

שיטות דימות בשירות הרפואה: הרב הנסתר מן הגלוי?

רעות אבני

דימות רפואי הוא ענף במדע המשתמש בקרינה אלקטרומגנטית, גלי קול או רדיואקטיביות על מנת לבצע אומדן לרקמות הגוף השונות חלק משיטות הדימות יהיו אולי בעתיד פחות פולשניות ויאפשרו איבחון מדויק יותר.

רקע

דימות רפואי הוא ענף במדע המשתמש ב**קרינה אלקטרומגנטית**, **גלי קול** או **רדיואקטיביות** על מנת לבצע אומדן לרקמות הגוף השונות.

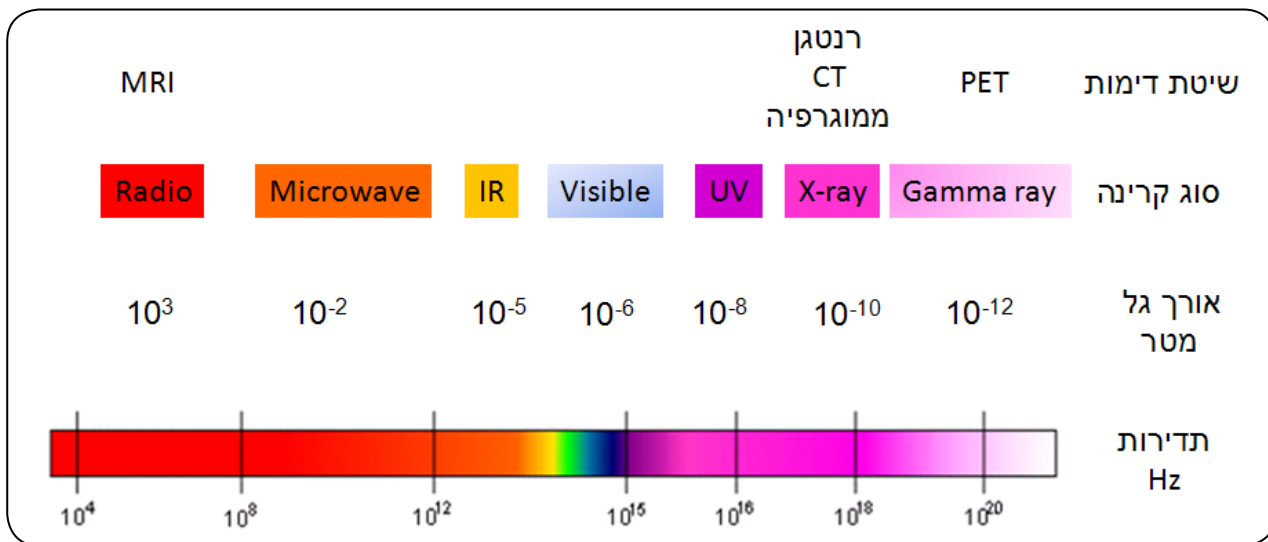
קרינה אלקטרומגנטית היא הפרעה מחזורית הרמונית בשדה החשמלי והמגנטי המתפשטת במרחב. למעשה, ניתן להתייחס אליה כאל גל, ולכן יש לה מאפיינים של תדירות ואורך (ראו את סקלת הקרינה האלקטרומגנטית באיור). אנו משתמשים באור על מנת לראות, אך האור הנראה הוא רק חלק קטן מהספקטרום הרחב של הקרינה האלקטרומגנטית, והוא עצמו אינו מאפשר לנו לראות אל תוך הגוף (הטווח של **האור הנראה** הוא מסגול - 390 ננומטר, עד אדום - 750 ננומטר). על מנת להתבונן פנימה אל תוך הגוף יש צורך להשתמש באזורים אחרים בספקטרום של הקרינה האלקטרומגנטית או בגלי קול. קרינה הנחשבת מסוכנת היא זו שלגלים האלקטרומגנטיים שלה יש תדירות גבוהה יותר, ולכן גם אנרגיה גבוהה המסוגלת ל"קרוע" אלקטרונים מתוך מולקולות. הקרינה הזו נקראת **קרינה מייננת**, ותחומה הוא באורכי גל הקצרים מעל סגול (Ultra Violet), החל מ-150 ננו-מטר ומטה. הנזק הפוטנציאלי הכרוך בחשיפה לקרינה מייננת הוא בעלייה בשיעור המוטציות בגדילי ה-DNA. אך-אין D.N.A ולכן בפיתוח של גידולים סרטניים. בהתאם לכך נחלק את הספקטרום האלקטרומגנטי וכן את שיטות הדימות השונות לשניים: לאזורים שהקרינה בהם מייננת ולאזורים שהקרינה בהם איננה מייננת; לכן שיטות הדימות המשתמשות בטווח הקרינה המייננת הן בטוחות לשימוש, לפחות בכל הנוגע להשפעות הקרינה.

בטווח הקרינה המייננת נכללות שיטות הדימות קרינת-X ("רנטגן"), ממוגרפיה ו-CT, וכן שיטות דימות גרעיניות שמשתמשות בחומר רדיואקטיבי שפולט קרינה בתוך הגוף, לדוגמה, מכשיר ה-PET. בטווח הבטוח של הקרינה נמצאות השיטות MRI ואולטרה-סאונד. האם זה אומר שאסור לעבור סריקה או שיש לחשוש מפניה? התשובה היא מורכבת ונדון בכך בהקשר של כל טכניקה. יש לזכור כי סיכון הוא מושג יחסי, ולכן יש לבחון בכל פעם מי הנבדקים, מה גילם, מהי תדירות הסריקות שיש צורך לבצע, מה המחלה שמנסים לאבחן ומה הסיכון הכרוך בחוסר אבחנה של המחלה ביחס לסיכון הטמון בסריקה עצמה. אלו הם הגורמים שהרופאים מעמידים על כף המאזניים: הסיכון בסריקה ביחס לסיכון שבמחלה.

