



מים, חשמל ומה שביניהם... על הרטבה חשמלית ויישומה לנייר אלקטרוני

רומי שמאי, האוניברסיטה העברית, ירושלים ודוד אנדלמן, אוניברסיטת תל-אביב, תל-אביב¹

תקציר: דמיינו טיפת מים מונחת על משטח ומתכדרת בהשפעת מתח הפנים. באמצעות מתח חשמלי ניתן לשנות את צורת הטיפה ולגרום לה להשתטח. זוהי הרטבה חשמלית, תופעה פיסיקלית הזוכה להתעניינות רבה בשנים האחרונות בזכות יישומים חדשים שנמצאו לה. נתאר כאן את התופעה וכמה מיישומיה, במיוחד היישום לנייר אלקטרוני - משטח תצוגה דקיק וגמיש להצגת וידאו וטקסט - יעד טכנולוגי נכסף. נייר אלקטרוני יהווה בעתיד תחליף לנייר הרגיל בתחומים רבים - במקום עיתונים וספרים נוכל לשאת עימנו רק משטח דקיק וגמיש, גדול כרצוננו, שבו נקרא את העיתון היומי כולו או ספר לפני השינה. בין האירורים בעיתון אפשר שיופיעו גם כתבות וידאו וסרטונים.

פיסיקה של הרטבה

גשו למטבח וערכו ניסוי קטן - הניחו טיפת מים על משטח זכוכית חלק ונקי (צלחת למשל) וטיפה נוספת על מחבת מצופה טפלון או על נייר אפייה משומן. תוכלו לראות כיצד התנהגות הטיפות שונה: על הזכוכית הטיפה משתטחת ואילו על הטפלון או המשטח המשומן היא מתכדרת. אומרים כי הטיפה מרטיבה את הזכוכית, ואילו על משטח הידרופובי ("שונא מים") כגון טפלון ההרטבה היא חלקית בלבד (ראו איור 1 א' ו-1 ב').

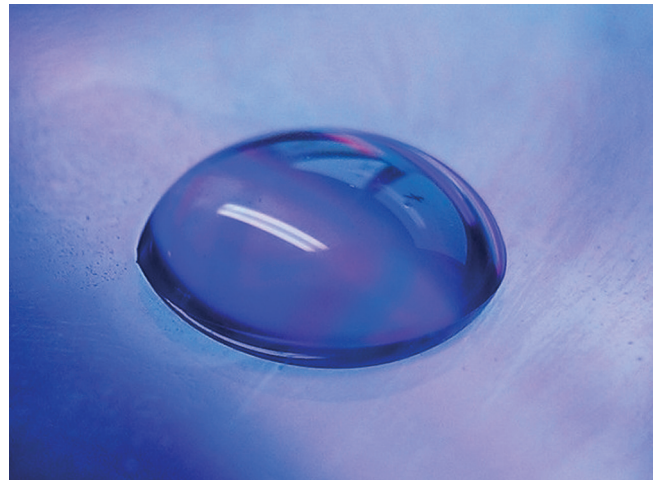
התכדרות הטיפה נובעת מכוחות משיכה בין המולקולות שמהן היא עשויה. מולקולה שנמצאת בתוך הטיפה נמשכת באופן שווה לכל הכיוונים על ידי המולקולות שמקיפות אותה ולכן סך הכוח שפועל עליה הוא אפס. לעומת זאת, מולקולה הקרובה לפני הטיפה מרגישה רק את משיכת שכנותיה מבפנים ולכן מופעל עליה כוח שקול המושך אותה לכיוון המולקולות השכנות

(איור 2). משיכה אפקטיבית זו של מולקולות על פני השטח יוצרת מתח הנקרא "מתח פנים". מתח פנים הוא גודל פיסיקלי הנמדד ביחידות כוח ליחידת אורך, או באופן שקול ביחידות של אנרגיה ליחידת שטח, ומבטא את כמות האנרגיה הדרושה על מנת להגדיל את שטח הפנים ביחידת שטח אחת. כיוון שמבנה כדורי הוא בעל שטח הפנים הנמוך ביותר לנפח נתון, ניתן להבין כי זהו גם המצב בעל אנרגיית הפנים הנמוכה ביותר, וזה מה שגורם לטיפות להתכדר.

