Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, July-December 2026 Online ISSN: 3006-0877

المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2027

RESEARCH ARTICLE **ENERGY PHYSICS**

Analysis and Comparison of Resonant Compensation Topologies in Wireless Power Transfer Systems with Rectangular Planar Coils

Allallah Abdalgdir Alamir[1,*]

[1]Department of physics, Faculty of science, Sebha University, Sebha, Libya

ARTICLE HISTORY

Received 17 June 2026
Revised 08 August 2026
Accepted 19 August 2026
Online 24 August 2026

KEYWORDS

Magnetic resonance coupling;.
Electric Vehicles;
Series–Series Topology;
Series–Parallel Topology.

ABSTRACT

Wireless power transfer (WPT) based on resonant magnetic coupling is a promising technology for electric vehicle (EV) charging. This paper presents an analytical and comparative study of four fundamental compensation topologies—Series–Series (SS), Series–Parallel (SP), Parallel–Series (PS), and Parallel–Parallel (PP)—using rectangular planar transmitter and receiver coils. The rectangular geometry was selected for its suitability for ground-mounted EV charging pads and efficient use of installation space. Unlike previous studies that mainly focused on circular coils or limited topologies, this work provides a unified comparison of the four topologies under identical operating conditions. MATLAB simulations were conducted to evaluate the effects of air-gap distance on magnetic coupling, transferred power, and system efficiency. The coupling coefficient decreased from 0.4259 at 100 mm to 0.3337 at 200 mm, while mutual inductance decreased from 5.568 µH to 4.365 µH. At 100 mm, the SP topology achieved the highest load power of 14.64 W, whereas the PS topology achieved the lowest value of 4.26 W. The PP topology exhibited the highest efficiency of approximately 63%, while the SS topology remained below 40%. These results indicate that SP and PP are promising compensation topologies for medium-coupling WPT systems, particularly for EV wireless charging applications.

تحليل ومقارنة طوبولوجيات التعويض الرنيني في أنظمة نقل الطاقة اللاسلكية ذات الملفات المستطيلة المسطحة

اللالة عبدالقادر الامير[1،*]

الكلمات المفتاحية

الربط بالرنين المغناطيسي
المركبات الكهربية
طوبولوجيا توالي - توالي
طوبولوجيا توالي - توازي

الملخص

يُعد نقل الطاقة لاسلكيًا (WPT) القائم على الاقتران المغناطيسي الرنيني تقنية واعدة لشحن المركبات الكهربائية .(EVs) تقدم هذه الورقة دراسة تحليلية ومقارنة لأربع طوبولوجيات أساسية للتعويض، وهي: التوالي–التوالي(SS) ، والتوالي–التوازي(SP) ، والتوازي–التوالي(PS) ، والتوازي–التوازي(PP) ، باستخدام ملفات مستوية مستطيلة للمرسل والمستقبل. وقد تم اختيار الهندسة المستطيلة لملاءمتها لشواحن المركبات الكهربائية المثبتة على الأرض وكفاءتها في استغلال مساحة التركيب. وعلى خلاف الدراسات السابقة التي ركزت بصورة رئيسية على الملفات الدائرية أو عدد محدود من طوبولوجيات التعويض، تقدم هذه الدراسة مقارنة موحدة للطوبولوجيات الأربع تحت ظروف تشغيل متماثلة. أُجريت محاكاة باستخدام MATLAB لتقييم تأثير مسافة الفجوة الهوائية في الاقتران المغناطيسي والقدرة المنقولة وكفاءة النظام. انخفض معامل الاقتران من 0.4259 عند مسافة 100 mm إلى 0.3337 عند 200mm ، بينما انخفضت المحاثة المتبادلة من 5.568 µH إلى 4.365 .µH عند 100mm ، حققت طوبولوجيا SP أعلى قدرة حمل بلغت W14.64 ، في حين سجلت طوبولوجيا PS أدنى قدرة بلغت 4.26 .W كما حققت طوبولوجيا PP أعلى كفاءة بلغت نحو 63%، بينما انخفضت كفاءة طوبولوجيا SS إلى أقل من 40%. وتشير هذه النتائج إلى أن طوبولوجيتي SP و PPتمثلان خيارين واعدين لأنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا ذات الاقتران المتوسط، ولا سيما في تطبيقات الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية.

المقدمة

أصبحت تقنيات نقل الطاقة لاسلكيًا (Wireless Power Transfer – WPT) من المجالات البحثية الحيوية في هندسة القدرة والإلكترونيات [1] ، نظرًا لدورها المتنامي في تمكين أنظمة الشحن اللاسلكي، وتحسين الاعتمادية التشغيلية، وتقليل مخاطر التآكل والشرر الكهربائي. وقد حظيت تقنيات النقل الحثي المعتمدة على الاقتران المغناطيسي باهتمام واسع بعد إثبات إمكانية نقل القدرة بكفاءة عبر الرنين المغناطيسي، والذي شكّل نقطة تحول أساسية في هذا المجال، كما قُدمت لاحقًا مراجعات شاملة تناولت تطور تقنيات نقل الطاقة لاسلكيًا للمركبات الكهربائية من حيث الطوبولوجيات، ومستويات القدرة، ومعايير الكفاءة والسلامة، كما ورد في [1] .

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_33
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

يعتمد الأداء الكلي لأنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا الحثية بشكل رئيسي على بنية دائرة التعويض الرنيني (Compensation Topology) المستخدمة في جانبي الإرسال والاستقبال. إذ تؤثر هذه البنية بشكل مباشر على خصائص نقل القدرة، وكفاءة النظام، واستجابة الجهد والتيار، بالإضافة إلى مدى حساسية النظام لتغيرات الحمل وتذبذب معامل الاقتران المغناطيسي الناتج عن سوء المحاذاة أو تغير المسافة بين الملفين [2]. ونتيجة لذلك، يُعد اختيار طوبولوجيا التعويض المناسبة أحد التحديات التصميمية الجوهرية في أنظمة WPT الحديثة.

تُعد الطوبولوجيات الأربع الأساسية، وهي توالي–توالي(Series–Series, SS) ، توالي–توازي(Series–Parallel, SP) ، توازي–توالي(Parallel–Series, PS) ، وتوازي–توازي(Parallel–Parallel, PP) ، من أكثر التراكيب استخدامًا في أنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا المعتمدة على الرنين. وقد أظهرت الدراسات السابقة أن لكل طوبولوجيا خصائص تشغيلية مميزة؛ حيث تتميز طوبولوجيا SS باستقلالية القدرة المنقولة عن الحمل عند التشغيل عند تردد الرنين، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات ذات متطلبات القدرة العالية [3]. في المقابل، توفر طوبولوجيا SP مرونة أكبر في تنظيم الجهد على جانب الاستقبال، لكنها تكون أكثر حساسية لتغيرات الحمل [4].

أما طوبولوجيا PS وPP، فتُستخدم غالبًا في التطبيقات التي تتطلب تيارات دخل منخفضة أو توافقًا أفضل مع مصادر القدرة ذات الممانعة العالية. وعلى الرغم من هذه المزايا، فإنهما تتطلبان تحليلاً أكثر تعقيدًا وتحكمًا أدق في ظروف التشغيل، خاصة عند تغير معامل الاقتران المغناطيسي أو الحمل [4].

إلى جانب طوبولوجيا التعويض، يلعب الشكل الهندسي للملفات دورًا بالغ الأهمية في تحديد معامل الاقتران المغناطيسي وتوزيع المجال، مثل الإلكترونيات الاستهلاكية المسطحة، والأنظمة المدمجة، ومنصات شحن المركبات الكهربائية[5]. وبالتالي كفاءة نقل الطاقة. ففي حين ركزت معظم الدراسات السابقة على الملفات الدائرية نظرًا لسهولة نمذجتها وتحليلها، ازداد الاهتمام في السنوات الأخيرة باستخدام الملفات المستطيلة، خاصة في التطبيقات التي تفرض قيودًا ميكانيكية أو مساحية مثل الإلكترونيات الاستهلاكية المسطحة، والأنظمة المدمجة، ومنصات شحن المركبات الكهربائية.