ניתן גם לחלק את שיטות הדימות השונות לשיטות שמספקות מידע מבני, כגון קרינת-X ו-CT, לאלו שמספקות מידע פונקציונלי ופיזיולוגי - כגון אולטרה-סאונד ו-MRI - וכמובן לאלו שמספקות מידע משני הסוגים. במידע מבני מתקבלת תמונה של רקמות שונות כגון עמוד השדרה, מוח, יד וכו'. מידע פונקציונלי קשור בתהליכים פיזיולוגיים המתרחשים בגוף כגון זרימת דם, פעילות מוחית ועוד. לשיטות דימות המסוגלות לספק מידע משני הסוגים יש יתרון מבחינה רפואית. לדוגמה, חשוב למקם בצורה מדויקת את מיקום הגידול (בתמונה מבנית), ובה בעת חשוב מאוד לדעת אם הגידול פעיל או רדום (בתמונה פונקציונלית); כך אפשר לקבל החלטה בכל הנוגע להמשך הטיפול על סמך השילוב של שני סוגי המידע.

לפני שנעמיק בכל אחת מהשיטות נגדיר את הביטויים **רזולוציה**,

רעות אבני, מחלקה לבקרה ביולוגית, מכון ויצמן למדע, רחובות



איור 1: סקלת הקרינה האלקטרומגנטית ביחידות של תדירות גל (הרץ) ואורך גל (מטר). ניתן לראות היכן ממקומות שיטות הדימות השונות בכל הנוגע לסוג הקרינה.

קרא לה קרינת-X מכיוון שלא ידע את מקור הקרינה, ובמהלך השנים התווסף השם קרינת רנטגן. רנטגן שיתף את אישתו בתגלית המדעית, והיא השתתפה בניסויים שערך, ולמעשה התמונה של כף ידה היא תמונת הרנטגן הראשונה של רקמה אנושית שאי פעם נלקחה. כאשר רנטגן הקרין את ידה של אישתו, הוא הבחין בכך שהעצמות והטבעת שעל ידה בלעו את הקרניים, כך שחלקים אלו נשארו כהים על גבי לוח הצילום. כך הוא גילה כי קרינה זו נבלעת בעצמות אדם. זו למעשה כל התורה של קרינת-X: הנבדקים מוקרנים, הקרינה נבלעת בחלקה על ידי מבנים בגוף כגון עצמות, וגלאי קולט את הקרניים המוחזרות. הניגוד בין פיקסל לפיקסל בתמונה המתקבלת ישקף את עוצמת הבליעה של הקרינה בכל פיקסל. התגלית הזו הביאה לסנסציה מדעית מכיוון שיצרה ענף חדש ברפואה המאפשר לצלם מבנים בגוף. מאז התגלית נעשה שימוש נרחב בקרינת-X, ומכיוון שעד לשנות ה-70 לא היה ידוע כי קרינה זו מסוכנת, הרי נעשה בה שימוש מופרז אף לצרכים שאינם קשורים לדימות רפואי. כך למשל בשנות ה-50 במדינת ישראל טופלו כ-20,000 ילדים בקרינה כדי להיפטר ממחלת הגזזת, שהיא מחלת עור פטרייתית, כדי למדוד נעליים ועוד ועוד. חשוב לציין שהקרינה לא הרגה את הפטרייה, אלא גרמה לנשירת שיער, וכך לא היה לפטרייה מצע לגדול עליו. אך אליה וקוץ בה: רנטגן וגם אישתו נפטרו מסרטן, שיוחס בדיעבד לחשיפה הגבוהה לקרינה. דרך

[סיגנל](#) וניגודיות בהקשר של תמונות. רזולוציה של תמונה מתייחסת ליכולת להפריד בין האלמנטים המרכיבים אותה. כל תמונה מורכבת מ**פיקסלים**, וככל שיש יותר פיקסלים ליחידת שטח - כך הרזולוציה גבוהה יותר. לעולם נשאף להגדיל את הרזולוציה על מנת להבחין בפרטים אנטומיים קטנים ביותר, במיוחד אלה שעוסקים בכלי דם הנעים בגודלם מ-8 מיקרו מטר עד ל-25 מילימטר. הסיגנל הוא האות שאנו מקבלים מהרקמה, וככל שיש יותר סיגנל ביחס לרעש רקע, כך תהיה התמונה ברורה יותר. ניגודיות בתמונה היא ההבדל הוויזואלי (בצבע ובעוצמה) המפריד בין אובייקט לסביבתו. ככל שהניגודיות בין איברים שונים גבוהה יותר, כך ניטיב להפריד ביניהם.

