

טעינה אלחוטית של רכבים חשמליים על ידי שימוש בשיטת RWPT

ארז באר, ארתור שוחט - הקריה למחקר גרעיני, נגב

כלי התחבורה החשמליים הקיימים היום בעלי יתרונות רבים. אודות לשימוש במנוע חשמלי מסוג "ללא מברשות" המורכב לרוב מרוטור בעל סדרת מגנטים קבועים וחזקים, כלי רכב אלו בעלי תאוצה ומהירות סופית גבוהה אשר מסוגלת לייצר מומנטים גבוהים כמעט בכל מהירות נבחרת. הנעה ללא מנוע בעירה מביאה לירידה בריכוז פליטת המזהמים בתוך העיר. בעיקר מורגש באזורים סגורים כמו חניות מקורות או אזורים עמוסים כגון מרכזי ערים. בנוסף, יכולת ההפעלה השקטה מפחיתה את "זיהום הרעש" המוכר. הרכב חשמלי יעיל יותר מבחינה אנרגטית וזאת כיוון והוא פולט פי 3 פחות חום (בהשוואה למנוע הבעירה) אשר מתבזבזים בסביבה הקרובה [1]. יעילות זאת מתבטאת גם בכך ששימוש בכלי רכב חשמליים דווקא מפחית את דרישות ייצור החשמל ועמו את כמות פליטת הגזים המזהמים הנוצרים בתהליך. כך לדוגמא, בארצות הברית בלבד במידה וכלל האוכלוסייה תעבור להשתמש בכלי רכב חשמליים זה יוביל להפחתה של כ-30% מפליטות גזים מזהמים הנוצרים בתהליך ייצור החשמל. יעילות הרכב החשמלי מתבטאת גם בכך שיחסית למנועי בנזין, העלות הכספית של האנרגיה הנצרכת ברכבים חשמליים זולה באופן משמעותי. בישראל, עלות טעינת סוללת רכב טיפוסי בהספק של 16 קילוואט שעה אשר מספיקים לנסיעה של כ-140 קילומטר היא כ-10 שקלים בלבד (ללא מיסי דלק). היתרון בא לידי ביטוי גם בהיבט התחזוקתי כאשר חיי המנוע החשמלי הינם ארוכים יותר מאלו של מנוע בעירה פנימי וכתוצאה מכך, כמות התקלות והביקור במוסכים יורדת באופן דרסטי. הסיבה לכך נובעת מהעובדה כי בהשוואה עם מנועי הבעירה הפנימית, למנוע החשמלי שחיקה נמוכה עקב העדר מכלולים נעים ומעט חלקים מכניים [2].

על אף כל היתרונות אשר הוצגו, עדיין קיימים כמה חסרונות אשר מונעים מהרכב החשמלי לתפוס מקום נכבד בחיינו כבר כעת. מהי הסיבה האמיתית לכך?! ובכן, אחת החולשות העיקריות והמשמעותיות ביותר במקרה של הרכב החשמלי נובעת מהצפיפות האנרגטית (יחס אנרגיה למשקל) הנמוכה של הסוללות המותקנות ברכבים אלו. טווח הנסיעה הריאלי של רוב המכוניות החשמליות המשפחתיות הקיימות היום, לא עובר את 250 ק"מ לטעינה, בעוד שבמקרה של מכונית בנזין טווח הנסיעה הינו בין 500-600 ק"מ לתדלוק. (בין 700-800 ק"מ במנועי דיזל) [2]. טעינה מחדש לוקחת זמן רב (ברוב המכוניות החשמליות זמן הטעינה הרגיל נע בין 8 ל-12 שעות) והוא נחות באופן משמעותי ביחס לזמן הדרוש לתדלוק רכבי בנזין או סולר. כל אלו גורמים ל"חרדת טווח" אצל נהגים וזה מציב מגבלות לשימוש ברכב מסוג זה.

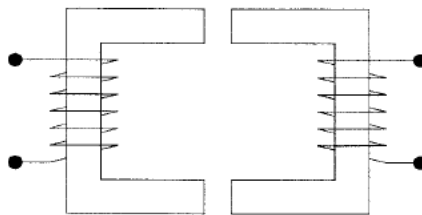


איור 1 – מכונית חשמלית ה"אליקה" מתוצרת אוניברסיטת KEIO היפנית.

על מנת לספק טווח נסיעה ארוך יחסית בין ההטענות, כלי רכב חשמלי זקוק לסחוב עמו מערך סוללות גדול. הסוללה הנפוצה ביותר לשימוש כיום היא סוללה המבוססת על תאי ליתיום-יון. סוללה זו בעלת צפיפות הספק גבוהה עד מאוד (כ-250–340 וואט לקילוגרם) אך עלות מרכיביה (בעיקר הליתיום) יקרים דבר הגורם לכך שמחיר המכונית החשמלית גבוה פי 2 מהערך של מכונית בנזין [2]. פרופסור הירוש"י שיניזו מאוניברסיטת קאיוו היפנית הצליח ליצור ב-2003 את "אליקה" (ראה איור 1). מכונית חשמלית המגיעה למהירות מרשימה של 370 קמ"ש (מגיעה מ-0 ל-100 קמ"ש ב-4 שניות) ולמרחק של 300 ק"מ בטעינה אחת [3]. נתונים אלו מחייבים שימוש ב 320 סוללות מסוג ליתיום-יון שעלותם הכוללת הינה כ-20 מיליון ין יפני (כ-181,000 דולרים). בנוסף, סוללות אלו סובלות ממספר מחזורי פריקה-טעינה נמוך יחסית (כ-2000–4000) וזה מציב מגבלת אורך חיים אשר מחייבת החלפה תקופתית של המערך כולו, מהלך אשר טומן בחובו גם הוצאה כספית ניכרת. מערך סוללות גדול ומספק מהווה נתח נכבד מהמסה והנפח של הרכב הגבוהים פי עשרה מאשר מיכל הדלק במנוע בעירה. כמות גדולה של ליתיום המצויה ברכב מייצרת סכנה בטיחותית חמורה.

