

Journal of Cellular Biochemistry 51:387-393

האפקט המטיב של שדות אלקטרומגנטיים

C. Andrew L. Bassett

Bioelectric Research Center, Columbia University, Riverdale,

New York 10463

תקציר: שימוש בשדות מגנטיים רוטטים בעלי עוצמה נמוכה המשנים את הקונפיגורציה המרחבית שלהם עם הזמן (Pulsed ElectroMagnetic Field — PEMF) מוסיף ממד חדש, רב הבטחה למדעי החיים ורפואה. שדות אלו, המעוצבים לחכות שדות חשמליים הנוצרים ברקמות החיבור באופן טבעי בזמן פעילות פיזית שגרתית, הוכחו ככלי מוצלח לטיפול במגוון רחב של הפרעות אורתופדיות ונורולוגיות במשך שני העשורים האחרונים. מצבם של יותר מרבע מיליון מטופלים ברחבי העולם שסבלו משברים קשי איחוי שופר באמצעות השיטה הלא פולשנית הזו. כלומר ללא סיכון, אי-הנוחות, או עלויות הכרוכות בהתערבות כירורגית. היום אנחנו מזהים חלק מהתהליכים המעורבים בהשפעה התרפויטית של PEMF ברמה תאית ואפילו תת-תאית. תפיסת היעילות של PEMF נתמכת על ידי הבנות ביוכימיות אלו וכן על ידי ניסויים כפולי-סמיות. ככל שעולה רמת הבנתנו של המנגנונים המעורבים, כך עולה היכולת שלנו להתאים את הטיפול למצבים ספציפיים ומתרחבת רשימת ההפרעות בהן אפשר לטפל. הרשימה הנוכחית כוללת רגנרציה של עצבים, איחוי פצעים, טיפול בדחיית שתלים, סכרת, התקפי לב, ושבצים. ממצאים מוקדמים גם מרמזים על אפשרויות הטיפול בגידולים סרטניים.

מילות מפתח: PEMF, הפרעות תפקוד, שלד-שרירים, רקמות חיבור, שדות מגנטיים, תפקוד תאי.

בימים אלו מתרחשת מהפכה ביכולתנו לשלוט על היבטים ספציפיים של תפקוד תאי באמצעים פיזיקליים מדויקים. מהפכה זו מגיעה הרבה מעבר למנגנונים המוכרים משכבר שמערכות ביולוגיות פיתחו כדי להקל על תרגום של סוגים מסוימים של אנרגיה לפעילות תפקודית כגון ראייה (תגובות פוטוכימיות) ופוטנציאלי פעולה בעצבים ושרירים. בעשרים שנה האחרונות גילינו ששדות חשמליים חלשים (הלא גורמים ליוניזציה) יכולים להפעיל מגוון נרחב של פעולות ללא שינוי טמפרטורת הרקמה (athermal) בתנאי שקיימת התאמה בין תכונות השדה המעוצב לתכונות רקמת המטרה הביולוגית. כתוצאה מכך, מתקיימים בימים אלו מחקרים רבים ומגוונים להגדרת מאפיינים חשמליים של מולקולות ותגובות ביוכימיות. במקביל, מתפתחת גישה חדשנית לטיפול רפואיים המבוססת על שימוש בשדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה (ELF) חיצוניים כדי למתן או לשנות פעילות תאית לא רצויה.

התפתחויות אלו הושפעו, קודם כל, מהצלחה קלינית של השימוש בשדות אלקטרומגנטיים משתנים כדי לטפל בסדקי עצמות קשי איחוי [Bassett, 1989; Bassett et al., 1974a]. שנתיים לאחר מכן [Bawin and Adey, 1976], דווח ששדות מגנטיים משתנים משפיעים על זרמי סידן ברקמות. זמן קצר לאחר מכן, פורסמו דיווחים אפידמיולוגיים המקשרים בין סוגים מסוימים של מחלת הסרטן וקווי חשמל המאופיינים בתדירות של 60 הרץ [Wertheimer and Leeper, 1979]. ממצאים כגון אלו משנות ה-70, עוררו עניין במנגנונים ביולוגיים האחראיים לאפקטים ביו-אלקטרומגנטיים מכל הסוגים.