קרינת-X

קרינת-X התגלתה באקראי על ידי וילהלם קונרד רנטגן בשנת 1895, והוא זכה על כך בפרס נובל בפיזיקה בשנת 1901 (הרבה תגליות מדעיות פורצות דרך התגלו כשלא חיפשו אותן, כגון הפניצילין. מעניין שלעיתים התופעה החשובה נמצאת במקום שלא חיפשנו בו!). רנטגן הבחין שכאשר הטעין [שפופרת ואקום](#) עם קטודה ואנודה במתח חשמלי, נוצר זוהר ירוק על גבי מסך שהיה ממוקם בחדרו. הוא הבין שכאשר המתח החשמלי מגיע לרמה מסוימת (20 עד 150 קילו-וולט), האלקטרונים צוברים אנרגיה מספיקה, ונפלטת קרינה בעלת כושר חדירות גבוה. הוא



ומופיע כגוש אחד נחשד כסרטני. צילום שיש בו חשד לגידול שאינו ממאיר מצריך צילום נוסף בתוך פחות משנה ומעקב לאורך זמן; ואילו צילום שממנו עולה חשד לגידול ממאיר - מחייב ביופסיה (הוצאת דגימה מן השד ובדיקתה תחת מיקרוסקופ). חשוב לציין שגם ציסטות או הצטברות נוזלים ייראו כגוש בצילום הממוגרפיה, ולכן לעתים דרושה בדיקת אולטרה-סאונד על מנת להפריד בין גידול לציסטה. ניתן לאבחן גם הסתיידויות, השתקעויות של סידן שיכולות להעיד על תהליך סרטני ושנראות כנקודות לבנות קטנות. הסתיידויות יכולות להופיע אצל נשים גם בצורה טבעית כחלק מתהליך ההזדקנות של השד, אבל במקרה זה מספרן יהיה נמוך יותר, והן יהיו מפוזרות יותר. מכיוון שצילומי ממוגרפיה יחידים שהתבצעו בנקודת זמן אחת הם קשים לאבחון מדויק, הבדיקות הללו הן חוזרניות, דבר המאפשר לרופא להסתייע בממוגרפיות קודמות על מנת להבין טוב יותר אם אכן מדובר בהתפתחות סרטן.

טומוגרפיה ממחושבת (CD)

"טומוס" היא מילה לטינית בהוראת "חתך", ו"גרפיה" - פירושה כתיבה. מי שהגה את הרעיון בשנת 1967 היה [גודפרי נ. האונספילד](#), שזכה בשנת 1979 בפרס נובל ברפואה ביחד עם אלן מקלאוד קורמק (שימו לב שהפעם פרס הנובל הוא ברפואה, ולא בפיזיקה...). העיקרון הוא להקרין את הנבדקים בקרינת-X בזוויות שונות על מנת לקבל תמונות רבות, שממן המחשב בונה תמונה תלת-ממדית. הנבדקים שוכבים במכשיר שעושה סיבוב סביבם, ובכל פעם מקרין אותם; את הקרניים קולטים מספר רב של גלאים ומעבירים את האותות האלקטרוניים למחשב. ככל שמספר הזוויות גבוה יותר, כך הרזולוציה גבוהה יותר, אך החיסרון הגלום בכך הוא חשיפה של הנבדקים לקרינה גבוהה יותר. היתרון של השיטה הוא בקבלת תמונות תלת-ממדיות עם רזולוציה גבוהה מאוד, המאפשרות לעשות אבחון מדויק יותר של סוגי סרטן שונים ושל מיקומם הגאומטרי המדויק בגוף - אינפורמציה שחשובה מאוד לניתוח. חסרונה הגדול הוא בחשיפה לקרינה גבוהה יותר, ולכן בדיקות חוזרות בתדירות גבוהה צריכות להישקל ברצינות.

עד כה תיארתי שיטות דימות מבוססות-קרינת-X שונות אינפורמציה מבנית על רקמות שונות. אמנם השיטות מדויקות

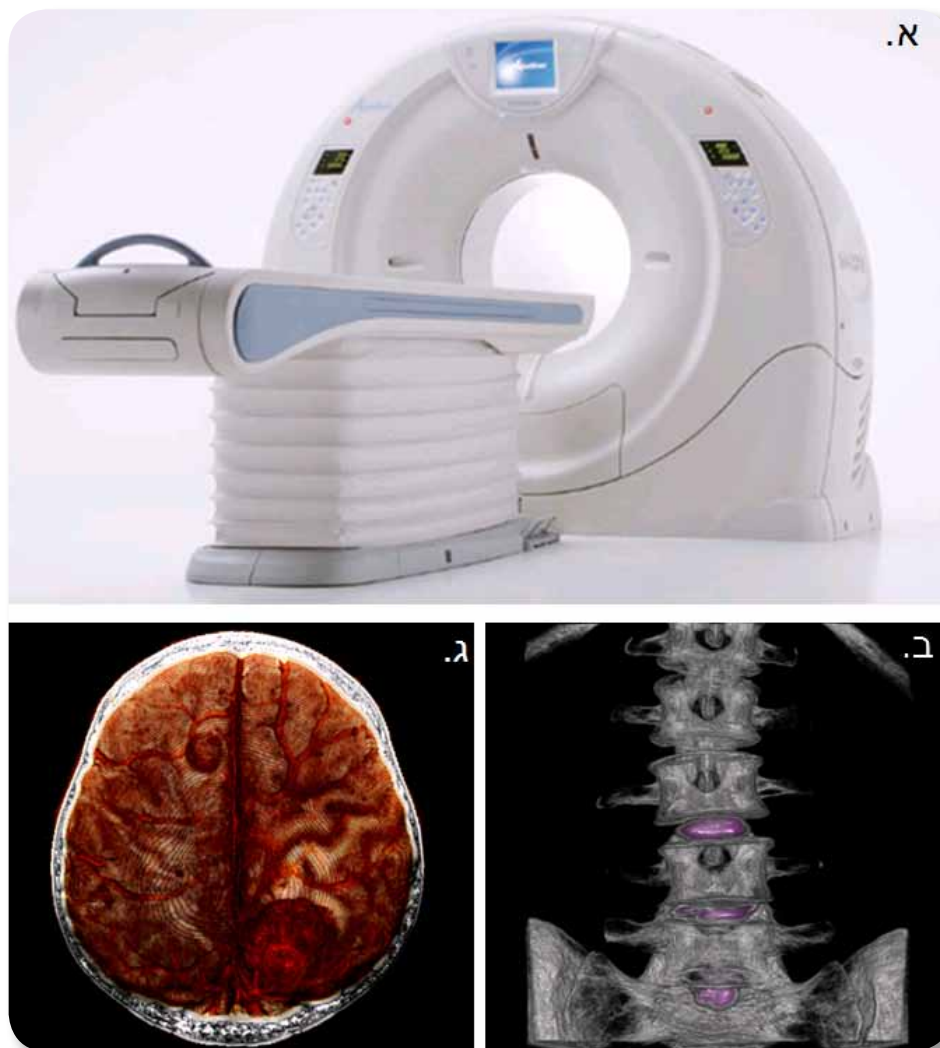
אגב, כשאישתו של רנטגן ראתה לראשונה את התמונה של ידה, היא אמרה: "ראיתי את מותי". המשפט הזה קיבל משמעות כפולה לאחר שאכן מתה מאותה הקרינה. הוא הדין עם אותם ילדים שהוקרנו על מנת לטפל בגזזת - נמצא ששיעור הסרטן השכיח ביותר שלקו בו היה סרטן הראש והצוואר. מהרגע שהתבססה ההבנה שהקרינה כרוכה בסיכון, הוטלו הגבלות על החשיפה ועל עוצמת הקרינה המותרת.