توفر الملفات المستطيلة مرونة أعلى في التكامل البنيوي، إلا أنها تعاني من عدم تماثل توزيع الفيض المغناطيسي وتأثيرات الحواف والزوايا، مما يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في معامل الاقتران مقارنةً بالملفات الدائرية التقليدية. ويؤثر هذا السلوك بشكل مباشر على الأداء الكلي لأنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا، خاصة عند تغير المسافة أو المحاذاة بين ملفي الإرسال والاستقبال، اظهر الدراسات الحديثة في تصميم البنى الكهرومغناطيسية المستطيلة أن تحسين الشكل الهندسي للعناصر الناقلة يؤثر بصورة مباشرة في توزيع المجال الكهرومغناطيسي وكفاءة نقل الطاقة أو الإشارة. وانطلاقًا من هذا المفهوم، تعتمد هذه الدراسة على ملفات مستطيلة مسطحة لتحليل تأثير طوبولوجيات التعويض الرنيني في أداء أنظمة الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية.[6-8].

إن الجمع بين طوبولوجيات التعويض الرنيني المختلفة واستخدام الملفات المستطيلة يفرض تحديات تحليلية إضافية، حيث تتداخل تأثيرات البنية الكهربائية مع الخصائص الكهرومغناطيسية للملفات. وعلى الرغم من وجود العديد من الدراسات التي تناولت تحليل الطوبولوجيات الأربع في أنظمة WPT، فإن معظمها يركز على ملفات دائرية أو يفترض اقترانًا مثاليًا، في حين لا تزال الدراسات المقارنة الشاملة التي تعتمد على الملفات المستطيلة محدودة نسبيًا.

انطلاقًا من ذلك، تهدف هذه الورقة إلى إجراء مقارنة كمية بين طوبولوجيات التعويض الرنيني الأربع الأساسية(SS، SP، PS، PP) من حيث القدرة المنقولة والكفاءة الكلية للنظام. كما تهدف إلى دراسة تأثير المسافة الهوائية بين ملفي الإرسال والاستقبال على معامل الاقتران المغناطيسي والمحاثة التبادلية وأداء النظام، إضافةً إلى تقييم أثر استخدام الملفات المستطيلة المسطحة على خصائص نقل الطاقة اللاسلكية، وتحديد الطوبولوجيا الأكثر ملاءمة لتحقيق تشغيل مستقر عند ظروف الاقتران المغناطيسي المتوسط.

تناولت العديد من الدراسات السابقة تحليل أداء طوبولوجيات التعويض الرنيني المختلفة في أنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا، مع اختلاف واضح في نوع التقنية المستخدمة، وشكل الملفات، ومستويات القدرة، والمسافات الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال.

في مجال أنظمة نقل القدرة السعويه المنخفضة القدرة، قام Li وآخرون [9] بدراسة تأثير تكوينات الربط المختلفة على أداء النظام، حيث أظهرت نتائجهم أن اختيار طوبولوجيا التعويض المناسبة يمكن أن يُحسّن الجهد المنقول ويُقلل الخسائر عند المسافات القصيرة نسبيًا. وقد حققت الدراسة قدرة منقولة تقارب 5Wبكفاءة وصلت إلى نحو% 80 عند مسافة فاصلة قدرها 10 mmومع ذلك، اقتصر التحليل على قدرات منخفضة ومسافات قصيرة، دون التطرق إلى تطبيقات القدرة المتوسطة أو العالية.

وفي سياق تطبيقات شحن المركبات الكهربائية، ركّز Scher وآخرون [10] على تحليل وتصميم طوبولوجيا التوالي–توالي (SS) باستخدام ملفات دائرية مسطحة ذات أبعاد كبيرة. أُجريت الدراسة باستخدام برنامجANSYS ، وحققت كفاءة عالية وصلت إلى نحو 99% (محاكاة) عند مسافات فاصلة تصل إلى 105mm، مع قدرة منقولة في حدود 3.6W وتُعد هذه الدراسة من أحدث الأعمال التي تناولت طوبولوجيا SS لمسافات واقعية نسبيًا في تطبيقات المركبات الكهربائية، إلا أنها اقتصرت على طوبولوجيا واحدة وعلى ملفات دائرية فقط.

من جهة أخرى، قدّم Pinuela وآخرون [11] مراجعة تحليلية ومقارنة للطوبولوجيات الأربع الأساسية لأنظمة نقل القدرة السعويه، موضحين الفروقات النظرية في الأداء بين هذه الطوبولوجيات عند مستويات قدرة منخفضة. تراوحت القدرات المدروسة بينW 1 و10، مع كفاءات وصلت إلى نحو % 85 تبعًا للطوبولوجيا المستخدمة، وعند مسافات فاصلة قصيرة تراوحت بين mm 5 و15 ورغم شمولية التحليل النظري، لم تتناول هذه الدراسة تأثير شكل الملفات أو المسافات الأكبر ذات الصلة بتطبيقات شحن المركبات الكهربائية.

وبالتركيز على تأثير سوء المحاذاة، درس Wu وآخرون [12] أداء طوبولوجيتي التوازي–توالي (PS) والتوازي–توازي (PP) باستخدام ملفات مستطيلة بأبعادmm 400 × 300 .أظهرت النتائج أن القدرة المنقولة تراوحت بينW 2 و3 عند مسافات فاصلة بين mm 80 و120، مع تحقيق كفاءة وصلت إلى نحو 92% لطوبولوجيا PS وأقل من % 90 لطوبولوجيا PP كما بيّنت

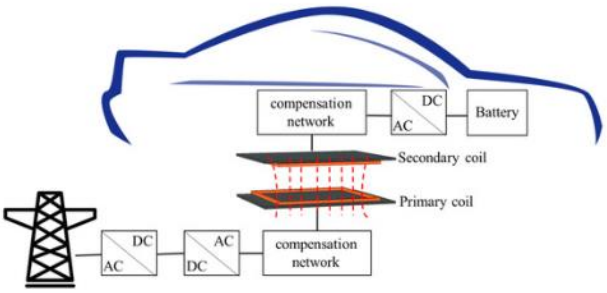
الدراسة أن هاتين الطوبولوجيتين أكثر حساسية لتغير المحاذاة مقارنة بطوبولوجياSS ، خاصة عند المسافات المتوسطة، مما يؤثر على استقرار الأداء.

وفي محاولة لتحسين أداء أنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا، اقترح Deng وآخرون [13] استخدام خوارزميات تحسين لضبط عناصر التعويض في الطوبولوجيات المختلفة باستخدام ملفات دائرية. أظهرت النتائج تحسنًا في الكفاءة، حيث بلغت نحو77.14% لطوبولوجيا SS عند مسافة 15 cm، و74.8% لطوبولوجيا SP عند 20 cm، و75.55% لطوبولوجيا PS عند 25 cm، و79.45% لطوبولوجيا PP عند 18 cm. ومع ذلك، لم تتناول الدراسة تطبيقات شحن المركبات الكهربائية أو استخدام الملفات المستطيلة ذات الأبعاد الكبيرة.

بناءً على ما سبق، يتضح أن معظم الدراسات السابقة ركزت على جانب محدد من أنظمة نقل الطاقة اللاسلكية، مثل تحليل طوبولوجيا تعويض واحدة، أو مقارنة جزئية بين بعض الطوبولوجيات، أو استخدام الملفات الدائرية المسطحة، أو دراسة الأنظمة عند مستويات قدرة منخفضة أو مسافات فصل قصيرة. كما أن عدداً من هذه الدراسات اعتمد على فرضيات اقتران مثالية أو ركّز على تحسين جانب معين من الأداء. في المقابل ستجابةً لهذه الفجوة، تقدم هذه الدراسة مقارنة تحليلية موحدة للطوبولوجيات الأربع (SS، SP، PS، PP) باستخدام ملفات مستطيلة مسطحة ضمن بيئة محاكاة واحدة وبظروف تشغيل متماثلة. كما تحلل بصورة كمية تأثير تغير المسافة الفاصلة على معامل الاقتران المغناطيسي، والمحاثة المتبادلة، والقدرة المنقولة، وكفاءة النظام، بهدف تحديد الطوبولوجيا الأكثر ملاءمة لتطبيقات الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية عند الاقتران المغناطيسي المتوسط.

