0.1418407	0.08506337	0.022283453
Transmitter self-inductance ( $\mu\text{H}$ )	1.788725	1.708018	0.207800140	2.779542	2.686475	0.225774457
Receiver Self Inductance ( $\mu\text{H}$ )	1.794550	1.707804	1.694734	1.814928	1.726286	1.696960
Coupling coefficient ( $\mu$ )	0.056879	0.032714	0.029312	0.063153	0.039500	0.036001
Transmitted Magnetic Flux (Wb)	0.000019	0.000018	0.000002	0.000029	0.000008	0.000002
Receiver magnetic flux (Wb)	0.000018	0.000018	0.000017	0.000020	0.000008	0.000017

#### • مصفوفة الملفات :

تم إجراء تحليل العناصر المحدودة للتحقق والعثور على الحث المتبادل لهيكل QPP. تتمثل الميزة الرئيسية لهيكل QPP في اقتران التوافق مع هياكل الملفات الأخرى ، وتحمل المحاذاة المحسّن ، ومعامل الاقتران العالي مع هياكل الملفات الأخرى. يوضح الجدول أدناه نتائج FEA التي تم إجراؤها على Ansys Maxwell وتمثل الصفوف المميزة هياكل الملف الأقل انحرافاً ، مع أقصى معامل اقتران.

الجدول أدناه يعبر عن مقارنة بين النتائج التحليلية النظرية باللون الأحمر ونتائج FEM بعد المحاكاة على ANSYS باللون الأخضر لهيكل مصفوفة الملفات :

	Analytical Model	FEM	Error (%)
Self-Inductance (Primary) ( $\mu\text{H}$ )	77.7520643	87.361870	11
Self-Inductance (Secondary) ( $\mu\text{H}$ )	54.11294518	60.801062	11
Mutual Inductance ( $\mu\text{H}$ )	16.7959908	27.993318	4
Coupling coefficient	0.1152282	0.384094	7

#### 8-الخلاصة والتوصيات:

تم من خلال هذا البحث تحليل الشحن اللاسلكي للسيارات الكهربائية تحليلًا نظريًا وإيجاد المعادلات اللازمة لذلك وتم أيضًا تحليل طريقة إدخال قلب الفريت إلى ملفات الإرسال والاستقبال وتطبيق ذلك على الأنماط الثلاثة للملفات والتي أدت إلى تعظيم معامل الاقتران وبالتالي زيادة كفاءة نقل الطاقة وتم تحليل شكل جديد للملفات (مصفوفة الملفات) والتي بدورها أبدت نتائج مذهلة وخاصة بعد إضافة مادة الفريت . تم محاكاة التحليلات السابقة باستخدام برنامج ANSYS وتصميم النظام وتشغيله و إظهار نتائج مطابقة للتحليلات النظرية.

من الأهداف المستقبلية لهذا البحث أنه لا يمكن للسائقين أن يتوقعوا إيقاف السيارة بدقة فوق لوحة الشحن اللاسلكية من أجل تحقيق المحاذاة المثالية للملفات حيث يمثل تنفيذ نظام لمحاذاة ملفات الإرسال والاستقبال تحديًا . لذلك ، يجب تصميم نظام تكيفي وتطويره للحفاظ على الكفاءة المثلى لنقل الطاقة لنظام الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية في ظل سيناريوهات الاستخدام المختلفة.

لا يمكن تجاهل عواقب الأشياء المحيطة على أداء الشحن اللاسلكي مثل الأجسام المعدنية المركبة في المركبات الكهربائية. ومن ثم ، يجب تركيز بعض اعتبارات التصميم على التحايل على حطام الأجسام الغريبة و الكائنات الحية بين منصات شحن الإرسال والاستقبال للمركبات الكهربائية. وبالتالي تصميم نظام لتجنب وجود مثل هذه الأشياء أو الأجسام يمثل تحديا يجب التغلب عليه وتطويره.

## 9-المراجع:

- [1] Y. Zhang, Z. Zhao, and K. Chen, "Frequency decrease analysis of resonant wireless power transfer," IEEE Trans. Power Electron 2018.
- [2] A. Kamineni, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Analysis of Coplanar Intermediate Coil Structures in Inductive Power Transfer Systems," IEEE Trans. Power Electron 2017.
- [3] T.-D. D. Nguyen, S. Li, W. Li, and C. C. Mi, "Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers," in 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2017.

- [4] A. Ahmad, M. S. Alam, and R. Chabaan, "A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles," IEEE Trans. Transp. Electrification. 2017.
- [5] A. Tejada, C. Carretero, J. T. Boys, and G. A. Covic, "Ferrite-Less Circular Pad with Controlled Flux Cancellation for EV Wireless Charging," IEEE Trans. Power Electron 2017.
- [6] M. S. Alam et al., "A Bibliographical Review of Electrical Vehicles (xEVs) Standards," SAE Int. J. Altern. Powertrains 2018.
- [7] A. Ahmad, Z. A. Khan, M. Saad Alam, and S. Khateeb, "A Review of the Electric Vehicle Charging Techniques, Standards, Progression, and Evolution of EV Technologies in Germany," Smart Sci 2018.
- [8] T. Kan, F. Lu, T. D. Nguyen, P. P. Mercier, and C. C. Mi, "Integrated Coil Design for EV Wireless Charging Systems Using LCC Compensation Topology," IEEE Trans. Power Electron 2018.
- [9] H. K. Dashora, G. Buja, M. Bertoluzzo, R. Pinto, and V. Lopresto, "Analysis and design of DD coupler for dynamic wireless charging of electric vehicles," J. Electromagn. Waves 2018.