בנוזלים שונים כוחות המשיכה בין המולקולות הם בעלי אופי ועוצמה שונים. בנוזלים אורגנים, כמו שמן, כוחות המשיכה נובעים מקיטוב חשמלי רגעי של צפיפות האלקטרונים במולקולה. קיטוב זה יוצר התפלגות לא אחידה של אלקטרונים במולקולות וכתוצאה ממנה נוצרת משיכה הדדית בין כל שתי מולקולות, בדומה למשיכה שבין שני קוטבי מגנט.



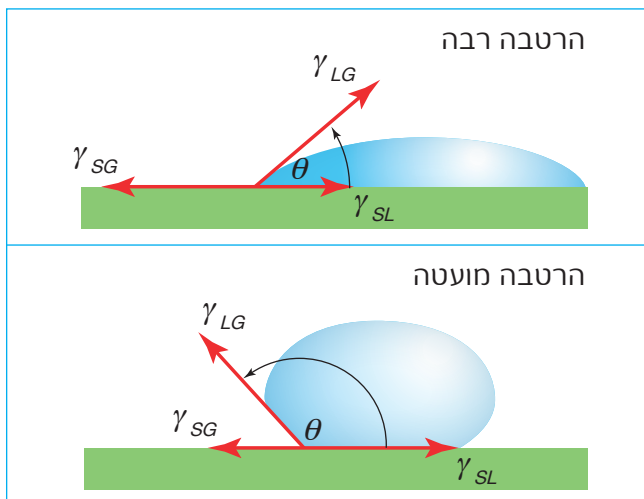
איור 1 ב': טיפת מים על משטח בעל קיטוביות נמוכה (הידרופובי), כגון טפלון או נייר אפייה משומן. הטיפה מתכדרת וההרטבה מועטה. צילום: Vincent Kwong, UBC



איור 1 א': טיפת מים על משטח בעל קיטוביות (פולריות) גבוהה, כגון זכוכית או מתכת. הטיפה משתטחת וההרטבה רבה. צילמה: Betty Winter

1. רומי שמאי הוא תלמיד לתואר מוסמך במחלקה לפיסיקה יישומית - האוניברסיטה העברית בירושלים. פרופ' דוד אנדלמן הוא חבר סגל בביה"ס לפיסיקה ואסטרונמיה - אוניברסיטת תל אביב.

המשטח לאוויר ($\gamma_{SG} < \gamma_{SL}$) ונוסף לכך דרוש שיתקיים התנאי: $\gamma_{LG} = \gamma_{SL} - \gamma_{SG}$. שימו לב שהמקרה ההפוך של הרטבה מלאה ($\theta = 0^\circ$), הנוזל מתפרס באחידות על פני המשטח עד ליצירת שכבה נומטרית) יתקיים כאשר $\gamma_{LG} = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$ וגם $\gamma_{SG} > \gamma_{SL}$. כל זה מראה את החשיבות הרבה של הגודל היחסי של מתח פני המשטח עם הנוזל והאוויר, בהתאמה.



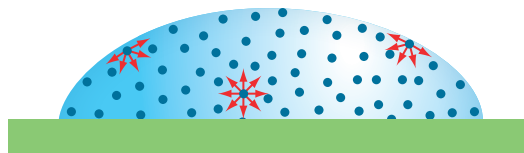
איור 3: דרגות שונות של הרטבה. למעלה ההרטבה היא רבה וזווית המגע קטנה. למטה ההרטבה מועטה וזווית המגע גדולה. אם רושמים משוואת כוחות על פי השרטוט מקבלים את משוואת יאנג.

חרקים מסוימים (כדוגמת "רץ מים", איור 4) עושים שימוש במתח הפנים על מנת "לצוף" ולנוע במהירות על פני המים. "משיכת" מולקולות המים זו לזו נושאת את משקל החרק. עקב משקלו המועט רץ המים אינו שוקע, אלא רק גורם להתעקמות קלה של פני המים ליד רגליו. תופעה דומה ניתן לראות בניסוי פשוט: נניח מחט או מטבע קטן על פני מים בכוס. אם נניח אותם בזהירות מתח הפנים ישא אותם על פני המים (איור 5).



איור 4: רץ מים צף ונע על פני המים תוך שימוש במתח הפנים.