היכולת האנרגטית הנמוכה מחייבת לחפש אחר פתרונות יעילים אחרים לטעינת הסוללות והארכת טווח היכולת במהלך היום. למטרה זו ממש הוקמו תחנות ציבוריות לטעינה מהירה, שולבו מערכות מנועי עזר לטעינה והוקמו תחנות החלפה של מצברים (פתרון שנכשל בישראל ובמספר מדינות נוספות). פתרונות אלו אינם מצליחים לגשר באופן ראוי על החיסרון הקיים וכך יוצא שהאלטרנטיבה של רכב חשמלי (על שלל יתרונותיו) מאבדת נקודות לטובת הרכב מונע הבנזין. בכדי להגביר את השימוש ברכבים חשמליים חייבים פתרון יעיל, נוח ובטוח וזאת גם הסיבה מדוע נושא הסוללות נחקר היום בקצב מהיר וזאת במטרה למצוא את הנוסחה המושלמת לתא סוללה אופטימאלי. יחד עם זאת, נראה כי עד אשר ימצא הפתרון המתאים ביותר תעבור תקופה ארוכה. פתרון נוסף אשר מפותח בימים אלו ויכול עשוי אולי לפתור את הבעיה ובאופן חלקי, מבוסס על הטכנולוגיה **לטעינה אלחוטית** של כלי תחבורה חשמליים. המשך מאמר זה מתאר בהרחבה את עקרונות השיטה המשמשת לצרכי טעינה אלחוטית, דוגמאות ברחבי העולם ליישומים אשר הוקמו למטרת בחינה ותקנון של טעינת רכבים, היתרונות והמגבלות של שיטה זו.

שיטת העברת אנרגיה חשמלית בטווחים הקרובים והבינוניים¹ מבוססת על עיקרון ההשראה המגנטית של **מיכאל פרדיי** (1835). על פי עיקרון זה, זוג סלילים נחשבים למצומדים מגנטית במידה וחלק מהשטף המגנטי הנוצר בסליל מקור מצליח לחצות את התווך (לדוגמא אוויר) ולהגיע לסליל יעד מרוחק. **מקדם הצימוד (K)** הינו ערך שבין 0 ל-1 אשר מבטא את החלק היחסי של השטף אשר חוצה את סליל היעד מסך השטף הנוצר בסליל מקור. שינוי בזמן של השטף המועבר מייצר כ"מ² (EMF) מושרה בסליל היעד המרוחק וחלק מהאנרגיה מצליחה לעבור מצד מקור לצד היעד והעומס.



איור 2 - מבנה השנאי המפוצל.

¹ טווח בינוני נחשב כמרחק הגדול פי כמה מקוטר הסליל.
² כ"מ – כוח אלקטרו מגנטי.

קשר זה בין הסלילים מבוטא בהשראות הדדית (M- Mutual Inductance) אשר מהווה תוספת להשראות הקיימת במעגל הכולל והיא העיקרון הבסיסי העומד מאחורי פעולת השנאים, מנועים חשמליים וגנראטורים. למעשה, כתוצאה מהמרווח בין הסלילים וסוג התווך חלק מקווי השדה המגנטי (שטף מגנטי) הנוצרים במקור מתפזרים באוויר. ערך ההשראות ההדדית תלוי רבות במרחק, בזווית היחסית בין סלילים ותכונות המגנטיות של התווך בו עובר השטף. הקשר בין ההשראות ההדדית (M) ומקדם הצימוד (k) במערכת סלילים מתואר בביטוי 1.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

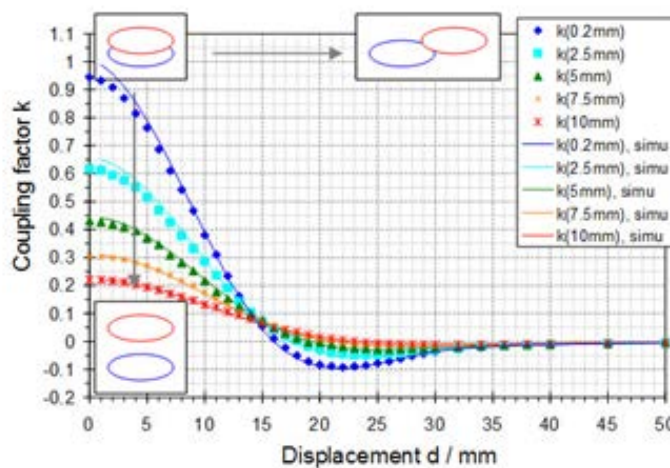
כאשר,

$M[H]$ - השראות הדדית.

$L_1[H]$ - השראות עצמית של סליל ראשוני.

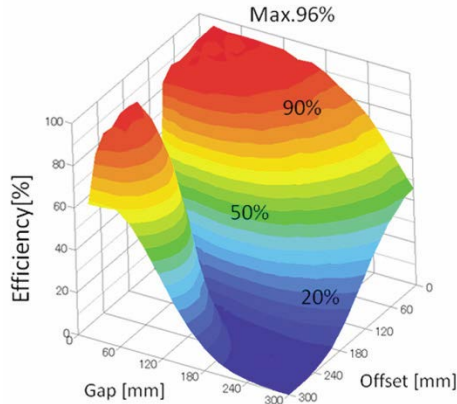
$L_2[H]$ - השראות עצמית של סליל משני.

הקשר המגנטי אשר נוצר בין זוג סלילים יכול להיות אחד מהבאים: צימוד יתר, צימוד טוב, צימוד קריטי, צימוד משוחרר. צימוד יתר נוצר כאשר סליל היעד והעומס משפיעים על השטף המגנטי העובר באופן כזה שהוא נפגע [4]. התופעה קורת במקרים בהם המרווח בין הסלילים אפסי. בצימוד טוב המרחקים בין הסלילים הינו עד למספר מילימטרים בודד ומקדם הצימוד מתקרב ל-1. דוגמא לצימוד טוב ניתן למצוא בשנאי וזאת בזכות ליבת הברזל אשר למעשה בעלת תכונה הגורמת לשטף להיות "כלוא" במסלול סגור. צימוד קריטי הוא מצב בו העברת אנרגיה ברוחב פס אופטימאלי עבור מקרים בהם המקדם שווה ל-0.5. בערך מקדם נמוך יותר אומרים שהצימוד משוחרר. צימוד משוחרר מתקיים במקרה של שנאי המפוצל (ראה איור 2) בו הסליל הראשוני והמשני כרוכים על גבי ליבות פרומגנטיות שונות. הליבות מרוחקות במרווח אוויר מעט ודיי מספיק בכדי שמרבית השטף במקור מתפזר בתווך ואינו מצליח ליצור כל השפעה בצד המרוחק. נרחיב תכונה זו באמצעות הגרף הבא (איור 3) אשר מתאר את הקשר בין ערך מקדם הצימוד, גודל מרווח האוויר וההיסט הזוויתי בין הסלילים. כפי שניתן ללמוד מהגרף, ערכים גבוהים מתקבלים כאשר הסלילים מוצבים זה מעל זה וככל ומרווח האוויר קטן. ערך מקדם צימוד 1 מתקבל כאשר המרחק 0.2 מ"מ בעוד שעבור מרחק של 2.5 מ"מ הערך יורד ב-40 אחוזים! המקדם נוחת באופן תלול במקרה והסלילים מוזזים ובמקרה וההסטה בגודל של רדיוס הסלילים, מקבלים מקדם צימוד המגיע לערך של 0.1.