הבדיקה כרוכה בסיכון מסוים מכיוון שהקרינה מייננת, אבל צריך להבין שהסיכון הוא לא אבסולוטי. הסיכון גבוה יותר כאשר יש צורך בבדיקות בתדירות גבוהה, ומעבר לכך הסיכון גבוה יותר כאשר מדובר בילדים. חשוב לציין שאם קיים חשד לגידול סרטני שהדרך לגילוי היא קרינת רנטגן - הרי הסיכון שנלווה לסריקה קטן לאין שיעור מזה שטמון בהימנעות מאבחון.

היתרונות העיקריים של השיטה הם הפשטות, המהירות והרזולוציה הגבוהה המתקבלת בתמונות. החיסרון העיקרי הוא בשימוש בקרינה מייננת. זאת ועוד, מכיוון שהתמונות מספקות אינפורמציה מבנית בלבד, על מנת לדמות איברים רכים, יש צורך להשתמש באטומים כבדים שיקנו ניגודיות לאותם איברים. למשל, על מנת לצלם קיבה או מעיים, יש לשתות בריום, ולצילום לב או כליות מזריקים יוד לווריד. זהו חיסרון נוסף מכיוון שחלק מהאכלוסיה רגיש לאותם חומרים.

ממוגרפיה

"ממו" היא המילה הלטינית למונח "שד", ו"גרפיה" - פירושה תמונה. למעשה, מדובר בצילום של השד באמצעות קרינת-X לצורך גילוי סרטן השד. הקרינה במכשיר הממוגרפיה היא נמוכה מהקרינה במכשיר רנטגן 'רגיל', מכיוון שידוע כי קרינת הרנטגן עצמה עלולה לעודד היווצרות סרטן השד. בישראל קיימת תכנית סקר לגילוי מוקדם של סרטן השד באמצעות ממוגרפיה, ובמסגרתה מוצע לכל הנשים בנות 50-75 שנה לעבור בדיקת ממוגרפיה פעם בשנתיים, ולנשים הנמצאות בסיכון מוגבר לחלות בסרטן השד מוצעת בדיקה זו בגיל צעיר יותר ובתדירות גבוהה יותר. חשוב מאוד כי הרזולוציה של הצילומים הללו תהיה גבוהה מאוד על מנת לאבחן בצורה מדויקת את גבולות הגידול, ולכן מדובר בדרך כלל על רזולוציה של פחות מ-50 מיקרו-מטר (סדר גודל של תא יחיד). אזור שנראה בתמונה בהיר יותר



תמונה 1: טומוגרפיה ממחושבת (CT) א. מכשיר CT קליני של חברת טושיבה; ב. עמוד שדרה באפור ועל גביו בצבע סגול מיקום דיסקים פגועים; ג. מוח עם גרורות. התמונות נלקחו מהאתר של חברת Toshiba.

נמוכה מאוד, נוהגים לשלב אותם עם סריקה נוספת, מבנית, כגון CT, ואז לשלב יחדיו זו על גבי זו את שתי התמונות ולקבל אינפורמציה מבנית ופונקציונלית מאותו הנבדק.

(PET) Positron Emission Tomography

בסוף שנות ה-50 הגו אדוורדס, צ'פמן וקוהל את הרעיון של שימוש בפליטת [פוזיטרון](#) לצורכי דימות, ומאוחר יותר - בשנות ה-70 - פיתחו מייקל, פלפס ומישל תר-פוגוסיאן את השיטה לצורכי דימות רפואי. בשיטה זו משתמשים על מנת לאפיין תהליכים הקשורים בעיקר למטבוליזם. החומרים הרדיואקטיביים

מאוד במרחב, אך אין הן מאפשרות לקבל אינפורמציה פונקציונלית על תהליכים פיזיולוגיים המתרחשים באותן הרקמות. לשם כך נעבור לתאר תחום שונה של דימות רפואי שנקרא רפואה גרעינית, וגם הוא נכלל בקבוצת הסריקות המסוכנות בשל הקרינה שלהן.