הכוחות האחראים למשיכה זו נקראים כוחות ואן דר-וואלס (van der Waals) על שמו של מדען הולנדי בן המאה ה-19. מתח הפנים בין שמן לאוויר הנובע מהכוחות הוא כ-20 מילי ג'אול למטר מרובע (mJ/m^2). מים הם נוזל עם הרבה תכונות מיוחדות, הנובעות מהקיטוב החשמלי הגדול והקבוע של מולקולות המים וקשרי המימן ביניהן. בין השאר נגזר מכך ערכו הגבוה יחסית של מתח הפנים בין מים לאוויר: 72 mJ/m^2 . בכספית, שלמרות היותה מתכת היא נוזל בטמפרטורת החדר, כוחות המשיכה נובעים מן האלקטרונים הנעים בחופשיות כמו במתכת מוצקה ומתח הפנים מגיע ל- 485 mJ/m^2 .



איור 2: המולקולות בתוך הטיפה נמשכות באופן שווה לכל הכיוונים, ואילו המולקולות על שפת הטיפה נמשכות פנימה אל שכנותיהן - וזה המקור למתח פנים.

מתח הפנים במפגש שני חומרים תלוי בתכונות שניהם, ולא רק באלו של אחד מהם. לדוגמה - מתח הפנים של טיפת מים באוויר שונה ממתח הפנים של אותה טיפה בתווך של שמן. מכאן שכאשר מניחים טיפת נוזל על משטח, התנהגות הטיפה תלויה לא רק בתכונות הנוזל אלא גם בתכונות החומר שממנו עשוי המשטח. באופן כללי ניתן לומר כי אם יכולת הקיטוב של החומר שממנו עשוי המשטח (כלומר יכולתו של המטען החשמלי במולקולה להתפלג באופן שנוצר דיפול חשמלי) גבוהה מיכולת הקיטוב של הנוזל - תתרחש הרטבה מלאה - כמו במקרה של טיפת מים על זכוכית או על מתכת. במקרים אחרים, כמו במקרה של טפולן או משטח שמנוני - מתרחשת הרטבה חלקית (ראו מצבי הרטבה שונים באיורים 1 ו-3).

הפיסיקאי הבריטי המפורסם תומס יאנג (Young) שעבד בתחילת המאה ה-19 באוניברסיטת קמברידג', מצא בשנת 1805 כיצד זווית המגע θ (הזווית הנוצרת בין שפת הנוזל למשטח, איור 3) תלויה בשלושת מתחי הפנים: מתח הפנים בין הנוזל למשטח המוצק (γ_{SL} (Solid/Liquid)), בין המשטח לאוויר (γ_{SG} (Solid/Gas)) ובין הנוזל לאוויר (γ_{LG} (Liquid/Gas)). משוואת יאנג מבטאת באמצעות הקוסינוס של הזווית θ באופן הבא:

$$\gamma_{LG} \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

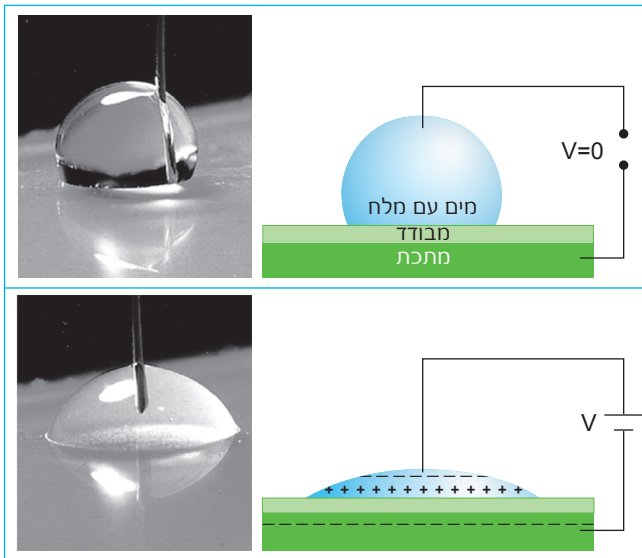
מן המשוואה רואים כי ככל שמתח הפנים בין הנוזל לאוויר (γ_{LG}) גבוה יותר כך זווית המגע תתקרב יותר ל-90 מעלות. במצב שבו $\theta = 90^\circ$ יש לטיפה צורת חצי כדור, כדי שהשטח בין האוויר לנוזל יהיה מינימאלי. תנאי הכרחי כדי להגיע למצב של טיפה כדורית מושלמת ($\theta = 180^\circ$), מצב שבו אין הרטבה (כלל) הוא מתח פנים גדול יותר בין המשטח לנוזל מאשר בין

שמדד מתחים חשמליים זעירים, באמצעות השפעתם על תנועת פני שטח המגע בין חומצה גופרתית לכספית נוזלית בתוך צינורית מזכוכית.