ב-15 שנה שלאחר מכן התרחשה התקדמות אמיתית בהגדרת מנגנונים תאיים ותת-תאיים המושפעים כאשר מערכות ביולוגיות נחשפות לשדות ELF מגנטיים.

לאחרונה דווחו השפעות מהרמה של האורגניזם השלם [Reiter et al., 1992] ועד הרמה המולקולרית [Blank and Soo, 1992].

ההגבלות על גודל המאמר הנוכחי, המתרכז ביישומים הקליניים של שדות ELF, לא מאפשרות לפרט את כל הדוגמאות המתועדות של תגובות התאיות ותת-תאיות לשדות ELF. מגוון התגובות האלו תועדו במקומות אחרים, ולאחרונה, כרשימות של הקונגרס העולמי הראשון בנושא ELF ו-PEMF [Bassett, 1989; Blank, 1992]. טווח התגובות האפשריות משתרע משינויים בריכוזי סידן תוך תאיים לשינויים בקצב הביוסינטזה ופירוק חומרים. דווח על שינויים בעלי ספציפיות גבוהה בשעתוק ותרגום DNA בהשראת השינויים בשדה האלקטרומגנטי (כגון תדירות, צורת הפעימה, ואוריינטציה מרחבית של השדה) [Goodman and Henderson, 1991]. ממצאים אלו ואחרים מרמזים שקיימים "חלונות" ושערי הסף עבור תגובות ביולוגיות לשדות אלקטרומגנטיים שעבורם כללי המינון הקלסים לא רלוונטיים. מעבר לכך, מצטברים הנתונים המצביעים על העובדה שיכולה להיות אינטראקציה ישירה בין השדה לגן ללא מפל תגובות שליח ביוכימיות המופעלות על ממברנת התא או ציטופלסמה [Goodman et al., 1991]. במילים אחרות, כרומוזומים מבודדים ללא מעטפת ממברנה תאית או גרעינית גם מגיבים לשדות אלקטרומגנטיים. הזהות המדויקת של מנגנונים האחראיים לתגובות אלו לא ידועה כרגע, אבל יתכן שמדובר בתגובות תהודה תלויים במטענים חשמליים המצויים באתרים ספציפיים על ה-DNA [Bassett, 1993; Hinsenkamp et al., 1978].

דפוסי התגובה הביולוגית לשדות חשמליים תלויים לא רק בסוג התא, מצב ההפעלה שלו, וסביבתו אלה גם בתכונות השדה המגנטי. בגין מצב מורכב זה, רצוי לפרט בתיאור את השלבים שהובילו לניסוח השיטות הטיפוליות הזו. שיטות אלו פותחו במשך 20 שנות במחקר אינטנסיבי שמטרתו הייתה מציאת הסבר לרגישות

גבוה של תאי העצם לכוחות מכניים [Bassett and Becker, 1962; Bassett,]
[1971, 1989]. מסת העצם וארגונו המרחבי משקפים התאמה לנשיאת עומס כל כך
מדויקת שניתן להשתמש בעקרונות הנדסיים כדי לתכנן מבנים אלו. פעילות תאית
המוסיפה או מסירה רקמת עצם במקומות נבחרים מופעלת על ידי איתות חשמלי.
מאידך, עצם או רקמות מבניות אחרות העוברות עוות מכני מייצרות שדות חשמליים
בהתאם לתכונות פיוזואלקטריות (piezoelectric), דיאלקטריות, או אלקטרו-
קינטיות שלהן [Bassett, 1971, 1989]. האמפליטודה ותדירות של הגלים
החשמליים הנוצרים ברקמה משקפים את המהירות ועוצמת העיוות. המתחים הם
בין $10 \mu\text{V}$ ל- 1 mV לס"מ ותדירויות הן $1 - 100$, או יותר, הרץ.

שדות חשמליים שהמאפיינים שלהם נופלים בטווחים אלו משפיעים על
תפקוד תאי העצם (ותאים אחרים), אם מקורם הוא פנימי — מזרמים חשמליים
בתוך הגוף, או חיצוני משדות שעוצבו במיוחד כדי להשפיע על תפקוד ביולוגי
[McLeod and Rubin, 1990]. התא לא מבחין בין שדות ממקורות שונים אלה
רק בתוכן ה"אינפורמטיבי" שלהם. שדות ELF יכולים למנוע איבוד רקמת עצם
בכל מיני מצבים כגון אימוביליזציה, ריתוק למיטה, ומצבי חוסר משקל בזמן הטיסה
בחלל בהם נמנע העיוות המכני הגורם ליצירת שדות חשמליים מקומיים החיוניים
לתפקוד תאים עצם נורמלי [Bassett et al., 1979].