רפואה גרעינית

רפואה גרעינית מאפיינת תהליכים פיזיולוגיים בעזרת הזרקת חומרים רדיואקטיביים לווריד של הנבדקים ומעקב אחרי הצטברותם ברקמת היעד. מכיוון שבשיטות אלו הרזולוציה

אולטרה-סאונד

ג'ורג' לודוויג היה הראשון שהפעיל אנרגיית גלי קול על גוף האדם למטרות רפואיות כבר בסוף שנות ה-40 של המאה הקודמת. אך היה זה ג'ון ווילד שהשתמש בשנת 1949 באולטרה-סאונד כדי להעריך מבנה של רקמה אנושית, ועבודה זו נחשבת עד היום כ"אבא של האולטרה-סאונד הרפואי". אולטרה-סאונד רפואי משתמש בגלי קול בעלי תדירות גבוהה, מ-2 עד 10 מגה-הרץ (לשם השוואה, טווח השמיעה של אוזן האדם הוא 20 עד 20 קילו-הרץ). התמונה מתקבלת כאשר גלי הקול הנשלחים מהמתמר מתנגשים ברקמה וכתוצאה מכך מתרחשת החזרה (רפלקציה) של גלי הקול כאשר תבנית ההחזרה משקפת את מבנה הרקמה. אין כל סכנה בבדיקה. הבעיה היחידה שעלולה להיווצר היא חימום מינורי של הרקמה, אף שגם אם מתרחשת עלייה קטנה בטמפרטורה, הגוף מסלק את עודפי החום במהרה, ולמעשה עד היום אף מחקר לא הוכיח בצורה מוחשית סיכון הכרוך בבדיקה. השימוש העיקרי הוא דווקא ברקמות 'רכות' כגון לב, שד, וכמובן בתחום הגינקולוגיה וההיריון. זאת משום שבמהלך ההתפתחות עוברית חשיפה לקרינה מזיקה עלולה להיות לטאלית, ולכן סריקה שאינה כרוכה בקרינה מיינת היא הכרח בנסיבות הללו. ניתן גם למדוד זרימת דם באולטרה-סאונד על ידי שימוש באפקט הדופלר, כאשר המקור הנע הוא תאי הדם האדומים. תדירות הגל הנפלט תלויה בכיוון התנועה של תאי הדם, כלומר, בשאלה אם הם נעים אל המקור הצופה או ממנו. את המידע של תדירות הגל הנפלט ניתן להמיר במחשב למידע על מהירות זרימה של כלי דם, אינפורמציה חשובה מאוד, למשל בהיריון, שכן זרימה פגומה בחבל הטבור או בשליה יכולה להוביל למחלות בעובר כגון פיגור בגדילה, עד כדי סכנה ממשית לעובר המחייבת לידה מידית. גם בתחום הלב האולטרה-סאונד מהווה שיטת דימות עיקרית, שכן ניתן למדוד זרימת דם בתוך הלב ולקבל מעריכים שונים על מידת פעילותו של הלב. היתרון הגדול של שיטת האולטרה-סאונד הוא בשילוב של אינפורמציה מבנית עם אינפורמציה פונקציונלית, במיוחד כאשר עושים שימוש בדופלר. יתרה מזו חוסר הסיכון בסריקה, קלות ההפעלה, קבלת התמונות "on-line" - ללא כל צורך באלגוריתמים מתוחכמים והמחיר הזול של המכשיר - כל אלו הופכים את שיטת האולטרה-סאונד לאחת השיטות הנפוצות

המוזרקים מחקים חומרים המשתתפים בצורה טבעית בגופנו בתהליכים מטבוליים שונים כגון חמצן, גלוקוז, מים, חלבונים ואפילו תרופות. כך ניתן למדוד צריכת חמצן וגלוקוז, זרימת דם, פרפוזיה של נוטריינטים מהדם אל רקמות שונות ועוד תהליכים פיזיולוגיים רבים. החומר הרדיואקטיבי עובר דעיכה על ידי פליטת פוזיטרון (אנטי אלקטרון). כאשר הפוזיטרון הנפלט יפגוש אלקטרון במהלך שיטוטו בגוף, תיפלט קרינת גמא (לפי העיקרון הידוע של איינשטיין $E=MC^2$). אם שני הפוטונים הנפלטים בקרינת גמא ייפלטו בזווית של 180 מעלות האחד ביחס לאחר, אזי הם ייקלטו על ידי גלאים, ויתקבל סיגנל. התמונה המתקבלת עוברת קידוד במחשב למפה של צבעים, שבה צבע 'חם' יותר (אדום) מעיד על צבירה מוגברת של הסמן הרדיואקטיבי. אחד הסמנים הנפוצים ביותר בבדיקת PET הוא אנלוג של גלוקוז, והוא נקרא FDG (fluorodeoxyglucose). זהו למעשה גלוקוז עם אטום פלואור מסומן רדיואקטיבית, הנכנס לתאים כמו גלוקוז טבעי, דרך משפחת הקולטנים הנקראת GLUT, אך לא ייכנס לתהליך הגליקוליזה, אלא יצטבר בתוכם עד דעיכתו המוחלטת. סמן זה נמצא בשימוש נרחב בעיקר בתחום האונקולוגיה מכיוון שידוע כי במחלות סרטן יש צריכה מוגברת של גלוקוז, תופעה הידועה כאפקט וארבורג. העובדה שקיים מתאם ישיר ברבים מסוגי הסרטן בין צריכת הגלוקוז ובין מידת האגרסיביות של הסרטן, מאפשרת לערוך אבחנה וקביעת השלב של הסרטן בעזרת סמן זה. הדוגמאות הנפוצות הן סרטן השד, סרטן המעי הגס, סרטן הריאות, מלנומה, לימפומה ועוד. שימוש נוסף בשיטת ה-PET הוא בתחום מדעי המוח, כאשר הנחת היסוד היא שרדיואקטיביות גבוהה קשורה לפעילות מוחית מוגברת. הסמן הרדיואקטיבי במקרה זה הוא אנלוג של חמצן או FDG, והאפליקציות הן רבות ומגוונות החל מאפיון רצפטורים נירונליים ועד לאפיון שבץ ומחלת האלצהיימר (שבה צריכת הגלוקוז דווקא יורדת באזורים הפגועים במוח). היתרון של השיטה הוא בקבלת מידע פונקציונלי על תהליכים המתרחשים בגוף; החסרונות של השיטה הם הקרינה, הצורך בציקלטרון (המייצר את הסמן הרדיואקטיבי) בסמיכות לבית החולים, החובה לשלב שיטת דימות נוספת כדי לקבל אינפורמציה מבנית ורגישות נמוכה לאבחן חלק מסוגי הגידולים.