איור 3 - השוואה בין תוצאות חישוב אנליטי, נומרי ומדידות ניסויים של מקדם הצימוד (K) בתלות במרחק בין סלילים.

ניתן עוד לראות כי ערך שלילי מתקבל במקרים בהם ההיסט גדול אף יותר (נובע מכך שהשטף המגנטי במגמה הפוכה). ניתן לשפר את מקדם הצימוד על ידי תכנון חזית הסליל לקוטר הגדול יותר ממרווח האוויר או סליל מקור קטן יותר מסליל יעד [4]. נצילות העברת אנרגיה בין צד מקור אל היעד בתלות במיקום היחסי בין סלילים מבוטאת בגרף הבא (איור 4). ניתן לראות כי במידה והסלילים מיושרים אקסיהאלית זה מעל זה (ערך ההיסט שווה לאפס), הנצילות מונחתת עם הגדלת מרווח האוויר באופיין בעל מבנה פרבולי תלול (ההנחתה באנרגיה הינה לפי $1/1^3$ כאשר 1 מבטא את מרווח האוויר בין הסלילים) [4].



איור 4 - נצילות העברת אנרגיה בין סליל מקור ויעד בתלות במיקום היחסי.

שתי הדוגמאות האחרונות מוכיחות כי שימוש בשיטת ההשראה המגנטית, לא מאפשר לספק אנרגיה חשמלית בנצילות מספיק גבוהה לסליל יעד מרוחק (בטווח הבינוני) ובטח לא ניתן יהיה לספק אנרגיה לצרכי טעינה של רכבים חשמליים. עובדה זו הייתה מבוססת שנים רבות ועד שנת 2007 כאשר הציגה קבוצת חוקרים מאוניברסיטת הטכנולוגיה במסצ'וסטס (MIT) ובשיתוף חברת WiTricity את תוצאות מתקן להעברת אנרגיה חשמלית בטווח בינוני המבוססת על תהודה מגנטית. השיטה נקראת **Resonance Wireless Power Transfer (RWPT)** והמתקן (ראה איור 5) הורכב מזוג סלילים לולייניים (סליל מקור וסליל יעד) ברדיוס של 30 ס"מ כל אחד. סליל היעד מוקם במרחק של 1 מטר מסליל המקור (אשר חובר למקור המתח) וחובר לעומס - נורה בהספק של 60 וואט. המתקן הצליח להאיר את הנורה והנצילות אשר נמדדה הייתה 90 אחוזים.



איור 5 - מערכת RWPT אשר נבנתה על ידי קבוצת מחקר באוניברסיטת MIT.

שיטת ה-RWPT משתמשת בעיקרון הצימוד החזק אשר מתפתח בשטף המגנטי הפועל בתווך אוויר ונוצר על ידי זוג סלילים המתואמים לפעול יחד בתדר התהודה הטבעי (רזוננס). על פי עיקרון זה, במידה והתדר הטבעי של המערכת מתואם לתדר העבודה של המקור (ספק המתח), אזי מספיק חלק קטן מקווי השטף החוצים את תווך האוויר (כפי שקורה בצימוד משוחרר) בכדי לגרום ליעד לספוג את האנרגיה המגנטית ולגרום לה להתנדנד בין השראות וקיבול כמעט ללא הפסדים. השיטה מתגברת על אותם שטפי פיזור אשר

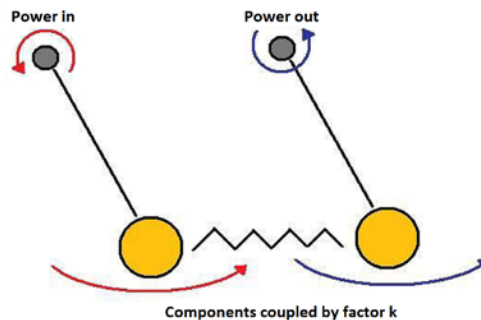
תוארו קודם לכן ונוצרים במרווח אוויר גדול. באופן זה מתאפשרת העברת אנרגיה בין סליל מקור בצד אחד לסליל יעד בצד אחר בניצול גבוהה מאוד ולמרחקים של עד מטרים בודדים. לטענת הכותבים ב [6], [7], בזכות התהודה נוצרת סוג של מנהרה מקשרת בחלל שבין שני הסלילים ולמעשה השיטה גורמת לכך שהמרחק הפיסי הקיים בין הסלילים כמו מתקצר.



איור 6 - הרעיון של טסלה לאספקה של אנרגיה חשמלית עבור צרכנים באמצעות סליל טסלה אחד ראשי כלל עולמי.

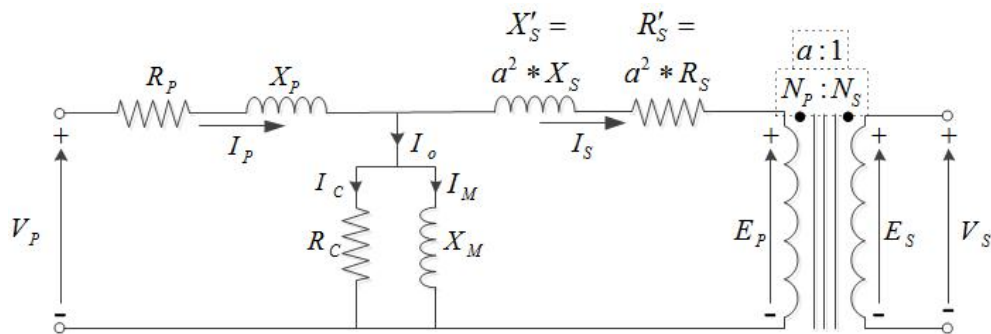
עקרונות השיטה למטרת העברת אנרגיה חשמלית ברזוננס וללא מגע ידועות כבר למעלה ממאה שנה. עיקרון הצימוד המגנטי החזק הנוצר בין סלילים מבוסס על רעיון שהיה אחד ממוקדי המאמץ של המדען הסרבי ניקולאי טסלה, אחד הממציאים הגדולים אי פעם, שחי בסוף המאה ה-19. בשנת 1891 פרסם טסלה את הרעיון המבריק של סליל הטסלה (איור 6) אשר לטענתו יכול לספק אנרגיה חשמלית לצרכנים בטווחים גדולים עוד בטרם החלה תשתית קווית להיסלל בין תחנות ייצור החשמל אל עבר הצרכנים הסופיים. הנצילות הגבוהה שהתקבלה על ידי קבוצת MIT והישגי העברת אנרגיה במרחקים גדולים להפליא בין סלילים, גרמה לכך שעבודה זו עוררה מחדש את תחום העברת האנרגיה החשמלית באופן אלחוטי. תגלית זו היוותה הישג אדיר (כזה שהיה גורם לטסלה להתמוגג מאושר) שכן עד אז, אף אחד לא הצליח לשפר בשום שיטה את הנצילות הנמוכה של השנאי המפוצל והיא משכה תשומת לב רבה בעולם הטכנולוגי [5].