שדות מגנטיים דינמיים עוצבו לחקות את דפוסי המתחים המשמשים באופן
טבעי לתקשורת עם תאי עצם בגוף וליצר תוצאות דומות על ידי צימוד אינדוקטיבי.
נתונים ספציפיים מפורטים במקומות אחרים [Bassett, 1989; Bassett et al.,]
[1974b]. די באמירה שהמונח "שדות מגנטיים רוטטים בעלי עוצמה נמוכה
(PEMFs)" נוסח כדי להגדיר את השדות האלו באופן ייחודי בתוך הספקטרום
האלקטרומגנטי הכולל. לדוגמה, ב-20 שנה מאז השימוש הקליני הראשון ב-

PEMFs, נתגלה מגוון רחב של שדות אלקטרומגנטיים אחרים היכולים להשפיע על פעילות ביולוגית. שדות אלו נבדלים הבדלים מרחקי לכת במאפיינים שלהם למרות שנראה שזה השדה החשמלי המושרה ולא השדה המגנטי שמשפיע על התהליכים הביולוגיים. מאידך, כאשר התהליכים נבחנו ביותר פירוט (בשיטות כמו התמרת פורייה מהירה) התברר שקיימים תכונות המשותפות לרובם בטווחי התדירויות והתפלגות העוצמות בטווחים אלו [Bassett, 1989, 1993; Pilla, 1992; Stuchly, 1990].

עקב העובדה שהתכונות האנרגטיות של השדות המשמשים לטיפול מתחילים לגלוש לתחומים המוגדרים כגורמי סיכון סביבתי. הפסקנו לראות את עוצמת השדה כגורם מכריע להשפעה טיפולית והתחלנו להתרכז בטווחי התדירויות התפלגותן בטווחים אלו [Wilson et al., 1992]. יתרה מכך, מסתבר שתכונות החשמליות הפסיביות של הרקמות השונים גורמים לשינויים בגלי המתח המושרים. במילים אחרות, דפוסי התדירות ומתח המגיעים לתאי המטרה השוכנים ברקמות שונות יכולים להיות מאוד שונים זה מזה למרות שאותו PEMFs מופעל עליהם. כלומר, "עיבוד נתונים" על ידי הרקמה יכול לגרום לשינויים מרחיקי לכת בתדירות התגובות הגורם לשדות המפעילים להיראות כאלו עברו סינון חשמלי [Bassett, 1989].

מנקודת מבט מעשית, מכשיר הטיפול בשיטת ה-PEMFs בנוי ממחולל שדות משתנים נייד המופעל על ידי סוללה וסליל תיל שממקמים אותו מעל האזור המטופל בגוף. שיטת הטיפול מאושרת, בארה"ב, על ידי הרשות הפדרלית לתרופות, FDA, מאז 1979. הזרם העובר בתוך הסליל משרה שדה מגנטי באזור המטופל ושדה מגנטי זה משרה זרם חשמלי בעל המאפיינים הרצויים בחלק הגוף המטופל. עם מכשירים קליניים מודרניים לא רואים שום אפקטים לא רצויים בתאים ורקמות נורמליים. מאידך, תהליכים פתולוגיים מסוימים מושפעים לטובה על ידי "המסג'

החשמלי" עם המאפיינים של ה-PEMFs ותנאי החשיפה מתאימים. זמני טיפול נעים בין 20 דקות ו-10 שעות, תלוי בסוג המחלה ומאפייני השדה המופעל. עבור מאפייני ה-PEMFs המאושרים לשימוש לא דווח על שום תופעות לווי לא רצויות או אי נוחות. היות וטיפול עובד ללא אשפוז וניתוח, מחירו נמוך בהרבה ממחירים של שיטות טיפול אחרות במחלות העצם.