المواد وطرق البحث

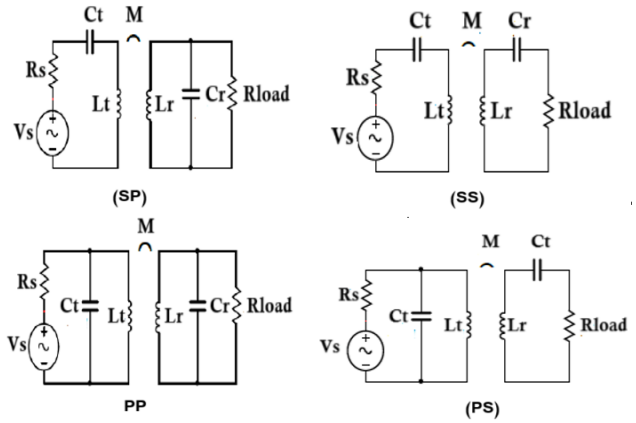
تم تصميم ملفات مستطيلة مسطحة باستخدام برنامج MATLAB بالاعتماد على الدراسات السابقة، وذلك لاستخدامها في نمذجة منظومة نقل الطاقة لاسلكياً لشحن المركبات الكهربائية. وشكل 1 يوضح منظومة متكاملة لشحن مركبات كهربية التي تتم بها عملية شحن في محطات موجودة على طريق، حيث يكون ملف الارسال مستطيل مسطح في الأرض تحت محطة وملف الاستقبال مستطيل مسطح أسفل السيارة تقف السيارة فوق لوح شحن وتتم عملية شحن.



الشكل 1: مخطط متكامل لمنظومة شحن لاسلكي في المركبات الكهربية باستخدام ملفات مستطيلة مسطحة [14]

طوبولوجيات الأساسية الأربعة التي استخدمت في هذه الدراسة هي: Parallel–Single (PS)، Single–Parallel (SP)، Single–Single (SS)، و(PP) Parallel–Parallel، وذلك بهدف دراسة تأثير القدرة المنقولة، وكفاءة النظام، مسافة الفاصلة بين ملفات على كل طوبولوجيا، ودراسة الملفات المستطيلة وتحديد الطوبولوجيا الأكثر ملاءمة لتحقيق تشغيل مستقر عند ظروف الاقتران المتوسط.

يوضح الشكل (2) طوبولوجيا SS، حيث يتكون النظام من ملف إرسال واحد وملف استقبال واحد موصلين على التوالي مع باقي مكونات دارتي الارسال والاستقبال، وتمثل هذه الحالة المرجعية الأساسية التي تُستخدم للمقارنة مع باقي الطوبولوجيات، حيث يكون الاقتران المغناطيسي مباشرًا وبسيطًا نسبيًا, وطوبولوجيا SP، تحتوي على ملف إرسال واحد موصل على التوالي مقابل ملف استقبال متصل على التوازي, أما طوبولوجيا PS التي تتكون من ملف إرسال متصلة على التوازي مع ملف استقبال واحد لكل من دارة الارسال والاستقبال في منظومة نقل الطاقة لاسلكي, في حين طوبولوجيا PP، فتُعد الأكثر تعقيدًا، حيث تتكون من ملف إرسال وملف استقبال متصلة على التوازي.



الشكل 2: يوضح مخطط طوبولوجيات الأساسية الاربعة [14]

تم إجراء نمذجة منظومة نقل الطاقة لاسلكيًا بافتراض محاذاة مثالية بين ملفي الإرسال والاستقبال باستخدام برنامج ماتلاب، مع إهمال تأثيرات عدم المحاذاة الجانبية والتيارات الدوامية، وذلك لتقليل تعقيد النموذج والتركيز على التحليل المقارن لأداء الطوبولوجيات المختلفة. وتقتصر هذه الدراسة على التحليل النظري والمحاكاة العددية لأداء طوبولوجيات التعويض الرنيني، ويُعد هذا النهج التحليلي والمحاكاة العددية مقبولًا على نطاق واسع في دراسات نقل الطاقة لاسلكيًا، خاصة في المراحل المقارنة الأولية بين الطوبولوجيات المختلفة [15,2] . دون تنفيذ تجريبي فعلي، وعليه تم نمذجة كل طوبولوجيا باستخدام معادلات الممانعة المكافئة والحث المتبادل. كما افترض ضبط جميع الملفات على نفس تردد الرنين. كما أُجريت المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB لاستخراج مؤشرات الأداء الرئيسة، ومن ثم تمت مقارنة النتائج لتحديد الطوبولوجيا الأكثر ملاءمة لتطبيقات الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية.

ضمن هذا الإطار، تم استخدام معادلة ويلر التقريبية لحساب الحث الذاتي للملفات المستطيلة المسطحة، لما تتميز به من ملاءمة للتحليل النظري وإجراء المقارنات بين الطوبولوجيات المختلفة [17,16]:

$$L = \frac{0.008N^2(a+b)^2}{(3a+3b+9w)} \qquad (1)$$

L الحث الذاتي بالميكرو هنري (μH)، a طول ملف الارسال والاستقبال، b عرض ملف الارسال والاستقبال، N عدد لفات ملفي الارسال او الاستقبال، wعرض منطقة اللفات من اول لفة الي اخر لفة. والحث المتبادل بين الملفين يعطي بالعلاقة نيومان كالتالي [18]:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C1} N_t \int_{C2} N_r \frac{dR_r dR_t}{X} \quad (2)$$

حيث N_t عدد لفات ملف الارسال و N_r عدد لفات ملف الاستقبال و dR_t معدل تفاضل طول لملف الارسال و dR_r معدل تفاضل طول لملف الاستقبال وX المسافة الفاصلة بين ملفين ونتيجتاً لمحاثة التبادلية نأشاه بين دارة الارسال والاستقبال ومعامل الاقتران K [19] :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}} \quad (3)$$

حيث M محاثة التبادلية و L_t الحث الذاتي لملف الارسال و L_r الحث الذاتي لملف الاستقبال.

عند الربط بالرنين المغناطيسي فأن معاوقة ملف الارسال تساوي معاوقة مكثف الارسال ونفس الامر مع دارة الاستقبال [20]:

$$XC_t = XL_t \quad (4)$$

$$XC_r = XL_r \quad (5)$$

حيث XC_t معاوقة مكثف دارة الارسال و XC_r معاوقة مكثف دارة الاستقبال و XL_t معاوقة ملف الارسال و XL_r معاوقة ملف الاستقبال.

وعليه فأن ممانعة دارة الارسال Z_S وممانعة الاستقبال Z_l لطوبولوجيا ss في حالة الربط بالرنين المغناطيسي تكون [20]:

$$Z_S = R_S + R_t \quad (6)$$

$$Z_l = R_r + R_{load} \quad (7)$$

حيث R_S مقاومة المصدر و R_t مقاومة دارة الارسال و R_r مقاومة دارة الاستقبال و R_{load} مقاومة الحمل.