את רעיון התהודה ניתן להבין באופן אינטואיטיבי באמצעות המערכת המכאנית המתוארת באיור 7. המערכת מורכבת מזוג מטוטלות המחוברות ביניהן במרכז באמצעות קפיץ. תנועת מטוטלת אחת בתדירות השווה לתדר הטבעי של המערכת כולה, תביא לכך שלא רק שהיא עצמה תתנדנד בעוצמה גוברת, אלא בנוסף תאלץ את המטוטלת השנייה להתנהג באופן זהה. זאת מושג באמצעות הקפיץ ובהנחה כי לא קיימים הפסדים במערכת, האנרגיה הכוללת הראשונית אשר נמסרת למערכת נשמרת.



איור 7- העברת אנרגיה ברזוננס – אנלוגיה למערכת מכאנית.

דוגמא נוספת למערכת באמצעותה ניתן להבין באופן אינטואיטיבי את המנגנון הפועל היא הנדנדה. במערכת זו יושב אדם ומצליח להתנדנד באופן אפקטיבי כאשר הוא מתאם בין פעולת רגליו וזרועותיו לשינויים שעוברים על הנדנדה. כתוצאה משימור אנרגיה ותרומה בכל נדנד, ניתן להגביר את עוצמת הנדנד [8]. באופן כמעט זהה, ניתן לתאר את שיטת העברת אנרגיה חשמלית ברזוננס באמצעות שדות מגנטיים. לשם כך נתבונן בסכמת תמורה של שנאי טיפוס המוצגת באיור 8 רכיבי ההשראות הטורית המיוצגים על ידי העכבות X_p ו X_s מציינים את השראות הפיזור בסלילי המקור והיעד בהתאמה. השראות זו מציינת את אותם קווי שטף מגנטי אשר אינם "מצליחים" לחצות את התווך ולמעשה מתבזזים. ההתנגדות האומית של הסלילים (R_s ו R_p) למעשה מבטאת את הפסדי ההולכה הנובעים מזרמים הפועלים בסליל עצמו. הענף המקבילי נקרא ענף המגנטט והוא מבטא את ההצמדה המגנטית הנוצרת בין המקור והיעד קשר מגנטי זה מיוצג באמצעות ההשראות ההדדית (X_M). ההתנגדות (R_c) מייצגת את הפסדים הנוצרים בליבה בצורת חום, בעיקר עקב הפסדי ברזל (היסטרסיז וזרמי מערבולת³). הענף המקבילי הימני ביותר מייצג את השנאי האידיאלי בעל יחס כריכות $N_p:N_s$ [8].



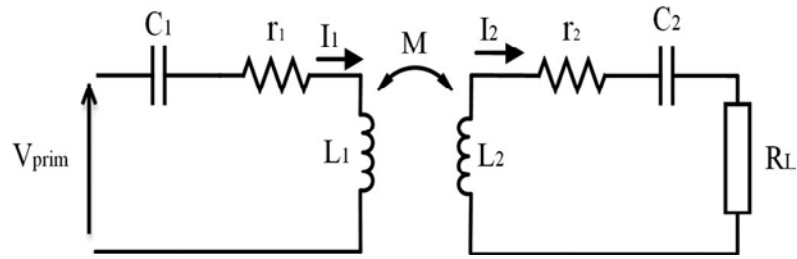
איור 8 - מעגל תמורה של שנאי.

באמצעות מעגל התמורה ניתן לראות די בבהירות כיצד כתוצאה ממרווח האוויר והגידול באבדני השטף המגנטי, רכיב השראות הפיזור הנוצרת בסלילי המקור (סליל המחובר למקור) גדלה באופן משמעותי ובמקרה שכזה, נקבל מקדם צימוד נמוך. עקב השוני ביחס בין השראות הפיזור וההדדית, ייווצר מצב בו מרבית ממתח המקור "נופל" על השראות הפיזור ומעט מאוד מתפתח על הענף המקבילי (במרווח של כ-2 מ"מ מקבלים הנחתה של כ-80 אחוז במתח המוצא אשר אובדים לטובת שטפי הפיזור). לבסוף מקבלים כי כא"מ המוצא יורד על חשבון המתח המתפתח בהשראות הפיזור [3]. ירידה בערך השראות ההדדית תביא לעלייה חדה בזרמים הפועלים בסליל המקור וזה מביא לעלייה חדה הן בהפסדי ההולכה והן בשטפי השדה המגנטיים אשר אינם משתתפים בהצמדה, מתבזזים במרחב (תופעת ה-Fringing Effect) ומייצרים הפרעות אלמ"ג חזקות [8], [9].

מערכת תהודתית מתואמת המייעלת את העברת האנרגיה תתקבל על ידי שילוב קבלים במעגל הראשוני והמשני של השנאי ובאמצעות כיוון אות מקור המתח לתדירות המעגל הכולל. האנרגיה החשמלית מהמבוא תתנדנד בין אנרגיה חשמלית בקבלים לאנרגיה מגנטית בסלילים תוך שהם צוברים אנרגיה הגוהה עם הזמן [8]. כפי שניתן לראות, במעגל התמורה של השנאי המתואר באיור 9, שולבו בטור קבלים C_1 ו C_2 . למעשה, הקבלים אשר שולבו במעגל יקזזו בתדר הרזוננס את השפעת השראות הפיזור הגדולות אשר נוצרות בטווח הבינוני ועל ידי כך ניתן לעלות את נצילות המערכת. ההיגב הכולל אשר רואה המקור בכניסה

³ זרמי מערבולת (Eddy Currents) – זרמים מקומיים בחומר בעקבות התפתחות כא"מ מושרה, הגורמים לחימום הרכיב החשמלי.