בעשרים שנה שעברו מאז השימוש הראשון של PEMF לטיפול בחולים עם שברים קשי איחוי, יותר מ-300,000 חולים ברחבי העולם טופלו בשיטה זו. בארה"ב שימוש קליני מוגבל על ידי ה-FDA לטיפול בשברים קשי איחוי, כשל באיחוי פרקים, מחלת אי חיבור מולד (pseudarthrosis) וכדומה. בארצות אחרים השיטה משמשת למגוון יותר רחב של טיפולים — המבוסס בעיקר על ניסויים קליניים שבוצעו בארה"ב, אך עדיין לא זכו לאישור ה-FDA, אך יזכו, כפי הנראה בעתיד. מבחינת אחוזי ההצלחה התוצאות בשברים קשי איחוי דומים לאלו של הטיפול הניתוחי [Gossling et al., 1992]. קיימות מחלות שעבורם השימוש ב-PEMF הוא שיטת הריפוי המוצלחת היחידה המוכרת היום [Bassett, 1989,] [1993].

טבלה I מביא את רשימת הבעיות הרפואיות בהן השימוש הקליני ב-PEMFs זכה בהצלחה. כל הבעיות הם בתחום מערכת התנועה או מערכות נוספות. היעילות הקלינית בכל המקרים הוגדרה על ידי ניסויים קליניים מבוקרים עם מעקב לאורך זמן וניסויים כפולי-סמיות. כפי שניתן לראות בטבלה II, מנגנוני הפעולה של PEMF תואמים את הפתולוגיות אותה הם באים לתקן. חלק גדול מהמנגנונים האלו פוענחו ב-15 השנים האחרונות על ידי ניסויים בתרביות רקמה ובבעלי חיים. חרף הסיבוכים הכרוכים בתכנון ניסויים ביו-אלקטרומגנטיים שאפשר לחזור עליהם, קיימים יותר מאלף דוחות על ניסויים כאלו שבוצעו תחת תנאים מבוקרים תוך

הקפדה על כל כללי המחקר המדעי. למעשה, ניתן להגיד שאנחנו מבינים את האפקטים הביולוגיים של PEMF לפחות באותה רמה כפי שאנחנו מבינים את האפקטים הביולוגיים של אספירין.

ניתן לומר שבשום תחום אחר של מחקר ביו-רפואי קיימים אותם אילוצים לשיתוף פעולה בין-דיסציפלינרי מדויק ומדוקדק כמו בתחום המחקרים בביו-אלקטרומגנטי. תחומי הידע הנדרש המשפיע על תכנון ניסויים וניתוח התוצאות כוללים פיזיקה, הנדסה, מדעי החיים, ביוכימיה, פיזיולוגיה, גנטיקה, ורפואה. קל מאוד עבור הביולוגים — שאין להם הבנה מפורטת ומדוקדקת של המורכבות של יחסי הגומלין בין שדות אלקטרומגנטיים והרקמות החיות, לשגות בתכנון ניסוי מבוקר או בניתוח התוצאות של ניסוי כזה. מאידך, מהנדסים ופיזיקאים לא קולטים את המורכבות האמתית של מערכות ביולוגיות ומנסים להתאים את המערכות האלו למשוואות הסטנדרטיות של תחום ההשכלה שלהם. טבלה III מונה חלק מהבעיות בהן נתקלים פיזיקאים או ביולוגים המתכננים ניסויים ביו-אלקטרומגנטיים. אלו ביננו ששואפים לחקור מערכות ביולוגיות חייבים לפתח גישה יותר כוללת, ובפרט חייבים להכיר בעובדה שלשדות מגנטיים חלשים המשתנים עם הזמן יכולה להיות השפעה הרבה יותר רחבה על מערכות ביולוגיות ממה שמקובל היום.