أما ممانعة دارة الارسال Z_S في طوبولوجيا sp [13]:

$$Z_S = R_S + R_t \quad (8)$$

وممانعة المنعكسة Z_lمن دارة الاستقبال [13] :

$$Z_l = \omega^2 M^2 \left(\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_{load}}\right) \quad (9)$$

وممانعة دارة الارسال Z_S في طوبولوجيا ps:

$$Z_S = \omega^2 M^2 \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_t}\right) \quad (10)$$

وممانعة المنعكسة Z_lمن دارة الاستقبال [13]:

$$Z_l = R_r + R_{load} \quad (11)$$

وممانعة دارة الارسال في طوبولوجيا pp [13]:

$$Z_S = \omega^2 M^2 \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_t}\right) \quad (12)$$

وممانعة المنعكسة Z_lمن دارة الاستقبال [13]:

$$Z_l = \omega^2 M^2 \left(\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_{load}}\right) \quad (13)$$

حساب كفاءة الدائرة η فحالة الرنين [20]:

$$\eta = \frac{\omega^2 M^2 R_{load}}{(R_t R_r + \omega^2 M^2)(R_r + R_{load})} \quad (14)$$

$$P_t = i_1^2 R_t \quad (15)$$

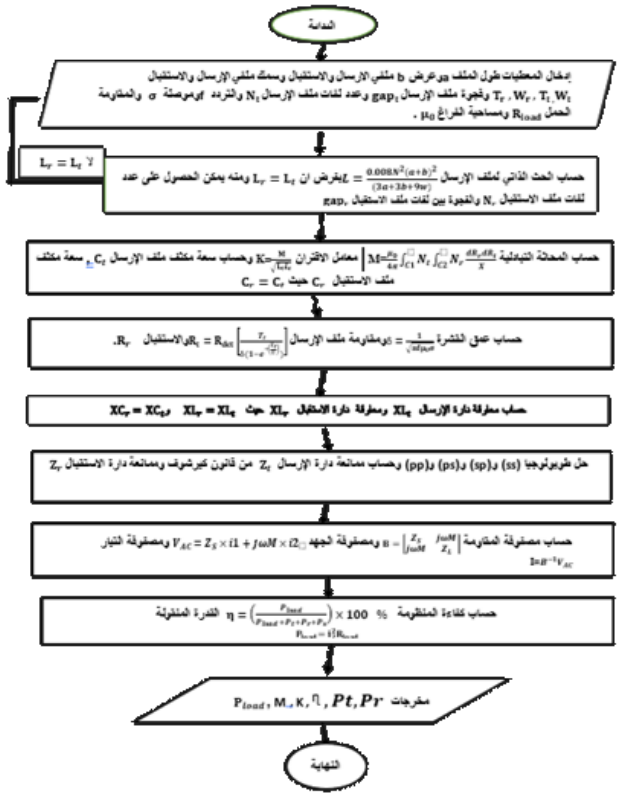
$$P_s = i_1^2 R_s \quad (16)$$

$$P_{load} = i_2^2 R_{load} \quad (17)$$

$$P_r = i_2^2 R_r \quad (18)$$

حيث P_t قدرة الارسال، P_r قدرة الاستقبال، P_s قدرة المصدر، P_{load} قدرة الحمل، i_1 تيار دارة الاستقبال، i_2 تيار دارة الاستقبال.

يوضح شكل (3) المخطط الانسيابي خطوات بناء النموذج الرياضي والمحاكاة لنظام نقل الطاقة لاسلكيًا، بدءًا من تحديد أبعاد الملفات المستطيلة ومعلمات النظام، ثم حساب المحاثة الذاتية والمحاثة المتبادلة وعناصر التعويض الرنيني وممانعة الدائرة لكل طوبولوجيا. كما يبين آلية حساب الجهد والتيار والقدرة المنقولة وكفاءة النظام، وصولًا إلى استخراج مؤشرات الأداء الرئيسة، وهي معامل الاقتران المغناطيسي، والمحاثة المتبادلة، والقدرة المرسلة والمستقبلة، وقدرة الحمل، والكفاءة، بهدف إجراء مقارنة موحدة بين الطوبولوجيات الأربع.



الشكل 3: مخطط انسيابي لبرنامج محاكاة برنامج الماتلاب لمنظومة شحن اللاسلكي لمركبات الكهربية.

تمثل هذه المنهجية إطارًا تحليليًا متكاملًا يسمح بتقييم الأداء النسبي للطوبولوجيات المختلفة تحت شروط اقتران متحكم بها، مما يمهد لعرض النتائج ومناقشتها في القسم التالي.

النتائج والمناقشة

تم اعتماد أبعاد ملفي الإرسال والاستقبال من الدراسة السابقة [12] . وذلك بهدف دراسة تأثير استخدام الملفات المستطيلة المسطحة على الكفاءة والقدرة المنقولة، كما تم تحليل تأثير المسافة الفاصلة بين الملفات على أداء الطوبولوجيات الأربع.

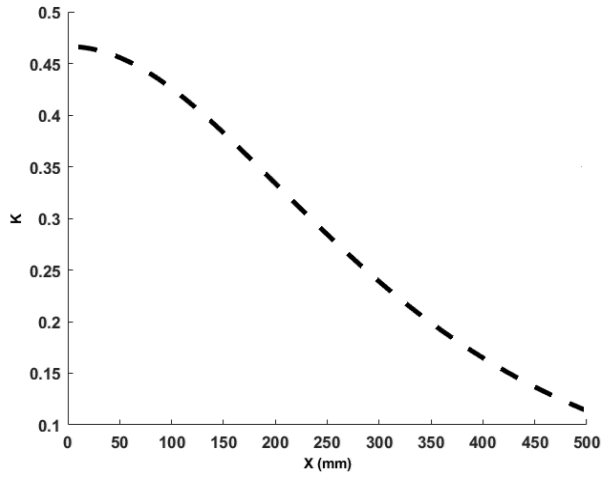
المستخدمة في منظومة نقل الطاقة لاسلكي لشحن المركبات الكهربية وكان مدي أبعاد ملفات المستخدم في الورقة mm (300-400) وبعض بارامترات الملفات أخذت من المرجع [12] ، وعدد الفات حدد من قبل برنامج محاكاة لتحقيق الربط بالرنين المغناطيسي والتردد المستخدم هو المعتمد في شحن المركبات الكهربية من قبل شركات شحن سيارات الكهربية لاسلكي مثل

(plug less power-Hyundai –Mercedes - BMW-Wi-Tricity - Tesla) وأيضا مقاومة الحمل من الدراسات السابقة [12,10] . اختيرت مسافة 100 mmلأنها تقع ضمن المجال العملي المستخدم في تطبيقات شحن المركبات الكهربائية، حيث يكون معامل الاقتران المغناطيسي مرتفعًا نسبيًا دون الوصول إلى اقتران قوي جدًا، مما يجعلها مناسبة لإجراء مقارنة عادلة بين طوبولوجيات التعويض المختلفة وإبراز تأثير كل منها على القدرة المنقولة وكفاءة النظام. تقتصر هذه الدراسة على التحليل والمحاكاة باستخدام MATLAB دون التحقق التجريبي. كما تفترض الدراسة ظروف اقتران مثالية ولا يتم أخذ تأثير سوء المحاذاة الديناميكي أو خصائص المواد المغناطيسية في الاعتبار. تأثير سوء المحاذاة الديناميكي أو خصائص المواد المغناطيسية في النواة. وتم إختيار طول وعرض ملفات الارسال والاستقبال وصمم عبر برنامج محاكاة البارامترات الأخرى لملف الارسال والاستقبال لتحقق الربط بالرنين المغناطيسي، وجدول (1) يوضح بارامترات ملف الارسال وملف الاستقبال.

الجدول1: بارامترات ملفي الارسال (1) والاستقبال (1) المصممة.