תהיה התנגדות אומית טהורה ובאמצעות תיאום עכבות שקולות, ניתן להעביר הספק מצד מקור לצד יעד ביעילות מרבית [6].



איור 9 - מעגל תמורה של שני בתוספת קבל הנועד לתיאום עכבות התהודה.

תדירות הרזוננס לאחר התחשבות בכלל השראויות והקיבול הנוסף תחושב באופן הבא:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + N^2 L_2)(C_1 + C_2 / N^2)}} \quad (2)$$

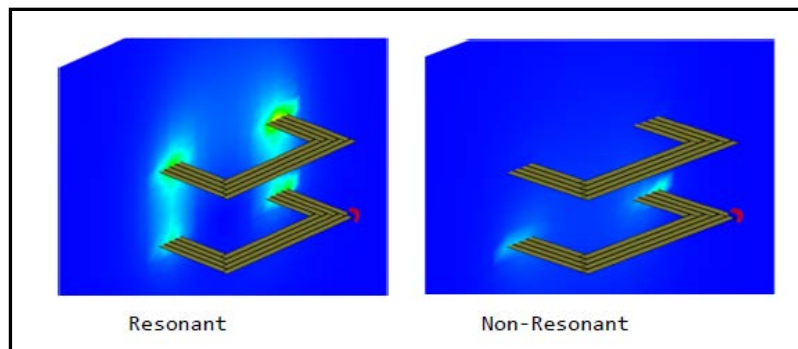
כאשר,

$C_s, C_p [F]$ - קבלי רזוננס טוריים.

$L_s, L_p [h]$ - השראויות הפיזור

N - יחס כריכות

האיור הבא (איור 10) מתאר באמצעות חישוב נומרי את הכא"מ המתפתח במרחב בו מוגדרים סליל מקור ויעד עבור שני מקרים. האחד מערכת מסוג צימוד השראי רגיל (צד ימין) והשנייה מערכת בצימוד מתואם לרזוננס (צד שמאל). כפי שניתן לראות מתוך התוצאות, במקרה שהסלילים אינם מתואמים לתדר הרזוננס, כמעט ולא מתפתח כא"מ (כוח אלקטרו-מגנטי) בסליל היעד והאנרגיה החשמלית שנמסרת על ידי המקור, מתבזבזת במרחב. במקרה וההשראות העצמית והקיבול הפרזיטי של הסלילים מתואמים לתדר הרזוננס (במקרה הזה 6MHz), מתפתח בצד סלילי היעד כא"מ משמעותי.



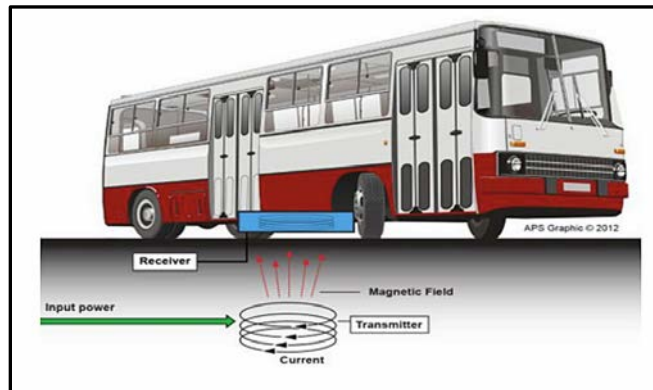
איור 10 - תוצאות סימולציה עבור שני מקרים של סלילים מצומדים מגנטיים: בצד ימין – ללא תיאום רזוננס, בצד שמאל - בתיאום רזוננס.

עיקר הצורך שהביא לחידוש ההתעסקות בנושא זה ולפיתוח שיטות העברת אנרגיה באופן יעיל, נולד כתוצאה מהרצון ליצר עולם נוח בו לא נדרשת כבילה ופותרת את ה"מצוקה" אשר נובעת מכמות הכבלים אשר דורשים מאתנו כלל המכשירים הניידים הסובבים אותנו (דוגמה לטעינה אלחוטית של מחשב נייד מרוחק ממקור מתח מתוארת באיור 11).



איור 11 - הצגת עיקרון העברת אנרגיה לצורך טעינת מחשב נייד.

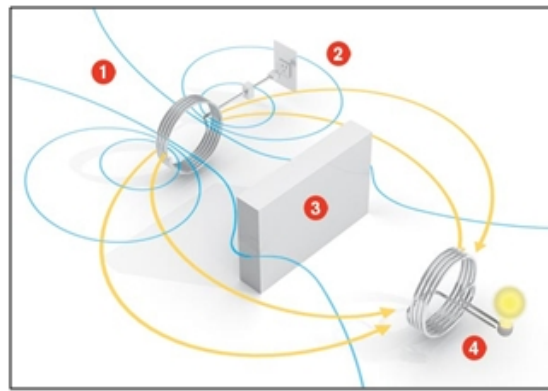
נכון למועד כתיבת דוח זה, נבחנת ומפותחת השיטה לצורך הגדלת הטווח וההספק החשמלי המועבר. היישום העיקרי עבורו זה נדרש הינו בתחום הרכב החשמלי [10]. על פי הדוחות [3] אשר פורסמו בנושא בעתיד הלא רחוק יוטמנו משדרים תחת רצפות וכבישים ואלו ישמשו לאספקת אנרגיה לטעינת כלי רכב חשמליים מתואמים המצויים בקרבנם. באמצעות היכולת לטעינה אלחוטית בכל חנייה פרטית וציבורית, ניתן יהיה להתנתק מהתלות שפיתחנו בטכנולוגיה העתידית הלא ברורה של הסוללות הכימיות. כמו כן מובטחים שיפורים בחיי היומיום ובכמה היבטים. ראשית, בשילוב מערכות טעינה נסותרות ופשוטות יחסית למימוש, ניתן יהיה להגדיל את טווח הנסיעה באופן משמעותי. כיוון והרכב יטען מיד עם כניסה לחנייה הפרטית וללא התערבות הנהג, ניתן יהיה להימנע ממצבים בהם נשכח לחבר את כבל הטעינה של הרכב בחנייה ולהיתקע ביום המחרת. יעילות הטעינה תביא לצמצום בכמות הסוללות המותקנת ברכב. משמעות צמצום מספר הסוללות מתבטא קודם כל בהפחתה בממדים ובמשקל של כלי רכב. מחיר הרכב ירד באופן משמעותי (כמחצית מערכו), פחות סוללות "זרקו" בסוף חייהם ובכך ניתן יהיה לצמצם בנזק שאלו מסבות ולסייע גם בשימור הסביבה. מובטח שיפור בבטיחות אשר מתבטא הן בכך שהטעינה האלחוטית מצמצמת את הסיכון להתחשמלות אשר קיימת במקרה של חיבור המכונת החשמלית באמצעות פלאג (בעיקר בתנאי גשם ומזג אוויר שונים). והן בעקבות צמצום כמות הסוללות וסכנת ההתלקחות שאלו מייצרות. במקרה של רכבות אוטובוסים, השיטה משפרת את הבטיחות בכך שהיא מורידה את תשתיות במתח גבוה אשר נדרשו לצורך חשמול כלי התחבורה.