טבלה I. מחלות שניתנות לטיפול ב-PEMF*

מחלה	מאושר FDA	מחקר מבוקר	תקופת טיפול	אחוז הצלחה
אי אחוי שברים	כן	מעקב לאורך זמן וכפל-סמוי	3 – 6 חודש	75 – 95% ^a
אי אחוי מפרקים	כן	מעקב לאורך זמן	3 – 6 חודש	85 – 90% ^a
איחוי עמוד השדרה	כן	מעקב לאורך זמן וכפל-סמוי	3 – 6 חודש	90 – 95%

70 – 80% ^b	12 – 6 חודש	מעקב לאורך זמן	כן	אי חיבור מולד
80 – 100% ^b	12 – 6 חודש	מעקב לאורך זמן	כן	נמק העצם (ירך)
85 – 90%	9 – 3 חודש	מעקב לאורך זמן	לא	אוסטאוכונדריטיס דיסקנס
85 – 90%	כל החיים	מעקב לאורך זמן	כן	אוסטאופורוזיס
–	כל החיים	מעקב לאורך זמן	לא	פרכת
85 – 90%	4 – 3 חודש	כפל-סמוי	כן	דלקת גיד כרונית
85 – 90%	3 חודש	כפל-סמוי	לא	כיבי עור כרוניים

* תוצאות בפרכת (osteogenesis imperfecta) הן ירידה ניכרת בקצב היווצרות השברים כתוצאה מ-PEMF
^a קצב ההחלמה תלוי במיקום השבר ויעילות קביעתו.
^b תלוי בחומרת המצב

טבלה II מנגנון פעולה של PEMF*

מחלה	פתולוגיה	אפקט ה-PEMF
אי אחוי שברים	רקמה רכה בתוך הסדק כשל השקעת סידן, בניית העצם, וסקולריזציה	מינרליזציה, אנגיוגנזה, יצור קולגן + GAG, והתהוות עצם
אי אחוי פרקים	כאמור לעיל	כאמור לעיל
אי חיבור מולד	כאמור לעיל + מחסור באוסטאוקלסטים	כאמור לעיל + אוסטאוקלסטים
איחוי עמוד השדרה	שתלי עצם לא נקלטים	אנגיוגנזה ובניית עצם
נמק העצם	עצם מת, אוסטאוקלסטים מהיר	אנגיוגנזה, בניית עצם, ופעילות אוסטאובלסטית, אוסטאוקלסטים ^a
אוסטאופורוזיס	סילוק ובניית עצם	פעילות אוסטאובלסטית

פעילות אוסטאובלסטית ^b	עצמות דקות (תורשתי)	פרכת
T יצור קולגן + GAG	קולגן פגום	דלקת גיד כרונית
T אנגיוגנזה, GAG + T יצור קולגן	הספקת דם פגומה	כיבי עור כרוניים

* הרבה מהאפקטים נובעים מיצור מוגבר של הורמוני גדילה ומיטוגנים.
^a ירידה באוסטאוקלסיס מוליכה לירידה בפעילות אנזים מפרק הקולגן וירידה ברגישות של הקולטנים הספציפיים להורמון הפאראתירואיד.
^b הכשל המטבולי לא מתוקן אבל יותר עצם = פחות שברים.
 בפרט, היות והיום אנחנו חיים בסביבה הרוויה בגלים אלקטרומגנטיים, ראוי לשאול כמה מהניסויים שבוצעו עד היום היו באמת חופשיים מהשפעות אלקטרומגנטיות חיצוניות שהפריעו למהלך הניסוי. עבור המקרים בהם השתמשו במיגון מגנטי יעיל (כלומר אפס השפעות לא מבוקרות) מקבלים תוצאות המרמזות שקיימות פונקציות תאיות המתפקדות בצורה שונה בהחלט כאשר התאים מבודדים משדות מגנטיים סביבתיים [Bassett, 1989; Dubrov, 1978]. נכון לעכשיו, מספר שיטות טיפול חשובות מחכות להכללה בין השיטות הקליניות. חלק מהיותר חשובות מתוארות בטבלה IV.