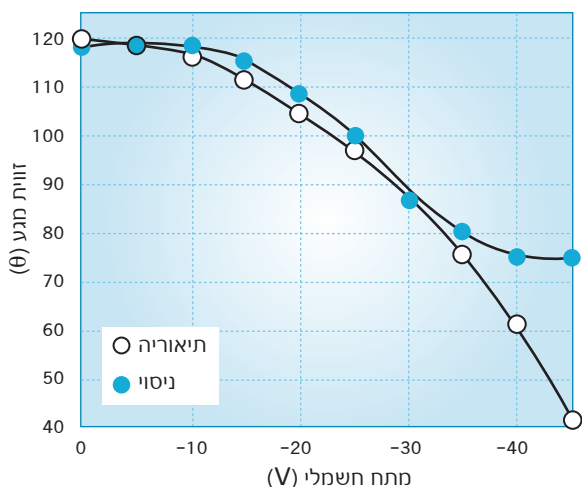
זו הייתה המצאה חשובה ששימשה בהמשך למדידות הראשונות של פעילות חשמלית של הלב, המוכרת לנו כיום כ-א.ק.ג. המצאה זו פתחה ליפמן ב-1872, שלוש שנים לפני שפרסם את המשוואה התיאורטית!



איור 5: מטבע נישא על ידי מתח הפנים בכוס מים.



איור 6: למעלה: טיפה על משטח עם ציפוי של מבודד ועם זווית מגע גבוהה. למטה: הרטבה חשמלית של המשטח. הפעלת המתח בין הטיפה והאלקטרודה תשנה את התפלגות המטען החשמלי בטיפה ותקטין משמעותית את זווית המגע. כיוון המתח בתרשים שרירותי ובשני הכיוונים תתרחש הרטבה חשמלית.



איור 7: מדידות זווית המגע כתלות במתח החשמלי מול הציפוי התיאורטי ממשוואת יאנג-ליפמן. במתחים מעל 35 וולט (תלוי מערכת) ישנה רוויה בזווית המגע בניגוד לציפוי התיאורטי. התמונה לקוחה מאתר מעבדת NDL של אוניברסיטת סינסינטי.

הרטבה חשמלית

מספר עשורים לאחר תגליותיו של יאנג, החל פיסיקאי צרפתי בשם גבריאל ליפמן (Lippmann) לחקור כיצד מושפעת תופעת ההרטבה מהפעלת מתח חשמלי בין טיפת נוזל למשטח מתכתי של כספית נוזלית. ליפמן עבד בסורבון בסוף המאה ה-19 ובתחילת המאה ה-20, והיה מנחה הדוקטוראט של מארי קירי. לימים הוא קיבל פרס נובל לפיסיקה (בשנת 1908) עבור עבודותיו על צילום צבעוני. בשנת 1875, לפני כ-130 שנה, תיאר ליפמן לראשונה הרטבה חשמלית על ידי הוספת איבר למשוואת יאנג ופיתוח משוואה מוכללת שנקראת כיום משוואת יאנג-ליפמן:

$$\gamma_{LG} \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} + \frac{1}{2} CV^2$$

במשוואה V הוא המתח החשמלי ו-C הוא הקיבול החשמלי ליחידת שטח באזור המגע בין המתכת לטיפה. המטענים החשמליים בנוזל חופשיים לנוע, לכן עם הפעלת המתח המטענים החיוביים והשליליים מתרכזים במקומות שונים בטיפה. הכוחות הפועלים על המטענים שבתוך הנוזל גורמים להתרחבות אזור המגע בין הטיפה למתכת ולהשתטחות מסוימת של הטיפה (איור 6). המשוואה מתארת כיצד שיעור ההרטבה עולה (זווית מגע קטנה) עם העלייה במתח החשמלי המופעל. כך, באמצעות המתח החשמלי ניתן לשלוט בצורה מדויקת על מידת הרטבת הטיפה.