הבולטים ביותר, אך יש לזכור כי זהו רק קצה חודו של המכשיר הנפלא הזה (גילוי נאות: הדוקטור שלי הוא בתחום של פיתוח שימושים ביולוגיים ורפואיים ב-MRI). התמונה מתקבלת מאחר שלפרוטונים בגרעין האטום של הפרוטונים במולקולות המים בגופנו יש מומנט מגנטי. כאשר הנבדקים נכנסים אל תוך השדה המגנטי שמייצר מכשיר ה-MRI - שהוא בין 0.5 ל-3 טסלה (לשם השוואה, השדה המגנטי של כדור הארץ נע מ-30 עד 60

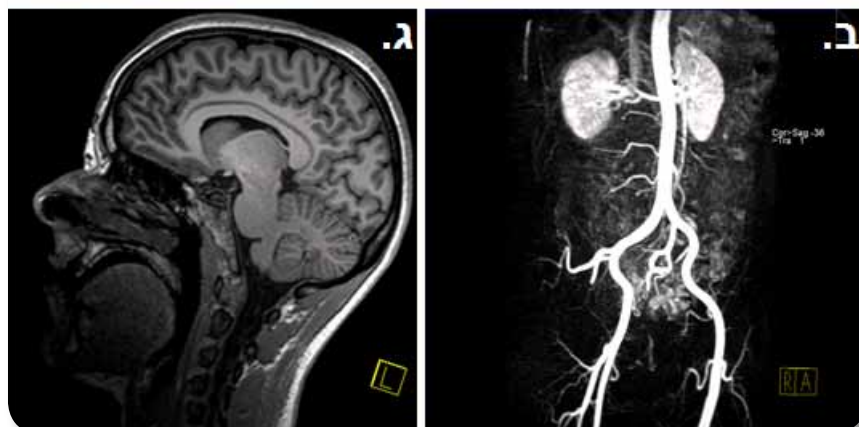
ביותר כיום ברפואה, ויש הטוענים כי בעתיד יסתובב כל רופא עם מכשיר אולטרה-סאונד נייד שיחליף את הסטטוסקופ. החסרונות העיקריים הם בעיית החדירה לעומק: בתדירות מתמר גבוהה מרוויחים רזולוציה גבוהה יותר, אך המתמר אינו חודר לעומק מספיק, וכך יש בעיה לדמות איברים שאינם ממוקמים קרוב לפני השטח, אלא אם הבדיקה נעשית בצורה פולשנית. חיסרון נוסף הוא התלות במפעיל: הדרך שבה מבצעים הטכנאים או

הרופאים את הסריקה - צורת ההנחה של המתמר, הזווית, הניסיון שלהם וכו' - כל אלו ישפיעו בצורה רבה על התמונה שתתקבל ובעקבות כך גם על הדיאגנוזה המתקבלת.

MRI (Magnetic Resonance Imaging)

ראשית נתחיל מאנקדוטה קצרה: למעשה, השם המקורי של המכשיר שפותח על ידי רבי, בלוק ופורסל כבר בשנות ה-40 של המאה הקודמת הוא NMR - ראשי תיבות של Nuclear Magnetic Resonance. במשך שנים רבות השימוש העיקרי של המכשיר היה באיפיון המבנה של חומרים כימיים וביולוגיים שונים ולא בדימות רפואי. בשנת 1972 הגה דמדיאן לראשונה את הרעיון המבריק שלפיו ניתן להשתמש באותו המכשיר עם מניפולציה קלה נוספת על מנת לדמות איברים של בני אדם, ולכן נוספה לו המילה imaging. במהלך השנים נעלמה המילה nuclear (גרעיני) על מנת שלא להלחיץ את האדם הממוצע, שמא יחשוש שהוא עומד להיכנס למכשיר שהוא גרעיני (וכל האסוציאציות הכרוכות בכך...).