טבלה III. גורמים המשפיעים על תגובות ביו-אלקטרומגנטיות

גורמים פיזיקליים	גורמים ביולוגיים
A. שדה מפעיל	A. תאים
1. עוצמת השדה	1. גודל וצורה
2. אחידות השדה (E לעומת B)	2. צפיפות (מגע בין
3. ווקטורים (Ba ו-Bdd)	תאים)
4. מאפייני ההשתנות עם הזמן	3. צמתות (בין תאים)
א. מחזוריות ורצף	4. מצב אקטיבציה
ב. צורת הפעימה (סימטריה)	א. מתחלק
ג. זמני עליה וירידה	ב. נח
ד. תוכן התדירות	ג. פעיל מטבולית
ה. מתחי מעבר	ד. מצב דיורנציאציה
B. שדות סביבתיים	ה. אמבריוני/סנסצנטי
1. גאומגנטי	ו. תא נודד
2. שדות מתחלפים (מנוע חשמל	5. רמת חשיפה
...)	א. שלב במחזור התא
3. מיקרוסקופים אלקטרוניים	ב. זמן חשיפה
ESR, NMR	ג. רציף או מקוטע
4. קווי חשמל	ד. כיוון יחסית לשדות
5. מכשירי מיקרוגל	E ו-B
6. מעצורי דלת מגנטיים	B. רקמה
7. מתחים אלקטרוסטטיים	1. סוג הרקמה
C. שדות חשמל ביולוגיים	2. מבנה מיקרוסקופי
1. מטענים על ממברנות	3. כיוון יחסית לשדות
ביולוגיות בתנועה	E ו-B
2. פוטנציאלי (potentials)	4. הידרציה
פעולה	5. אופי המטענים
3. הבדלי פוטנציאל משני צדי	6. ניידות החלקיקים
הממברנה	הטעונים
4. פוטנציאלי פציעה	7. דעיכת המטען
5. פוטנציאלי התפתחות	C. בעל חיים
6. פוטנציאלי עקה (stress)	1. גודל

2. כיוון יחסית לשדות B	א. פיאזואלקטריים
E-ו	(Piezoelectric)
א. אקראית	ב. אלקטרו-קינטיים
ב. מועדפת	7. שדות ביו-מגנטיים מושרים
ג. מקובעת	D. תכונות חשמליות פסיביות
3. מקומי\מערכת	1. מצב מוצק (ישור\תיקון)
א. מלטונין	2. פרואלקטרי
ב. גלוקוקורטיקואידים	(Ferroelectric)
4. "דו-שיח"	3. אלקטרטס (חומרים
א. סיכוך	דיאלקטריים)
ב. מרחק	4. קבלים\עכבה חשמלית
5. גורמי עקה	5. תכונות דיאלקטריות
א. תנודה\רטט	6. מגנטיט (מינרל מגנטי)
ב. אלקטרוסטטי	
ג. ריסון	

טבלה IV ממצאים ניסיוניים התומכים בטיפול PEMF

ממצאים ניסיוניים	מחלה
1. אוטם שריר הלב (התקף ניסויים בבעלי חיים מראים ירידה בגודל לב) האוטם, (השפעות חיוביות בזרימת דם	

ואנגימגנזה) השפעות על פעילות סופראוקסיד דיסמוטז (superoxide dismutase) ומאזן חמצן דו-חנקני	
כאמור לעיל	2. שבץ מוחי
מחקרים ירידה בגידול ופולשנות של סרקומה בעכברי BalbC כימוס ושינויים גרעיניים	3. סרטן
מחקרים מראים ירידה באיבוד סידן, גידול עצם מוגבר שקעי שיניים עקורות ושיפורים בפלורה החיידקית של הפה	4. בעיות שיניים וחלל הפה
שיפור קליני ברמת הגלוקוז בדם שכנראה נובע מהשפעות Ca^{++} על הפרשת אדרנלין	5. סכרת מבוגרים
הובלת אותות באקסונים, סינתזת חלבונים במע. עצבים, שינויים בזרמי Ca^{++} ונוירורנסמיטר בסינפסות ואנגיאוגנזה	6. נוירופתיה סוכרתית
ניסויים מראים עליה בסינתזת קולגן ו-GAG, ועליה באנגיאוגנזה	7. רצועות וגידים
ניסויים מראים עליה בסינתזת חלבונים, נדידת אקסונים, ושיפורים בתפקוד	8. פגיעות במערכת עצבים היקפית
אין ממצאים ישירים, אבל ממצאים בהקשר של נוירופתיה ומערכת עצבים היקפית מרמזים על יתרונות טיפוליים אפשריים. במיוחד בפגיעות מחיצה שאינן חמורות כמו הניתוק המוחלט	9. פגיעה בעוד השדרה