נוסף על התיאור התיאורטי של התופעה השתמש ליפמן בהרטבה חשמלית להמצאת אלקטרו-מטר רגיש במיוחד,

כימיים אחרים ועובר מדידות אופטיות שונות והכול בסקאלות אורך זעירות של חלקי מילימטר. יישום מעניין וחשוב של הרטבה חשמלית שהתפתח מאוד לאחרונה הוא יצירת עדשה אופטית בעלת אורך מוקד משתנה. יישום זה קל להבנה משום שהוא משתמש בטיפה אחת קטנה של מים בתווך של שמן, תחת מתח חשמלי. לטיפה בגודל של מספר מילימטרים יש צורה כדורית מושלמת כמעט, ולכן היא יכולה לשמש כעדשה (איורים 8 ו-9). על ידי הפעלת מתח חשמלי בן מספר עשרות וולט ניתן לשנות במאית השנייה את צורת הטיפה ולכן את אורך המוקד שלה בהתאם לנדרש. בצורה זו ניתן לצלם תוך שמירה על מיקוד עצמים בטווח רחב, מסנטימטרים בודדים ועד מרחק אינסופי. אורך מוקד משתנה מומש עד כה באמצעות מערכת עדשות שניתן להזיזן אחת ביחס לשנייה. צורת היישום החדשה מאפשרת מזעור רב, רגישה פחות לתקלות מכניות וכבר נמצאת בשימוש במצלמות דיגיטליות זעירות של טלפונים ניידים (איור 10). שימושים דומים נמצאים בתהליכי פיתוח עבור מכשירי DVD מהדור החדש.



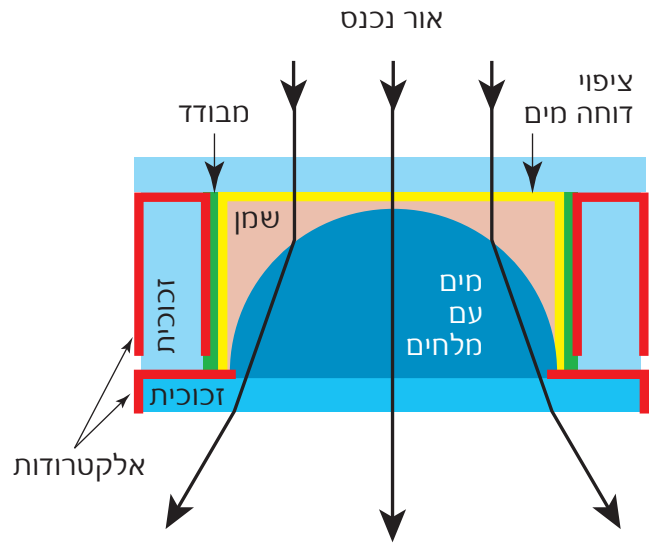
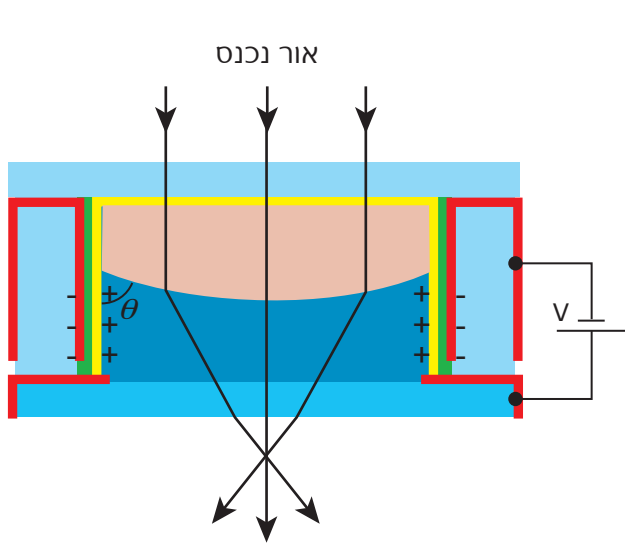
איור 8: טיפת מים באוויר יכולה למקד אור כמו עדשה. כבר במאה ה-17 השתמש המדען האנגלי סטפן גריי (Gray) בטיפת מים כעדשה למיקרוסקופ שבנה. צילם: גדי פישל