איור 12 - הצגת טעינת אוטובוסים חשמליים באופן אלחוטי באמצעות סלילים הקבורים בכביש.

שיטת RWPT מאפשרת לטעון את מערך הסוללות ברכבים חשמליים ביעילות ובמהירות. במספר כבישים יתכן וגם תתאפשר טעינה דינאמית, תוך כדי תנועה. זו נועדה במטרה לפצות לאחר (או במקביל) עלייה

תלולה בו המאמץ האנרגטי גדול והסוללה של הרכב מתרוקנת. אך מימוש השיטה לצרכי הטענה דינאמית נחשב לבעל נצילות נמוכה מהסיבות אשר יפורטו בהמשך. כיום, ניתן לראות פיילוטים למערכות טעינה של אוטובוסים עירוניים אשר הוקמו על ידי מספר גופים שונים משולבים עם מחלקות אוניברסיטה שונות ברחבי העולם. בשווייץ, חברת Asea Brown Boverly (ABB) Ltd הציגה טעינה אלחוטית מהירה המסוגלת להעביר 400kW ב-15 שניות באמצעות מערכת המורכבת על החלק העליון של התחנה ובכמה תחנות נבחרות לאורך המסלול [3]. בקוריאה הדרומית הוצגו אוטובוסים חשמליים הנטענים באמצעות מערכת בעלת הספק של 100kW ובנצילות של 85 אחוזים. זאת בתווך אוויר של 20 ס"מ. חוקרים מאוניברסיטת יוטה הציגו מערכת טעינת מצברים בהספק מרבי של 50kW ובתדר רזוננס של 20kHz במרחק של 15-30 ס"מ. באופן דומה, בשלבי פיתוח יישום להנעת רכבות חשמליות (תדירות של 60kHz). במקרה של כלי הרכב החשמליים אשר נדרשים להעברה של הספק גבוה, משולבים מעגלי הטעינה במערכת לזיהוי עומס המונעים הפעלת משדר לשווא (כלומר במקרים בהם לא מוצב רכב במקום או כאשר הרכב ממוקם לא מעל סליל המקור). במקרה של רכבים חשמליים עיקרון זה חשוב מאוד לנצילות האנרגטית הכללית. מערכות אלו הוצבו בעולם למטרת בחינה ותקנון. תקנים בנושא זה יבטיחו יכולת תאימות בין טכנולוגיה אחת המותקנת ברכב אחד למערכת אחרת המותקנת בכבישים [3], [8]. בנוסף, מאושר נושא הבטיחות, רמות הקרינה האלקטרומגנטית אשר נמדדו במערכות המותקנות באוטובוסים חשמליים שונים, עומדות בתקני התעסוקה של בטיחות תעסוקתית, בריאות הציבור וחשיפה סביבתית. בנושא בריאות הציבור, הכותבים במאמר [11] URS(2007) ו Karalis(2008) כבר הוכיחו כי שיטה זו איננה מזיקה כלל לגוף האדם.



איור 13 - העברת אנרגיה בתהודה לא נדרשת לקו-ראייה.

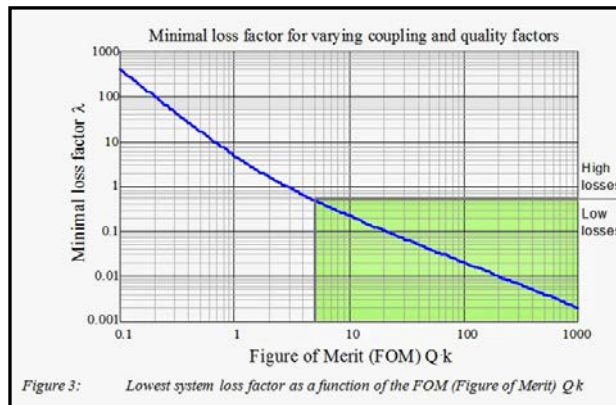
אמנם מרבית תשומת הלב מופנית למימוש השיטה לצרכי טעינה אלחוטית של כלי רכב, אך לשיטה זו יש את היכולת להשתלב גם למבחר רב של יישומים אחרים. דוגמא ניתנה במאמר [8] בו מציג הכותב תוצאות ניסוי אשר מתאר מערכת באמצעותה הצליחו להעביר אנרגיה חשמלית לגוף חימום בהספק של 5kW ובמתח של 230V המחובר ליחידת מקלט המצויה במרווח אוויר של 8mm. הנצילות שהתקבלה עבור ניסוי זה היא 92 אחוזים. באמצעות הטכנולוגיה ניתן למעשה לממש בפשטות ובקלות סוג של "מחברים ושקעים" ללא מגע. מאוד יעיל עבור מקרים בהם נדרש להזין ציוד הממוקם בנקודה בלתי נגישה [3]. מתקן שכזה מקנה למערכת כולה היבטי נוחות ועשוי לסייע לבטיחות (לדוגמא ביישומים בהם האווירה נפיצה וקיים חשש מפריצה חשמלית או קצרים) ניתן באמצעות השיטה להרחיב את האמינות של המערכות במקרים בהם הרכיבים נדרשים לעבוד באווירה רטובה (ללא קורוזיה במגעי הפלאגים). דוגמא ליישום הוא מברשות השיניים האלחוטיות אשר נדרשות לעבוד באווירה רטובה לחלוטין וכל ממשק מבוסס כבל חשמל פוגע (בטווח הארוך) בציוד. מיישמים זאת עבור מתקן קוצב לב המוזן באופן אלחוטי ללא החדרת סוללה לתוך הגוף ובכך מרחיקים את הסיכון מפריצה חשמלית או זיהומים [4]. ניתן לספק אנרגיה למספר יעדים בו-זמנית במרחב משותף בעוד שאלמנטים אחרים המצויים באותו המרחב כלל לא יושפעו מהאנרגיה העוברת [4], [6]. כמו כן, בשונה משיטת העברת אנרגיה לטווחים גדולים מאוד אשר מבוססת של שיטת המיקרוגל

(קרן אלקטרומגנטית), שיטת ה RWPT מאפשרת טעינה לרכיב מתואם גם אם לא קיים קו-ראייה בין סליל מקור ויעד (ראה איור 13) וזה מאפשר לבנות מתקנים בהם קיים חופש בהתקנה של הרכיבים.