רבות ניתן לדבר על ה-MRI: על התאוריה של מקור הסיגנל, סוגי השימושים עיקריים, היתרונות הרבים, הפיתוח העתידי ועוד ועוד, אך קצרה היריעה מלתאר. אנסה להתמקד בעקרונות החשובים בשימושים



תמונה 2: MRI א. מכשיר MRI במכון ויצמן (חברת סימנס); ב. רקונסטרוקציה תלת-קמדית של המחשב שמראה את העוצמה המקסימלית של כלי הדם הראשיים והכליות; ב. מוח. התמונות נלקחו במכון ויצמן למדע על ידי ד"ר עדנה פורמן-הרן.



אחר במוח. ההבדל הזה בין רמות החמצון של המוגלובין יוצר הבדלים בסיגנל המתקבל בתמונות מסוג מסוים של T_2 . בצורה הזו ניתן לבנות מפות אקטיבציה של המוח לפי סוגי גירויים שונים ולמפות אזורים שונים במוח האחראים על תהליכים שונים. השימושים בשיטת ה-fMRI הם נרחבים וכוללים ניסויים פסיכולוגיים מורכבים בנושאים הקשורים בזיכרון, בריח, בשפה, בתגמול ואפילו בבעיות מוסר (נמצא שאמיגדלה, האזור שאחראי על הרגש הוא אחראי במידה מסוימת גם על בעיות מוסריות). שיטה זו משמשת גם לאבחון מחלות נפש. השימוש ב-MRI הגיע אף לבית המשפט: בשנת 2009, בהסתמך על התוצאות של ניסוי דימות, ביטל בית המשפט העליון בפלורידה שבארה"ב את עונש המוות לילדים מתחת לגיל 18 במשפט שנקרא *Graham vs. Florida*. זאת מכיוון שהוכח שהמוח שלהם לא בוגר מספיק (האם צריך היה MRI כדי להוכיח את זה?..).

במחקר מעניין שנערך על עיוורים נמצא שתפקודו של האזור הוויזואלי עבר הסבה לתפקיד הקשור בשפה, עובדה המעידה על פלסטיות של המוח (היכולת שלו לעבור שינויים); אף ניתן להרחיק לכת ולומר שתוצאות הניסוי הזה מרמזות שהאזורים השונים במוח אינם אחראיים בהכרח על תפקידים מתחום אחד בלבד, כך שיתכן שהחלוקה הזו אינה חד משמעית, ושיש לבחון אותה מחדש.

היתרונות הגדולים של מכשיר ה-MRI הם השימוש בו הוא חסר כל סיכון: אין סכנה בקרינה שכן היא בטווח של גלי רדיו. הסכנה היחידה היא בחימום הרקמה הנבדקת בעקבות שידור הפולס, אך כיום בכל מכשיר MRI קיימות מערכות ממוחשבות שאינן מאפשרות לשדר את הפולס של גלי הרדיו מעבר לעוצמה מסוימת. יתרון משמעותי נוסף הוא באפשרות לקבל מידע מסוגים שונים על ידי מניפולציות שונות של השדה המגנטי. כלומר, ניתן לאסוף אינפורמציה מבנית ופונקציונלית באותו המכשיר, ללא כל צורך בשילוב של מכשיר דימות נוסף. החסרונות של המכשיר הם מחירו היקר, חוסר הזמינות שלו ביחס למכשירי דימות אחרים, זמן הבדיקה הארוך יחסית לשיטות מבוססות קרינת-X, מיעוט יחסי של רופאים שיכולים לפענח תמונות MRI והעובדה שאנשים עם קוצב לב או שתל מגנטי לא יוכלו לעבור את הבדיקה.

מיקרו-טסלה, משמע הוא קטן יותר בשבעה סדרי גודל) - אותם מומנטים מגנטיים יסתדרו עם כיוון השדה או נגד כיוון השדה. מניפולציה של השדה המגנטי הראשי, הנגרמת על ידי הפעלת פולס של אנרגיה בתחום גלי הרדיו (תחום הקילו-הרץ), תגרום לאפקט שנקרא רזוננס שבו המומנטים המגנטיים יטו את כיוונם ממישור השדה הראשי למישור הניצב לו, ובסופו של דבר יעברו רלקסציה חזרה לכיוון השדה הראשי. אנחנו מודדים את הסיגנל של אותם מומנטים מגנטיים במישור לאחר הפולס, וזה המקור לסיגנל שאנו רואים.

אילו סוגי תמונות ניתן לקבל? סוגים רבים ומגוונים, כתלות במניפולציה שערכנו בשדה המגנטי. למשל, את הזמן הדרוש למומנטים המגנטיים לשוב לציר הראשי אנחנו מאפיינים בקבוע זמן שנקרא T_1 בעוד שאת ההיעלמות מהמישור הניצב מאפיינים בקבוע זמן שנקרא T_2 . זמנים אלו חשובים לא רק לפיזיקאים, אלא קשורים בצורה ישירה למבנה הרקמה. כלומר, כאשר נאסוף תמונות על ידי מדידה של זמני ה- T_1 או ה- T_2 - לכל פיקסל ופיקסל בתמונה תהיה עוצמה שונה כתלות בקבוע הזמן שלו. כך מתקבלת תמונה בתמונת ה-MRI. כלומר, קבועי הזמן ישתנו בהתאם לסביבה הביו-כימית של אותו הפיקסל בתמונה, למשל, נוכחות גידול, בצקת, כלי דם ועוד. ניתן לבצע סוגי שונים של סריקות. חלקם מהקרינות מספקות מידע מבני בלבד, וחלקן מידע פונקציונלי, וזאת כתלות בצורך האבחוני של אותו הנבדק. מה נוכל 'לראות' בעזרת ה-MRI? גידולים סרטניים, מהירות זרימת כלי פרפוזיה של נוטריינטים אל תוך רקמה, חסימות בכלי דם, שבץ, בצקת, פונקציונאליות של הלב, התפתחות מוחית החל מהשלב העוברי ועד לשלב הבוגר, שחיקה בסחוס ועוד ועוד.