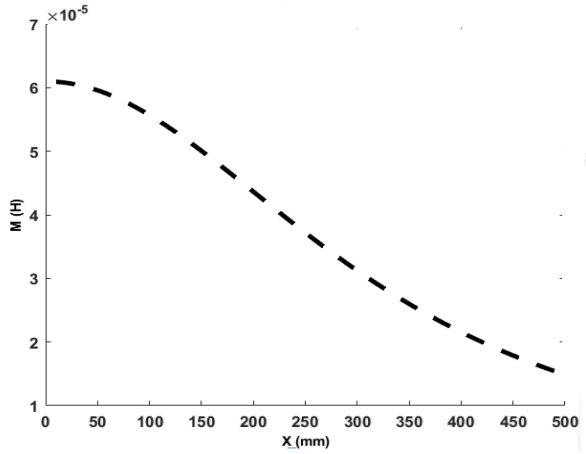
الكمية	رمز	ملف الارسال (mm)	ملف الاستقبال (mm)
طول ملف	a	400	400
عرض ملف	b	300	300
عدد لفات	N	9	8
الفجوة بين الاسلاك	gap	1	0
عرض ملف	W	36	12
سمك سلك الملف	T	25	25

يوضح الشكل (4) العلاقة بين معامل الاقتران المغناطيسي K والمسافة الهوائية بين الملفين. وتُظهر النتائج انخفاضًا غير خطي في قيمة K مع زيادة المسافة. فعند 100 mm بلغ K = 0.4259 ، بينما انخفض إلى 0.3337 عند 200 mm، ويُفسر هذا السلوك بأنه انحدار شبه لوغاريتمي نتيجة تلاشي شدة المجال المغناطيسي مع المسافة، ويُعزى ذلك إلى انخفاض الفيض المغناطيسي المشترك والمحاثة المتبادلة بين الملفين مع زيادة المسافة. ويؤدي هذا الانخفاض إلى تقليل القدرة المنقولة وكفاءة نظام نقل الطاقة اللاسلكية.



الشكل 4: منحنى العلاقة بين معامل الاقتران والمسافة الفاصلة بين لملفي الإرسال والاستقبال.

يبين الشكل (5) **تغير المحاثة التبادلية** M (بوحدة هنري) **مع المسافة الفاصلة بين ملفات** X mm. يتضح من الرسم أن قيمة M**تنخفض تدريجيًا وبشكل غير خطي** مع زيادة المسافة الفاصلة بين الملفين، وهو سلوك مباشر مرتبط بانخفاض معامل الاقتران المغناطيسي. ويؤدي هذا الانخفاض إلى تقليل القدرة المنقولة بين دائرتي الإرسال والاستقبال. سجلت المحاثة التبادلية H 5.568×10^{-5} عند مسافة 100 mm واستمر الانخفاض ليصل الي H 4.365×10^{-5} عند مسافة 200mm. ويُعزى ذلك فيزيائيًا إلى انخفاض الفيض المغناطيسي المشترك المرتبط بالملف المستقبل نتيجة تباعد الملفين، مما يقلل من مقدار الاقتران المغناطيسي بينهما. ويؤدي هذا الانخفاض في المحاثة المتبادلة إلى تقليل القدرة المنقولة وكفاءة نظام نقل الطاقة اللاسلكية، نظرًا لاعتماد انتقال الطاقة بشكل مباشر على قيمة M .



الشكل5: منحني العلاقة بين المحاثة التبادلية والمسافة الفاصلة بين ملفي الارسال والاستقبال

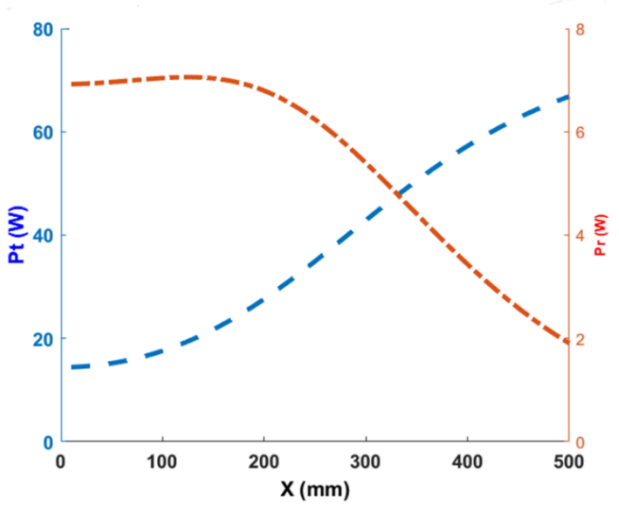
يمثل الجدول (2) أهم القيم الربط بالرنين المغناطيسي لملف الارسال (1) والاستقبال (1) التي تم تصميمهما من خلال برنامج ماتلاب.

الجدول 2: قيم الربط بالرنين المغناطيسي لملف الارسال (1) والاستقبال (1).

الوصف	الرمز	القيمة
الحث الذاتي لملف الارسال	L_t	$130.7474\mu H$
الحث الذاتي لملف الاستقبال	L_r	$130.7474\mu H$
مقاومة ملف الارسال	R_t	0.02169Ω
مقاومة ملف الاستقبال	R_r	0.063Ω
سعة مكثف الارسال	C_t	$8.336147284\times10^{-8}F$
سعة مكثف الاستقبال	C_r	$8.336147284\times10^{-8}F$
مقاومة الحمل	R_{load}	$80\,\Omega$
التردد المستخدم	F	$85\times10^{3}\,Hz$

يوضح الشكل (6) تغير قدرة الإرسال Ptوقدرة الاستقبال Prمع المسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال لطوبولوجياSS. عند مسافة 100 mm بلغت قدرة الإرسال 49.1239W، في حين بلغت قدرة الاستقبال 1.8416W. ومع زيادة المسافة ارتفعت قدرة الإرسال لتصل إلى 73.0783Wعند 246mm، بينما بلغت أعلى قدرة استقبال 2.5545W. كما يبين المنحنى اتساع الفجوة بين قدرتي الإرسال والاستقبال مع زيادة المسافة. ويُعزى هذا السلوك إلى انخفاض معامل الاقتران المغناطيسي والمحاثة المتبادلة مع زيادة المسافة، مما يؤدي إلى انخفاض الممانعة المنعكسة التي يراها المصدر وإضعاف مطابقة المعاوقة بين جانبي الإرسال والاستقبال. ونتيجة لذلك، تنخفض القدرة

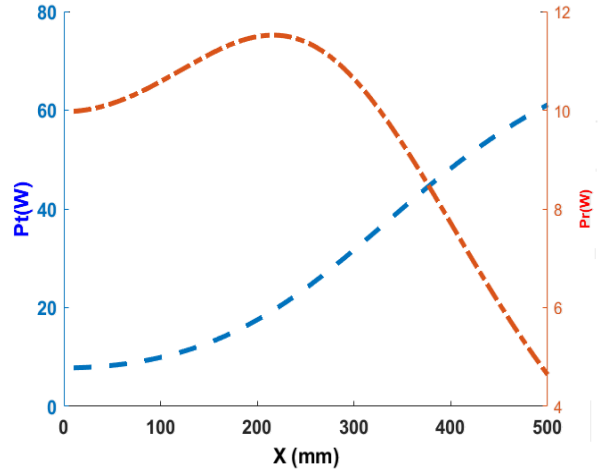
الفعالة المنقولة إلى الحمل، بينما تزداد القدرة التفاعلية المتداولة داخل الدائرة الرنينية وترتفع الخسائر الأومية في الملفات، مع انخفاض معامل الجودة المحمل(Loaded Quality Factor) ، فتتراجع كفاءة نقل الطاقة ويزداد الفرق بين قدرة الإرسال وقدرة الاستقبال عند المسافات الكبيرة.



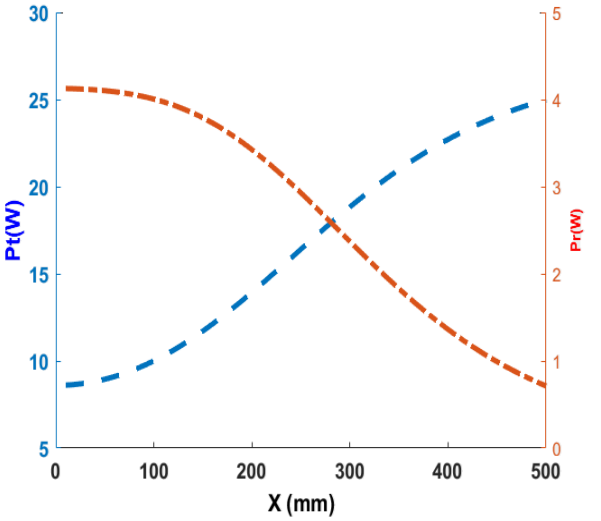
الشكل 6: العلاقة بين قدرة الارسال Pt(W) وقدرة الاستقبال Pr(W) والمسافة الفاصلة بين ملفي الارسال والاستقبال X(mm) لطوبولوجيا SS.