תקפותה של משוואת יאנג-ליפמן נבדקה בניסויים בחומרים רבים והיא מתארת בצורה טובה למדי מספר רב של מערכות. עם זאת התגלה כי בתנאים קיצוניים המשוואה אינה תקפה, משום שאינה מנבאת רוויה של זווית המגע בהפעלה של מתחים חזקים (איור 7). תופעת רוויה זו ועוד תופעות אחרות שעדיין אינן מובנות לגמרי מהוות גם כיום כר נרחב למחקר מדעי. על מנת להגביר את ההרטבה ולשלוט בה בצורה מבוקרת ממיסים במים מלחים שונים המהווים מקור יוני למטענים חשמליים, החופשיים לנוע בנוזל. בזמנו של ליפמן הפעלת המתח בין המתכת למי המלח גרמה לתגובות אלקטרו-כימיות, בדומה למתרחש בתא של סוללה חשמלית. לאורך זמן תגובות אלה מקטינות את כמות המטענים החופשיים בנוזל ולכן ההרטבה החשמלית התאפשרה רק לזמן קצר.

לפני מספר שנים הצליח פיסיקאי צרפתי בשם ברנו ברגי (Berge) להתגבר על בעיה זו על ידי הוספת שכבה דקה של חומר מבודד, בין משטח המתכת וטיפת המים (איור 6). לשכבת המבודד שתי תכונות חשובות: היא מבודדת חשמלית, וכן היא עשויה מחומר הידרופובי, כך שהרטבה של מים עליה נמוכה מאד. לכן ניתן לשלוט בזווית המגע ללא הולכה חשמלית בין טיפת מי המלח והמתכת. שיטה זו נקראת "הרטבה חשמלית על אלקטרודה מצופה בחומר מבודד" או בראשי תיבות EICE (Electrowetting on Insulator Coated Electrode) ומהווה פריצת דרך טכנולוגית, משום שההרטבה החשמלית שנוצרת יציבה לאורך זמן רב.

יישומים

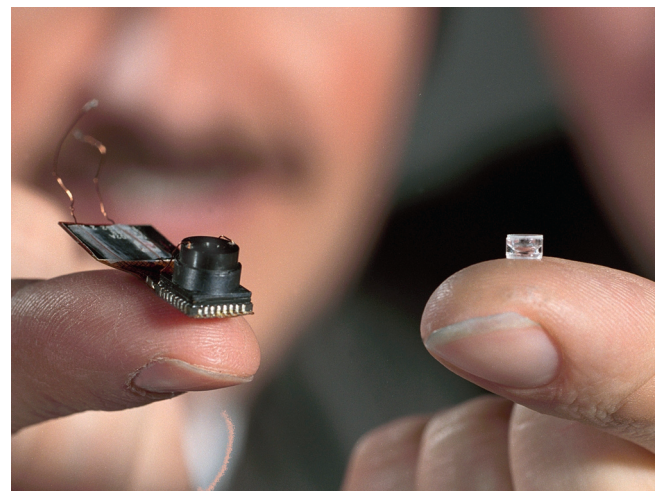
להרטבה חשמלית מספר יישומים מעניינים שפותחו לאחרונה. כולם מתבססים על העובדה שניתן לשלוט באמצעות מתח חשמלי חיצוני - ללא חלקים מכאניים - בתנועה או בשינוי מהיר (מאיות שנייה) בין מספר מצבי מערכת. חשובה מאוד העובדה שאפשר למזער את המערכת לסקאלות של חלקי מילימטר ועדיין לשלוט בה בדיוק רב באמצעות כמות אנרגיה מזערית לאורך זמן רב. יישומים מהשנים האחרונות כוללים הסעת נוזלים לצורך שינוי תכונות של מוליכים אופטיים וליצירת מתגים אופטיים, קירור מעגלים אלקטרוניים על ידי הסעת טיפות קרות על פניהם, הסעה של מיקרו-טיפות לצרכי דפוס ושאיבת נוזלים במיקרו-שפופרות, וכן מעבדה-על-שבב (Lab on a chip) לניתוח הרכב כימי של נוזלים ובפרט נוזלים פיזיולוגיים (דם, שתן, ...), וזאת על ידי הסעת טיפות מן הנוזל לתאי בדיקה על גבי השבב; שם הוא מעורבב עם חומרים



איור 9: ימין: תאור סכמאטי של חתך עדשה אופטית המורכבת מטיפת מים בתווך של שמן. כאן לא מופעל מתח חשמלי והטיפה הכדורית מפזרת אור בגלל מקדם השבירה הגבוה יותר של השמן ביחס למים (לפי חוק סנל). שמאל: כאן מופעל מתח חשמלי, בהשפעתו מתקערת טיפת המים בשמן וממקדת אור שעובר דרכה.