ניצול השיטה למטרת טעינה של כלי רכב חשמליים מאתגרת עוד יותר את המפתחים ולכך מספר סיבות. ראשית, טעינת כלי הרכב דורשת הספקים גדולים בהרבה מאלו אשר מועברים ביישומים אחרים שהוצגו. ההספק הנדרש בטעינת רכב חשמלי הינו כ- 60-200kW ונדרשת לשמור על ערך נצילות גבוהה. המערכת נדרשת להתמודד עם שינויים בערך מקדם הצימוד אשר נובעים מהמרווח המשתנה שנוצר בין הרכב וסלילי הטעינה הסטטיים וכן המערכת תדע להתמודד עם שינויים במרווחים אשר נוצרים בעקבות סוגי כלי רכב שונים (אוטובוס לעומת רכב פרטי). אתגר נוסף נוצר בעקבות עכבת המוצא המשתנה אשר מתרחשת בעקבות מצב טעינת הסוללה, מצב המערכות המותקנות ברכב, מצב הצריכה ברכב ועוד. כל אלו ישפיעו על תיאום העכבות של המערכת כולה והנצילות. תלות מקדם ההפסד באנרגיה (λ) במכפלת גורם הטיב (Q) ומקדם הצימוד (k) מתוארת בגרף הבא (איור 14). גורם הטיב של מעגל מציין למעשה את יכולת הרכיבים אוגרי האנרגיה (להחזיק באנרגיה) לזמן מסוים ועם מינימום הפסדים הן התנגדותיים (ללא הפסדי חום) והן כאלו הנובעים מקרינה אלקטרומגנטית [17, 100]. גורם הטיב במקרה של מעגל RLC טורי מהווה את היחס בין תדר התהודה ורוחב הפס (הפרש התדרים הנוצר בנקודות מחצית ההספק). ניתן לחשב ערך זה בתלות ברכיבי המעגל כולו ובאופן המתואר בביטוי הבא:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

כפי שניתן לראות בגרף, במטרה להצליח להעביר אנרגיה גבוהה במרחקים גדולים ובנצילות טובה נדרש ערך גבוה במכפלת גורם הטיב במקדם הצימוד (השטח המסומן בירוק; ערכים שבין 10 ל-1000). בצימוד מסוג משוחרר מקדם הצימוד נמוך מאוד ($k \sim 0.02$) על כן, בכדי לקבל צימוד מגנטי בנצילות טובה נדרש גורם טיב גבוה ככלל הניתן [7].



איור 14 - השפעת גורם הטיב (Q) ומקדם הצימוד (k) על הנצילות בצימוד רזוננס.

הנצילות האופטימאלית (בהנחה כי התיאום מושלם ושאינן בזבזים נוספים במערכת כגון הפסדי מיתוג של ספק הכוח) של המערכת תחושב מתוך הביטוי הבא:

$$\mu_{optimal} = \frac{U^2}{(1 + \sqrt{1 + U^2})^2}; U = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (3)$$

כאשר,

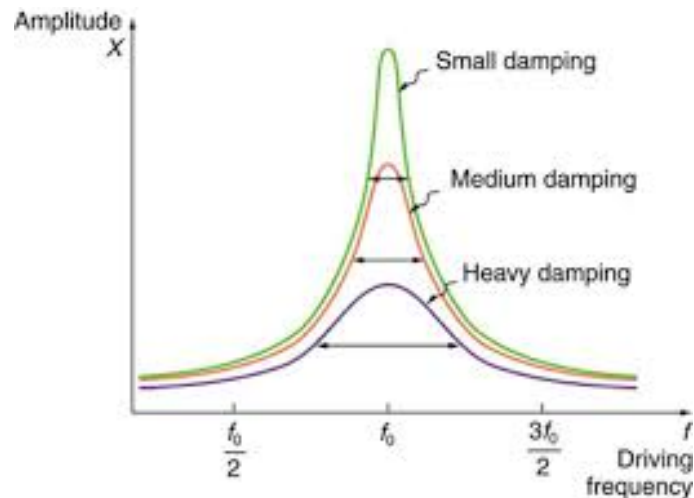
$L[H]$ - השראות הסליל.

$R[\Omega]$ - התנגדות אומית טהורה של הסליל.

$f[Hz]$ - תדירות הזרם בסליל.