يفسر الشكل 7 تغير قدرة الإرسال Ptوقدرة الاستقبال Prمع المسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال لطوبولوجيا SP. عند مسافة 100 mmبلغت قدرة الإرسال 18.4603 W، بينما سجلت أعلى قيمة لها 61.7 W، في حين بلغت أعلى قدرة استقبال 11.517 Wضمن مجال المسافات **150–250** mm. كما يبين المنحنى أن طوبولوجيا SP تحقق أفضل أداء ضمن هذه المنطقة، بينما يبدأ أداء نقل القدرة بالتراجع عند زيادة المسافة خارجها. ويُفسَّر ظهور منطقة التشغيل المثلى بأن طوبولوجيا SP تحقق عند هذه المسافات مطابقة معاوقة أفضل بين جانبي الإرسال والاستقبال، نتيجة القيمة المناسبة للممانعة المنعكسة، مما يسمح بانتقال نسبة أكبر من القدرة الفعالة إلى الحمل. ومع زيادة المسافة ينخفض معامل الاقتران المغناطيسي والمحاثة المتبادلة، فتتراجع الممانعة المنعكسة وينخفض معامل الجودة المحمل، مما يؤدي إلى زيادة الخسائر الأومية والقدرة التفاعلية داخل الدائرة الرنينية، وبالتالي انخفاض القدرة المستقبلة وتراجع كفاءة نقل الطاقة.

يبين الشكل 8 تغير قدرة الإرسال Ptوقدرة الاستقبال Prمع المسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال لطوبولوجيا PS. عند مسافة 100 mmبلغت قدرة الإرسال 20.5962 W، بينما وصلت إلى قيمة عظمى بلغت 26.3937 W، في حين سجلت قدرة الاستقبال أعلى قيمة بلغت 21.18 Wثم أخذت بالانخفاض مع زيادة المسافة. كما يوضح المنحنى أن أداء طوبولوجيا PS يبدأ بالتراجع منذ المسافات القريبة، دون وجود منطقة تشغيل مثلى واضحة مقارنةً بالطوبولوجيات الأخرى. ويُعزى هذا السلوك إلى انخفاض معامل الاقتران المغناطيسي والمحاثة المتبادلة مع زيادة المسافة، مما يقلل الفيض المغناطيسي المرتبط بالملف المستقبل ومعامل الجودة ويخفض القدرة المنقولة إلى الحمل. كما يؤدي تغير الممانعة المكافئة في طوبولوجيا PS إلى زيادة القدرة التفاعلية المسحوبة من المصدر، فتزداد قدرة الإرسال بينما تتناقص قدرة الاستقبال تدريجيًا.



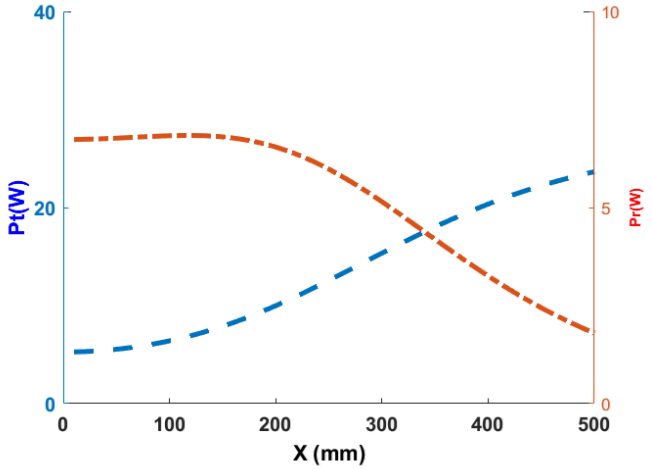
الشكل7: العلاقة بين قدرة الارسال Pt(W) وقدرة الاستقبال Pr(W) والمسافة الفاصلة بين ملفي الارسال والاستقبال X(mm) لطوبولوجيا SP.



الشكل8: العلاقة بين قدرة الارسال Pt(W) وقدرة الاستقبال Pr(W) والمسافة الفاصلة بين ملفي الارسال والاستقبال X(mm) لطوبولوجيا PS.

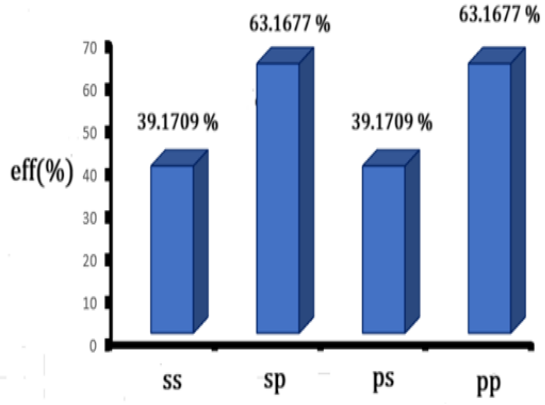
يبين الشكل (9) تغير قدرة الإرسال Ptوقدرة الاستقبال Prمع المسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال لطوبولوجياPP. عند مسافة 100 mm بلغت قدرة الإرسال 10.3780 W، ثم ارتفعت لتصل إلى أقصى قيمة 23.6514 W، بينما سجلت قدرة الاستقبال أعلى قيمة بلغت 6.8343 W قبل أن تبدأ بالانخفاض مع زيادة المسافة. كما يوضح المنحنى أن طوبولوجيا PPتحقق منطقة تشغيل مستقرة نسبيًا حتى مدى **mm** 200–150، ثم يبدأ أداء نقل القدرة بالتراجع تدريجيًا عند المسافات الأكبر. ويُعزى هذا السلوك إلى انخفاض معامل الاقتران المغناطيسي والمحاثة المتبادلة مع زيادة المسافة، مما يؤدي إلى انخفاض الممانعة المنعكسة وإضعاف مطابقة المعاوقة بين جانبي الإرسال والاستقبال، فتتراجع القدرة الفعالة المنقولة إلى الحمل. كما أن وجود مكثف التعويض على جانب الإرسال بالتوازي يجعل الدائرة أكثر حساسية لتغير الممانعة المكافئة، فتزداد القدرة التفاعلية المتداولة والخسائر الأومية، مع انخفاض معامل الجودة (Loaded Quality Factor)، لذلك لا

تظهر منطقة تشغيل مثلى واضحة كما في طوبولوجياSP ، ويتدهور الأداء تدريجيًا مع زيادة المسافة.



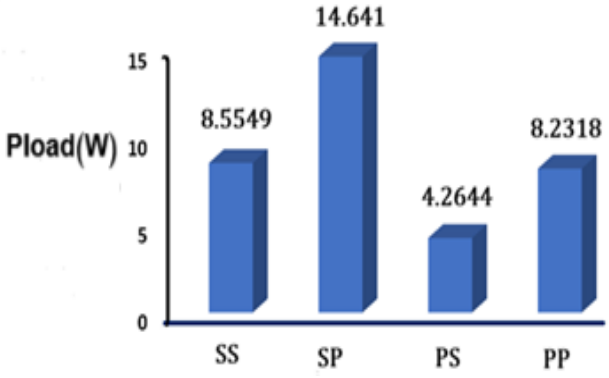
الشكل 9: العلاقة بين قدرة الارسال Pt(W) وقدرة الاستقبال Pr(W) والمسافة الفاصلة بين ملفي الارسال والاستقبال X(mm) لطوبولوجيا PP.