בניסויים הנקראים fMRI (functional) ניתן למדוד פעילות מוחית באופן הבא: הנבדקים שוכבים במגנט ועוברים גירוי כלשהו, לדוגמה, גירוי מוטורי (כיווץ היד), סנסורי (צפייה בסרט) ועוד. ההנחה היא שיותר דם מחומצן יזרום באזור המוח שעובר הפעלה בעקבות אותו הגירוי. מכיוון שחמצן נישא בדם בעיקר על ידי מולקולות המוגלובין, הרי שבאותו האזור היחס שבין ההמוגלובין המחומצן (אוקסי-המוגלובין) להמוגלובין הלא מחומצן (דהאוקסי-המוגלובין) יהיה גדול יותר בהשוואה לאזור



סיכום

בסקירה זו הצגתי את שיטות הדימויות העיקריות הקיימות כיום ברפואה וחלק מהפיתוחים העתידיים. מכיוון שהעולם הרפואי הוא מורכב יותר ויותר, האינפורמציה שצריך לאסוף על כל נבדק הולכת וגדלה עם השנים בהתאמה לפיתוחים המדעיים. לכן יש צורך בדימויות לא מסוכן שיענה על הצרכים השונים ויחליף את השיטות הפולשניות יותר, כמו דגימות ביופסיה, ואת השיטות המייננות כדוגמת רנטגן. אם כן ניתן לומר שלפחות בכל מה שקשור בדימויות בשירות הרפואה, בעתיד תתבהר התמונה.

מקורות

- Cassandra Willyard (2011). Imaging: Seeing is believing. Nature 480, S52-S53.
- Lauren Gravit (2011). Diagnostics: The early bird. Nature 480, S36-S37
- Ralph Weissleder and Mikael J. Pittet (2008). Imaging in the era of molecular oncology. Nature 452, 580-589.
- Drake B and Cook GJ (2011). Positron emission tomography computed tomography in oncology. Br J Hosp Med (Lond); 72(11):631-7.
- John Bohannon (2008). Ultrasound Uses in Medicine Heat Up. Science: 338-339
- Paula Gould (2008). Non-invasive thermometer checks tissue hot spots. Nature | doi:10.1038/news.2008.1178.
- Nikos K. Logothetis (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI. Nature 453, 869-878.

מה העתיד צופן בחובו?

בכל אחת משיטות הדימויות שתוארו נערכים שיפורים ופיתוחים, שחלק מהם עומדים בחזית המדע ויתוארו כאן.

PET: פיתוח סמנים רדיואקטיביים חכמים, הנקשרים בצורה ספציפית לסרטן מסוג מסוים עצמו וגם לגרורות שלו. זה תחום שיכול לעבור אינטגרציה לחדר ניתוח ולאפשר למנתחים לקבל לפני הניתוח תמונה עם כל האזורים שעליהם להסיר. זה כלי חיוני מאוד, שכן אחת הבעיות המרכזיות בסרטן עם גרורות היא אי היכולת של המנתחים להבחין בכל הגרורות בעין.

fMRI: יש שמגדירים את עתיד ה-fMRI כ-"The broken brain" באותו האופן שבו מתבצע הליך הדימויות ליד שבורה - ביצוע סריקת CT, גיבוס היד ולאחר תקופה ביצוע הסריקה מחדש כדי לוודא שהיד התאחזה - כך יעבור אדם הלוקה כנפשו סדרת סריקות ב-fMRI, שבמהלכן יאופיינו אותם האזורים הפגומים אצלו במוח; הוא יעבור טיפול תרופתי וישוב לסריקות נוספות שילמדו שהמוח 'תוקן'... חלום או מציאות? תחום חם נוסף (תרתי משמע) הוא מדידת הטמפרטורה בעזרת MRI. שימושים אפשריים הם טיפול בגידול על ידי הקרנת חום ומדידת הטמפרטורה תוך כדי הטיפול או הכנסת תרופה לגוף שמתפרקת בחום.

רפואה אישית: ההבנה שכל חולה הוא עולם ומלואו הולידה את הצורך בפיתוח רפואה אישית ובאבחנה מדויקת שתאפשר לקבל החלטה בכל הנוגע לטיפול אישי. בעתיד הרחוק יישלח החולה אל קופסה שחורה של מכשירי הדמיה שונים (אין לו צורך לדעת מהם המכשירים השונים), וקבוצה של מומחים יקיימו אנליזה ויקבלו אינפורמציה מסוגים שונים (מבנית, מטבולית, זרימה וכו') בצירוף מידע קליני. המידע הנרחב הזה יאפשר לצוות הרופאים לכתוב דו"ח נכון יותר ומדויק יותר ביחס לאותו הנבדק ויוביל בסופו של דבר לקבלת החלטה בכל הנוגע לסוג התרופה/ ניתוח/סוג הטיפול שיש לנקוט בהם. בסוף הטיפול ישוב הנבדק אל שיטות הדימויות לבדיקת יעילות הטיפול.