לא רצוי שהקורא יסיק ממגוון הרחב של התוצאות המפורטות בטבלה IV ש-PEMFs הם תרופת פלא — אין תרופות פלא. שיטת הטיפול המבוססת על PEMFs עדיין חייבת להתגבר על מכלול מכשולים. כגון קביעת מאפייני השדה האופטימליים לטיפול בכול סוג של מצב פתולוגי. במצב הנוכחי אנחנו ברי המזל ששדות שבחרנו בהן כשהתחלנו לחקור שימושים תראפויטיים של PEMFs התגלו כבעלי השפעות נרחבות כאלו. אחד הסיבות לטווח טיפולי רחב הוא שחלק

מהתופעות חולקים מנגנונים פיזיולוגיים וביוכימיים שעידוד פעולתן מוביל לשיפורים קליניים. כמו כן, אפשר לשער שלאינטראקציות בין התכונות חשמליות של הרקמה ו-PEMFs יכולות להיות תוצאות מרחיקות לכת.

למירב הצער, הממצאים התומכים בהרחבת טווח המצבים הפתולוגיים המטופלים ב-PEMFs כמעט ולא ידועים מחוץ חוג האנשים העוסקים בתחום מחקר זה. ניתן יהיה לשפר מצב זה רק באמצעות מאמץ חינוכי כגון סידרת מאמרים בכתב עת זה. יש לקוות שמאמצים כגון המאמץ הנוכחי ימשכו את תשומת לב של חוקרים והרופאים שנכון לעכשיו מתרכזים בענפים יותר מסורתיים של ביולוגיה ורפואה. התוצאות האפשריות לרופאים והמטופלים שלהם הן, פוטנציאלית, עצומות. לדוגמה, ממצאים ראשוניים מרמזים ששיטות ביו-אלקטרומגנטיות יכולות להשפיע לטובה על סוגים מסוימים של סרטן [Bassett, 1989].

הממצאים בביו-אלקטרומגנטיות מרמזים שניתן יהיה לשלוט בתפקוד תאי באמצעים פיזיקליים — אפשרות שיש לה השלכות נרחבות במדעי החיים ורפואה. חרף העובדה שממצאים רבים התומכים בנקודת ראות זו נגזרים ישירות מיחסי הגומלין בין תאים ושדות אנרגיה, אין לשלול את האפשרות שבעתיד ניתן יהיה לעודד או לעקב פעילות של תרופות, הורמונים, וגורמי-גדילה באמצעות שדות אנרגיה. למעשה, כבר קיימות ראיות להשפעת שדות PEMFs על הפעילות של חוסמי תעלות Ca^{++} , הורמון הפאראתירואיד, ונוגדנים [Bassett, 1989,] 1993].

סקירה זו התרכזה באפקטים הלא משפיעים על טמפרטורת הרקמה של שדות אלקטרומגנטיים חלשים שהוכיחו את יעילותם ברפואה טיפולית. אפקטים חשובים אחרים, גם הם לא משפיעים על טמפרטורת הרקמה, נתגלו בניסויים עם שדות יותר חזקים. לדוגמה, שימוש בעוצמות גבוהות תוך פרופיל השינוי עם הזמן (dB/dt)

יכול לעורר פעולה בעצבים ושרירים על ידי שדות חיצוניים. טכנולוגיה לא חודרנית זו הוסיפה ממדים חדשים ליכולות אבחוניות וטיפוליות ברפואה [Stuchly, 1990]. האלקטרופורציה המאפשרת שינויים בחזירות ממברנות תאיות יכולה לשמש למעבר תרופות דרך העור ויצור ריכוזים מקומיים גבוהים [Weaver, 1992]. למירב הצער, מחקרים העוסקים בתפקוד התא מתעלמים לרוב ממרכיב החשמלי של תפקוד התא [DeLoof, 1986]. עד אשר יתחילו לקחת את המרכיב החשמלי בצורה רצינית בכל המחקרים מסוג זה, הרבה מההיבטים התפקודיים של מערכות ביולוגיות יישארו בגדר תעלומה. כפי שאמר כימאי בלגי מפורסם Ernest Solvay במאה ה-19, "תופעת החיים יכולה וצריכה לקבל הסבר אך ורק במונחים של כוחות פיזיקליים השולטים ביקום, ובין הכוחות האלו החשמל הוא אחד העיקריים" [Solvay, 1894]. אנחנו בקושי גירדנו את שטח הפנים של ביו-אלקטרומגנטיזם ונראה שאוצרות עצומים מתחבאים שם.