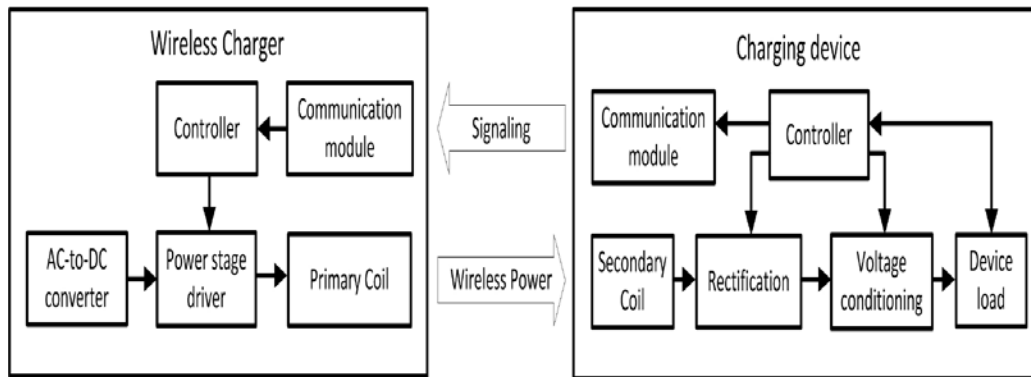
$C[F]$ - קיבול

אופיין מערכת תמסורת טיפוסית הנוצרת בעקבות הפרמטרים של מעגל תהודתי, מוצג באיור 15. ערך התדר בו האופיין מגיע לערך השיא מוגדר כתדר הרזוננס (התהודה) וכפי שצוין קודם לכן בנקודה זו, המקור רואה היגב התנגדותי טהור ונצילות המערכת הכוללת משתפרת. שינוי בערכי הקיבול או ההשראות יגרמו לכך שכל האופיין יוזז בסקלת התדרים (הפעמון מוזז ימינה או שמאלה בתלות בערכי הרכיבים בתמסורת). גורם טיב גבוה משמעו שה"פעמון" של אופיין התמסורת של המעגל צר עד מאוד. אמנם מצב זה רצוי בכדי לקבל נצילות גבוהה, אך קיים קושי לשמור על נקודת עבודה בערך גבוה זה וכל שינוי בפרמטרי המעגל (במקרה של העברת אנרגיה אלחוטית הוא בעיקר מרווח האוויר) יגרום לירידה דרסטית בהספק המוצא. כלומר בעקבות גורם טיב גבוה המערכת תהיה מאוד רגישה לשינויים ונחוץ יהיה להגיב לכל שינוי באופן מתאים ובמהירות [8], [11]. כל שינוי של זה גורם להיסט מסוים בפרמטר ההשראות הכוללת ועד תחום מסוים התגובה תהיה בתצורה של כיוון מחדש של תדר העבודה לתדר המערכת. משמעות דרישה זו חשובה להבנת מנגנון הבקרה הסבוך אשר נדרש לקיום המערכת לטעינה אלחוטית.



איור 15 - אופיין היענות התדר במעגל תהודתי.

מסיבה זו נחוצה מערכת בקרה אשר תדע למדוד את השינויים בפרמטרים החשמליים של המעגל המתואם לבצע תיקון בזמן אמת ותוך כדי עבודה ובכדי לפצות על השינוי שנוצר ולמנוע את הירידה בנצילות [8]. קיים קושי רב בלעשות כן וזאת כיוון ולרב אין קשר גלוני בין צד המקור והיעד ולכן נדרשת כאן טכניקה שונה שתאפשר לקבל את האינפורמציה (ולקרוא את ערכי המשתנים) מצד יחידת המשדר ביחידת הבקרה המרכזית [4]. אחת השיטות שהוצגו מבצעת מדידות ולכן גם תיקונים על סמך פרמטרי מתח זרם במעגל השידור בלבד [3] על ידי כך ניתן למעשה לייצר מצב בו העומס "מדווח" למשדר על מצבו (Signaling) בעוד שזה האחרון משמש רק כ"מאזין". בחלק מהיישומים הוצגה מערכת בה נתוני העומס במעגל המוצא ויחידת הקליטה, מועבר דרך ממשק תקשורת אלחוטית סטנדרטית (כגון: Blue-Tooth או Wi-Fi). דוגמא לממשקים בין רכיבי מערכת טיפוסית מתוארים בסכמת הבלוקים באיור 16. כפי שניתן לראות, מערכת הבקרה מקבלת אינפורמציה מפרמטרי העומס ומדווחת לצד המקור. לאחר מכן, משתנה ערך התדר על פי הנתונים החדשים המתעדכנים כל העת. על ידי כך ניתן לדאוג לתיאום בין היחידות ולשיפור הנצילות [3]. כך יתנהל תהליך המבוסס על "חוג נועל מופע" (PLL) המשמש למקסם את ההספק המועבר לעומס על ידי בקרה על החלק הפנימי [7].



איור 16 - תרשים בלוקים של מערכת העברת אנרגיה בשיטת הרזוננס המגנטי.

לסיכום:

שיטה ההשראית להעברת אנרגיה חשמלית ולטווחים הבינוניים מחייבת תאימות לתדר הרזוננס של המערכת כולה. שיטה זו נלמדת רבות ברחבי העולם במטרה לפתח יכולת לטעון את מרחב היישומים הניידים באופן יעיל (נצילות כללית של מערכת כ- 96 אחוזים [3]) ונוח. תהליך הטעינה האלחוטית עבור רכבים חשמליים עשוי לעודד יותר את השימוש בשיטה זו לנסיעה וליהנות מהיתרונות הרבים והטובים שהיא מציעה. רכב חשמלי בו המותאם לטעינה אלחוטית, לא נזקק להשתמש בכבילה ובמחברים ייעודיים דבר המביא עמו שיפור בנוחות, בבטיחות, ובאסתטיקה ברחובות. הטעינה תעשה במספר רב של מקומות אפשריים (בחניות פרטיות וציבוריות, בתחנות עצירה, בצמתים ואפילו תוך כדי נסיעה) כל זה ללא התערבות הנהג. העוסקים בטכנולוגיה זו מבטיחים יכולת להעביר אנרגיה גדולה יותר מזו אשר מסוגלת מערכת טעינה סטנדרטית לספק דבר אשר יביא קיצור זמני ההטענה. תקני התעשייה והבטיחות בנושא זה נמצאים עדיין בשלב קביעת ההגדרות (קביעת תדירות, הספק ויכולת פעולה הדדית). התקנים הקיימים היום נכתבו בעיקר על ידי יצרנים ובתחום ההספקים הנמוכים (0-5W) כגון אלו הנועדו לטעינת סמארטפונים (כגון: WPC, PMA, A4WP). יתכן כי בעתיד הלא רחוק ישולבו במרחב האורבני מערכות טעינה כמו אלו אשר תוארו כאן.

מקורות:

- [1] D. V. a. J. Sampath, "Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs)—Present and Future Trends," Springer Science+Business Media, Singapore, 2015.
- [2] IEA, "Global EV Outlook 2017, Two million and counting," Clean Energy Ministerial, 2017.
- [3] A. Brecher and D. Arthur, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications," Federal Transit Administration, 2014.
- [4] G. Navapara and K. M. PATEL, "Wireless Power Transfer," Researchgate, 2015.

- [5] T. Beh, T. I. Masaki Kato and Y. Hori, "Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at Fixed Resonance Frequency," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 744- 753, 2010.
- [6] J. L. ., W. H. X. G. Bin Zhu, "Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission," *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, Vols. Vol.8, No.3 (2015),, pp. 257-272, 2015.
- [7] M. Eghtesadi, "Inductive power transfer to an electric vehicle-analytical model," *Technology, Inc.*, CH2846-4/W/0000-01\$010. 00 ' 1990 IEEE Palo Alto California 1990.
- [8] S. D. Barman, A. W. R. Reza, N. Kumar and M. Karim, "Wireless Powering by magnetic resonant coupling: Recent Trendes in Wireless Power Transfer system and its applications," Elsevier, 2015.
- [9] D. A. G. Pedder, A. D. Brown and J. A. Skinner, "A Contactless Electrical Energy Transmission System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, 1999.
- [10] D. A. Brecher and M. David, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications," Department of Transportation Volpe National Transportation Systems Center, P.E. U. S., 2014.
- [11] B. Griffin and C. Detweiler, "Resonant Wireless Power Transfer to Ground Sensors from a UAV".