איור 10 ב: אובייקטים שצולמו במצלמה עם עדשות הרטבה חשמלית בעלות אורך מוקד משתנה. למעלה ממוקדת למרחק 50 ס"מ למטה ממוקדת למרחק 2 ס"מ



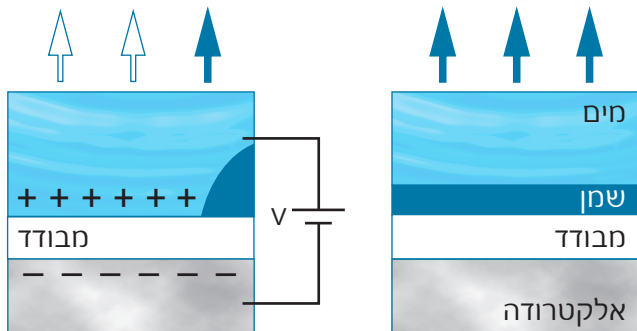
איור 10 א: אב-טיפוס של עדשת הרטבה חשמלית זעירה מתוצרת פיליפס.

נייר אלקטרוני

תכונות אלה יהפכו את הנייר האלקטרוני בעתיד - כך צופים - לתחליף לנייר הרגיל בתחומים רבים - במקום עיתונים וספרים נוכל לשאת עימנו רק משטח דקיק וגמיש, גדול כרצוננו, שבו נקרא את העיתון היומי כולו או ספר לפני השינה. בין האיורים בעיתון אפשר שיופיעו גם כתבות וידאו וסרטונים. החלפת עמוד בספר, דפדוף בעיתון או הפעלת סרטונים תיעשה בדף הנייר האלקטרוני באופן המזכיר מאוד גלישה באינטרנט כיום. נעיר כאן שיש מאמץ מחקרי רב בנושא יצירת נייר אלקטרוני, עם הצלחות ראשוניות המבוססות על מספר כיוונים טכנולוגיים שונים. עם זאת אנו נתמקד כאן רק בפיתוח חדשני המבוסס על טכניקת ההרטבה החשמלית, שנעשה לאחרונה במעבדות

שימוש נוסף ומבטיח של הרטבה חשמלית נעשה בפיתוח "נייר אלקטרוני" (e-paper). נייר אלקטרוני הוא משטח תצוגה הדומה מאד לנייר מבחינת תחושת הקורא, המסוגל להציג תוכן משתנה כמו מסך מחשב או טלוויזיה, ממש כאילו "הודפס מחדש" לנגד עינינו. הנייר האלקטרוני, בדומה לצג טלוויזיה או מסך מחשב, מחובר למקור מתח חשמלי, לשבב מחשב ולבקר קלט/פלט ששולטים על המידע החזותי שמועבר לצג ועל מהירות החלפתו. האלקטרוניקה כבר קיימת ואפשר למזער אותה. יתרונו של הנייר האלקטרוני הוא בתכונותיו: ניתן לקפלו, הוא גמיש, בעל עובי דק וצורך מעט חשמל וגם ניתן לקרוא בו לאור יום.

והמים ירטיבו את תחתית התא תוך כדי דחיקת השמן לפינת התא. במצב החדש התא יעשה שקוף כמעט לחלוטין, ואור יחזר מן התחתית הלבנה. כלומר בשני המצבים של התא קיימת החזרה של אור אך בשני צבעים שונים (למשל כחול - כצבע שנצבע השמן ולבן - כצבע תחתית התא), עם אפשרות לעבור ממצב אחד למשנהו במהירות רבה, ולחזור על התהליך מאות אלפי פעמים - ללא ירידה בביצועים. כך פועל הפיקסל המונו-כרומטי.



איור 11: מבט צד על שני מצבי פיקסל מונו-כרומטי המבוסס על הרטבה חשמלית. מימין האור המוחזר הוא כחול (כצבע שכבת השמן) ללא מתח חשמלי, ומשמאל האור הוא לבן (כצבע שכבת המבודד) עם הפעלת מתח.