מקורות

- Bassett CAL (1971): Biophysical principles affecting bone structure. In Bourne G (ed): "Biochemistry and Physiology of Bone." New York: Academic Press, pp 1-76.
- Bassett CAL (1989): Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields (PEMFs). Crit Rev Biomed Engineering 17:451-529.
- Bassett CAL (1993): Therapeutic uses of electric and magnetic fields in orthopaedics. In Carpenter DO (ed): "Biological Effects of Electric and Magnetic Fields." New York: Academic Press.
- Bassett CAL, Becker RO (1962): Generation of electric potentials in bone in response to mechanical stress. Science 137:1063-1064.
- Bassett CAL, Pawluk RJ, et al (1974a): Augmentation of bone repair by inductively-coupled electromagnetic fields. Science 184:575-577.
- Bassett CAL, Pawluk RJ, et al (1974b): Acceleration of fracture repair by electromagnetic fields (A surgically non-invasive method). Ann N Y Acad Sci 238:242-262.
- Bassett LS, Tzitzikalakis G, et al. (1979): Prevention of disuse osteoporosis in the rat by means of pulsing electromagnetic fields. In Brighton CT, Black J, Pollack SR (eds): "Electrical Properties of Bone and Cartilage: Experimental Effects and Clinical applications." New York: Grune and Stratton, pp 311-331.

- Bawin SM, Adey WR (1976): Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency. *Proc Natl Acad Sci USA* 73:1999-2003.
- Blank M (ed) (1992): "Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine." San Francisco: San Francisco Press.
- Blank M, Soo L (1992): Na,K-ATPase activity as a model for the effects of electromagnetic fields on cells. In Blank M (ed): *Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco: San Francisco Press.
- DeLoof A (1986): The electrical dimension of cells: The cell as a miniature electrophoresis chamber. *Internat Rev Cytol* 104:251-352.
- Dubrov AP (1978): "The Geomagnetic Field and Life." New York: Plenum Press.
- Goodman EM, Greenbaum B, et al. (1991): Altered protein synthesis in a cell-free system exposed to a pulsed magnetic field. *Trans Bioelectromag Soc* 13:26.
- Goodman R, Henderson AS (1991): Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem Bioenerget* 25:335-355.

- Gossling HR, Bernstein RA, et al. (1992): Treatment of ununited tibia) fractures: A comparison of surgery and pulsed electromagnetic fields (PEMFs). *Orthopaedics* 15: 711-719.
- Hisenkamp M, Chiabrera A, et al. (1978): Cell behavior and DNA modifications in pulsing electromagnetic fields. *Acta Orthop Belg* 44:636-650.
- McLeod KJ, Rubin CT (1990): Frequency specific modulation of bone adaptations by induced electric fields. *J Theoret Biol* 145:385-396.
- Pilla AA (1992): State of the art in electromagnetic therapeutics. *Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco: San Francisco Press (in press).
- Pilla AA, Figueiredo M, et al. (1992a): Broadband EMF acceleration of bone repair in a rabbit model is independent of magnetic component. In Blank M (ed): *Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco: San Francisco Press.
- Pilla AA, Nasser PR, et al. (1992b): On the sensitivity of cells and tissues to therapeutic and environmental electromagnetic fields. *Bioelectrochem Bioenerget* (in press).
- Reiter RJ, Yaga K, et al. (1992): Parametric and mechanistic studies on the perturbation of the circadian melatonin rhythm by magnetic field exposure. In Blank M (ed): *Proc First World Congress for*

Electricity and Magnetism in Biology and Medicine 5. San Francisco: San Francisco Press.

Solway E (1894): "Du role d'electricite dans les phenomenes de la vie animale." Brussels: Hayez.

Stuchly MA (1990): Applications of time-varying magnetic fields in medicine. *CRC Crit Rev Biomed Engineering* 18:89-124.

Weaver JC (1992): Electroporation: A dramatic, non-thermal electric field phenomenon. In Blank M (ed): *Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco: San Francisco Press.

Wertheimer N, Leeper E (1979): Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am Epidemiol* 109:273-284.

Wilson BW, Davis KA, et al. (1992): Spectral analysis of currents in electric blankets used in human neuroendocrine studies. In Blank M (ed): *Proc First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco: San Francisco.