يظهر الشكل (10) مقارنة الكفاءة الكلية للطوبولوجيات الأربع(SS ، SP، PS، PP)عند مسافة فاصلة مقدارها 100 mm. أظهرت النتائج أن طوبولوجيتي SS وSP سجلتا أقل كفاءة بلغت نحو 39%، بينما حققت طوبولوجيتا PS و PPأعلى كفاءة بلغت نحو 63%. ويبين الشكل أن طوبولوجيتي PS وPP تحققان أداءً أفضل من حيث كفاءة نقل الطاقة عند هذه المسافة، مما يعكس تأثير طوبولوجيا التعويض في تحسين كفاءة النظام تحت ظروف التشغيل نفسها. يمكن تفسير اختلاف الكفاءة باختلاف سلوك مطابقة المعاوقة لكل طوبولوجيا عند تردد الرنين، إذ يؤدي تحسن نقل القدرة الفعالة وانخفاض القدرة التفاعلية إلى تقليل الفواقد في عناصر النظام. وعند مسافة 100 mm يوفر معامل الاقتران المرتفع نسبيًا ظروف تشغيل مناسبة لطوبولوجيي SP وPP، مما ينعكس في صورة كفاءة أعلى مقارنةً بالطوبولوجيات الأخرى.



الشكل 10: الكفاءة المنظومة لطوبولوجيات الأربعة الأساسية عند مسافة فاصلة 100 mm.

يوضح الشكل (11) مقارنة القدرة المنقولة إلى الحمل (Pload)للطوبولوجيات الأربع(SS ، SP، PS، PP) عند مسافة فاصلة 100 mm. حققت طوبولوجيا SPأعلى قدرة منقولة بلغت 14.64 W، بينما سجلت طوبولوجيا PSأقل قدرة بلغت 4.26 W، في حين حققت طوبولوجيتا SSو PPقيمًا متقاربة بلغت 8.55 W و8.23 W على التوالي. ويُعزى هذا التباين إلى اختلاف مطابقة المعاوقة وسلوك دائرة التعويض عند تردد الرنين، حيث أتاحت طوبولوجيا SPانتقالًا أعلى للقدرة الفعالة إلى الحمل مع تقليل الفواقد، بينما أدى ارتفاع الممانعة المكافئة في طوبولوجيا PSإلى انخفاض القدرة المنقولة مقارنةً ببقية الطوبولوجيات.



الشكل 11: القدرة المنقولة لمنظومة شحن لاسلكي لطوبولوجيات الأربعة الأساسية عند المسافة الفاصلة 100 mm.

توضح جدول (3) المقارنة أن الدراسات السابقة ركزت غالبًا على الملفات الدائرية، بينما اعتمدت هذه الورقة على الملفات المستطيلة المسطحة التي تعكس تطبيقات عملية أكثر في شحن المركبات الكهربائية. كما يظهر أن طوبولوجية SP في هذه الدراسة حققت أعلى قدرة منقولة مقارنة بالدراسات السابقة، بينما أظهرت PP أفضل توازن بين القدرة والاستقرار. في المقابل، تتفق النتائج مع الأدبيات في أن SS و PSتعانيان من حساسية أعلى لتغير الاقتران وزيادة الخسائر.

يبين الجدول 4 مقارنة شاملة بين الطوبولوجيات الأربع الأساسية من حيث القدرة المنقولة والكفاءة واستقرار التشغيل. تُظهر النتائج تفوق طوبولوجيا SPفي تحقيق أعلى قدرة منقولة، بينما تميزت طوبولوجيا PP بأعلى كفاءة واستقرار تشغيلي عند ظروف الاقتران المتوسط. في المقابل، أظهرت طوبولوجيا SS و PSحساسية أعلى لتغير معامل الاقتران، مما يحد من ملاءمتهما للتطبيقات العملية ذات المسافات المتغيرة.

الاستنتاج

قدمت هذه الدراسة تحليلًا ومقارنةً شاملة لأداء طوبولوجيات التعويض الرنيني الأربع الأساسية (SS، SP، PS، PP) في أنظمة نقل الطاقة لاسلكيًا باستخدام ملفات مستطيلة مسطحة، مع تقييم تأثير تغير المسافة الفاصلة بين ملفي الإرسال والاستقبال على معامل الاقتران المغناطيسي، والمحاثة المتبادلة، والقدرة المنقولة، والكفاءة الكلية للنظام. وقد أُجريت المقارنة ضمن بيئة محاكاة موحدة وباستخدام معلمات تشغيل متماثلة، مما أتاح إجراء تقييم عادل ودقيق لأداء كل طوبولوجيا.

أظهرت النتائج أن زيادة المسافة من 100 mm إلى 200 mmأدت إلى انخفاض معامل الاقتران المغناطيسي من 0.4259 إلى 0.3337، وانخفاض المحاثة المتبادلة من 5.568 µH إلى 4.365 µH، وهو ما انعكس مباشرةً على تراجع القدرة المنقولة وكفاءة النظام في جميع الطوبولوجيات نتيجة ضعف الاقتران المغناطيسي بين الملفين.

أثبتت المقارنة أن أداء الطوبولوجيات يختلف بصورة واضحة تبعًا لطريقة

التعويض الرنيني. فقد حققت طوبولوجيا SP أفضل أداء من حيث القدرة المنقولة إلى الحمل، حيث بلغت 14.64 W عند مسافة 100 mm، مما يدل على قدرتها العالية على نقل القدرة الفعالة إلى الحمل، ولذلك تعد الخيار

الجدول 3: مقارنة بين الدراسات السابقة والنتائج الورقة الحالية من حيث القدرة والكفاءة ونوع الملفات والمسافة الفاصلة.

ملاحظات	الكفاءة(%)	القدرة المنقولة	المسافة الفاصلة (mm)	نوع الملفات	الطوبولوجيا	المرجع
أساس نظري للنقل الرنيني	—	—	100–200	دائرية	SS	[1] Kurs, et al.
تفوق SS عند الاقتران القوي	98% / 72%	5 W	100	دائرية	SS / SP/PS/PP	[2] Rehman, et al.
تطبيقEV	99%	3.6 W	حتى 105	دائرية مسطحة	SS	[11] Scher, et al.
تحليل نظري	مقارنة تحليلية	10-1W	100-150	دائرية	SS / SP / PS / PP	[10] Li, et al.
تأثير سوء المحاذاة	92% / <90%	2–3 W	80–120	مستطيلة	PS / PP	[13] Wu, et al.
تحسينGA	74–79%	غير محدد	15–25 cm	دائرية	الأربعة	[14] Deng , et al.
SPأعلى قدرة و PPأعلى استقرار	(63% – 39%≈حسب الطوبولوجيا)	4.26 – 14.64 W	100–200 mm	مستطيلة مسطحة	SS / SP / PS / PP	هذه الورقة

الجدول 4: مقارنة بين طوبولوجيات الأربعة الأساسية.

التوصية التطبيقية	الحساسية لتغير الاقتران	استقرار التشغيل مع تغير المسافة	الكفاءة الكلية %	القدرة المنقولة إلى الحمل(W)	الطوبولوجيا
غير مفضلة عند الاقتران المتوسط	عالية	منخفض	منخفضة 39%≈) عند 100(mm	8.55	SS
الأنسب لنقل قدرة مرتفعة	متوسطة	متوسطة	63	14.64 (الأعلى في الدراسة)	SP
غير مفضلة للتطبيقات العملية	عالية جدًا	منخفض	63	4.64	PS
الأنسب من حيث الاستقرار	منخفضة	عالية	عالية 63%≈) عند 100(mm	8.23	PP

الأنسب للتطبيقات التي تتطلب قدرة نقل مرتفعة. أما طوبولوجيا PPفقد تميزت بأعلى كفاءة بلغت نحو 63%مع استقرار أفضل للأداء عند تغير المسافة، الأمر الذي يجعلها أكثر ملاءمة للتطبيقات التي تتطلب موثوقية واستقرارًا في التشغيل. وفي المقابل، حققت طوبولوجيا SSقدرة منقولة متوسطة بلغت 8.55 W إلا أن كفاءتها انخفضت إلى أقل من 40%، مما يشير إلى ارتفاع الفواقد وحساسيتها الكبيرة لتغير معامل الاقتران. كما سجلت طوبولوجيا PSأقل قدرة منقولة بلغت 4.26 W، على الرغم من تحقيقها كفاءة جيدة، إلا أن ارتفاع حساسيتها لتغير الاقتران المغناطيسي يحد من استخدامها في التطبيقات العملية التي تتطلب نقل قدرة مرتفعة.

وتبرز الإضافة العلمية لهذه الدراسة في تقديم مقارنة موحدة للطوبولوجيات الأربع باستخدام ملفات مستطيلة مسطحة، وهو جانب لا يزال محدودًا في الدراسات السابقة التي ركزت غالبًا على الملفات الدائرية أو على تحليل طوبولوجيا واحدة فقط. كما توضح النتائج أن اختيار طوبولوجيا التعويض لا يؤثر في كفاءة النظام فحسب، بل يحدد أيضًا مقدار القدرة المنقولة واستقرار الأداء عند تغير المسافة، مما يوفر معايير تصميمية واضحة لاختيار الطوبولوجيا المناسبة لأنظمة الشحن اللاسلكي للمركبات الكهربائية.

وبناءً على النتائج المتحصل عليها، يوصى باستخدام طوبولوجيا SPعندما تكون الأولوية لتعظيم القدرة المنقولة، في حين تمثل طوبولوجيا PPالخيار الأفضل عندما يكون الهدف تحقيق أعلى كفاءة واستقرار تشغيلي تحت ظروف الاقتران المغناطيسي المتوسط.

توصي هذه الدراسة بأن تتناول الأعمال المستقبلية تأثير عدم المحاذاة بين الملفات المستطيلة المسطحة وتغير تردد التشغيل على أداء طوبولوجيات التعويض الرنيني. كما يُستحسن إجراء دراسات تجريبية للتحقق من نتائج المحاكاة وتقييم أداء النظام تحت ظروف تشغيل واقعية، بما يدعم تصميم أنظمة شحن لاسلكي أكثر كفاءة واعتمادية للمركبات الكهربائية.

يُعزى انخفاض القدرة المنقولة مقارنةً بالدراسات السابقة إلى اعتماد الدراسة على ملفات مستطيلة مسطحة دون استخدام صفائح الفرايت أو تقنيات تحسين الاقتران، مما أدى إلى انخفاض المحاثة المتبادلة ومعامل الاقتران المغناطيسي. كما أن هدف الدراسة هو إجراء مقارنة موحدة بين طوبولوجيات التعويض تحت ظروف تشغيل متماثلة، وليس تعظيم القدرة المنقولة كما في أنظمة الشحن التجارية عالية القدرة.

Author Contributions: Alamir: Conceptualization and methodology, writing—original draft preparation, review and editing, data collection, results' analysis and discussion. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflicts of Interest: "The author declares that she has no conflict of interest."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "The dataset is available at https://github.com/nmelnyko/data_stroke/blob/main/data_stroke.csv."

References

[1] C. Mi, H. Li, and G. Covic. "A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11285–11306, Oct. 2021. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3067021

[2] A. Sagar, et al. "A Comprehensive Review of the Recent Development of Wireless Power Transfer Technologies for Electric Vehicle Charging Systems." *IEEE Access*, vol. 11, pp. 83167–83212, 2023. https://doi.org/10.1109/*ACCESS*.2023.3300475

[3] W. Zhang and C. Mi. "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems." *IEEE Transactions*

on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4768–4778, Jun. 2016. https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2454291

[4] M. Rehman, et al. "A Review of Inductive Power Transfer: Emphasis on Performance Parameters, Compensation Topologies and Coil Design Aspects." *IEEE Access*, vol. 11, pp. 144978–145010, 2023. https://doi.org/10.1109/access.2023.3344041

[5] X. Du and D. Dujic. "Modeling and Design Optimization of Loosely Coupled PCB Spiral Coils in Inductive Power Transfer Systems." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 11, pp. 13430–13442, 2023. https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3306178

[6] M. Abuqila, Y. Fahti, and M. Nyasapoh." Estimation of the Storage Capacity of Electric Vehicle Batteries under Weather and Drive-mode Conditions: A Case Study " *Wadi AlShatti University Journal of Pure and Applied Sciences*,vol.3, no.1, pp. 58-71, 2025.https://doi.org/10.63318/

[7] J. Fal, N. AbuHamoud, and A. Abdulgader. "Study and Design Multiband MPA Antenna for Smart Phones." *Wadi AlShatti University Journal of Pure and Applied Science*, vol. 4, no. 1, pp. 294–299, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_31

[8] S. Garash, A. Eluheshi, and A. Belhaj. "Wireless Sensor Networks in Desert Environments: A Systematic Review of Challenges, Solutions, and Research Gaps." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 372-380, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_31

[9] S. Li and C. Mi. "Study of Coupling Configurations of a Four-Plate Capacitive Power Transfer System." *Wireless Power Transfer*, vol. 6, no. 2, pp. 210–219, 2019. https://doi.org/10.1017/wpt.2019.21

[10] A. Scher, M. Mohammad, B. Ozpineci, and O. Onar. "Design and Optimization of Cancellation Coil Topologies for a Ferrite-less Wireless EV Charging Pad." *Proceedings of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA, pp. 771–775, Jun. 2021. https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490053

[11] M. Pinuela, and D. Ludois. "Review, Analysis, and Design of Four Basic Capacitive Power Transfer Topologies." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 6784–6798, Jun. 2022. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3137834

[12] K. Wu, Y. Wang, M. Gong, and W. Lu. "Analysis and Design of Misalignment-Tolerant PS/SP Compensation Topologies for an IPT System." *IEEE Transactions on Industry Applications*, Early Access, Jul. 2024. https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3379320

[13] Q. Deng, J. Zhang, and C. Mi. "Optimization of Compensation Parameters for Wireless Power Transfer Systems." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5690–5702, 2018. https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2858682

[14] J. Thabat and J. Woods. "Impact of Connection Type on the Efficiency of Wireless Power Transfer Systems." *Proceedings of the International Conference on Circuits, Systems and Simulation*, 2017. https://doi.org/10.1109/cirsyssim.2017.8023200

[15] S. Hui. "Magnetic Resonance for Wireless Power Transfer: Concepts and Applications." IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 11, pp. 5760–5771, Nov. 2014. https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2297092

[16] M. Bensetti, K. Kadem, Y. Pei, Y. Le Bihan, E. Labouré, and L. Pichon. "Parametric Optimization of Ferrite Structure Used for Dynamic Wireless Power Transfer for 3 kW Electric Vehicle." *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1145, 2023. https://doi.org/10.3390/en16031145

[17] H. Wheeler. "Simple Inductance Formulas for Radio Coils," *Proceedings of the IRE*, vol. 16, no. 10, pp. 1398–1400, Oct. 1928. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221309

[18] X. Mou, O. Onar, and J. Wang. "Modeling and Analysis of Magnetic Field Distribution and Coupling Variation in Wireless Power Transfer Pads Under Misalignment." *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 5021–5032, Dec. 2022. https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3164277

[19] J. Zeng, S. Chen, K. Li, and S. Hui. "A Front-End Monitoring Method for Coupling Coefficient and Receiver Resonant Frequency in the SS-Compensated Wireless Power Transfer Systems with Unknown Receiver Parameters." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024. https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3359213

[20] U. Bulkunde, and V. Agarwal. "Analysis of Ferrite Arrangement in Rectangular Coil for Wireless Charging of Electric Vehicles." *in Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 2023. https://doi.org/10.1109/STPEC59253.2023.10430499.