בשנים האחרונות, בעקבות מחקר מאומץ, הצליחו למזער תא זה לגודל של כ-160 מיקרון (0.16 מילימטר). גודל זה מאפשר רזולוציית תמונה טובה. כמו כן, מימדי התא הבסיסי קטנים דיים כך שכוחות הכבידה הפועלים על הנוזלים זניחים ביחס לכוחות מתח הפנים, ולכן הפיכת התא או שינוי כיוונו במרחב לא מפריעים לביצועיו. תחום המתחים שבו פועל התא כיום הוא 15-20 וולט, זאת לאחר שצומצם במהלך השנים האחרונות מערכים של יותר ממאתיים וולט. היעד הטכנולוגי הוא לצמצמו לפחות מעשרה וולט, יעד שניתן להשגה על ידי בחירת חומרים מתאימים, או הפחתת עובי שכבת הבידוד בין האלקטרודה למים.

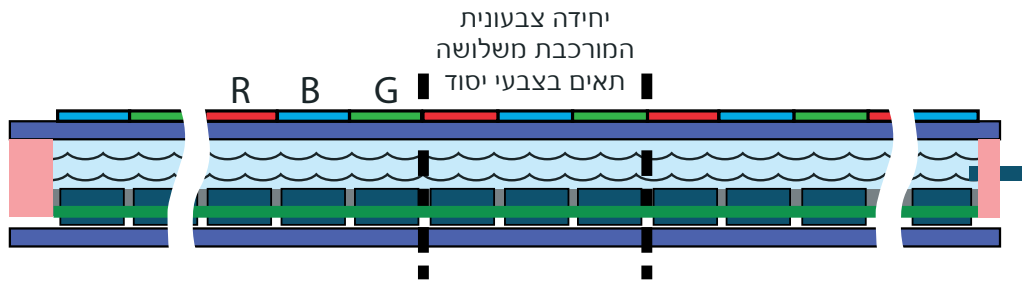
רוב השימושים העכשוויים והעתידיים של התא כפיקסל בתמונה מבוססים על בניית מערך דו-מימדי גדול של פיקסלים, עם אפשרות לשלוט באמצעות מתח חשמלי על כל אחד מהפיקסלים בנפרד (בדומה למסך פלזמה או LCD). מהירות מעבר טיפוסית בין שני מצבי ההרטבה של טיפת מים בהרטבה חשמלית היא אלפיות השנייה. מהירות תגובה זו מאפשרת החלפה מהירה בין תמונות סטטיות וכן הצגת סרטי וידאו, שלהצגתם התקינה דרוש קצב רענון של כ-25 תמונות לשנייה.

המחקר של חברת פיליפס בהולנד. חוקרי החברה הצליחו לייצר משטחי תצוגה דקים מאוד, בגודל שמתאים לשימוש במסכי מכשירים אלקטרוניים - כגון טלפון נייד או מחשב כף יד. מהירות התגובה של משטחי התצוגה שיוצרו מהירה מספיק להצגת סרטי וידאו.

ייחודם של משטחי תצוגה אלה הוא בהיותם מחזירי אור, בשונה מצגים פולטי אור המוכרים לנו בטלוויזיות ובצגי מחשב. קריאה וצפייה בצג מחזיר אור דומה להתבוננות ולקריאה מנייר רגיל, שאותו אנו רואים באמצעות אור שמקורו בסביבה, הפוגע בדף ומוחזר לעין. בשיטה זו העין אינה נחשפת לאור בהיר הנפלט מן המסך, אלא לאור המגיע מן התאורה הטבעית של הסביבה, שאותה הקורא יכול לווסת לנוחיותו. לכן תצוגה מחזירת אור מעייפת פחות את העין ובריאה יותר מתצוגה פולטת אור. יתרון נוסף הוא בצפייה במסך בתנאי תאורה חזקים כגון אור יום, שבהם לתצוגה פולטת קשה להתחרות בעוצמת אור השמש בשעה שתצוגה מחזירה משתמשת בו. בזכות יתרונות אלה לנייר האלקטרוני פוטנציאל לשמש בעתיד לצרכי תצוגה מגוונים, ואולי אף להחליף את מסכי המחשב והטלוויזיה הקיימים כיום. עם זאת הישגי הפיתוח הנוכחי מיעדים לשמש כמסכי תצוגה במכשירים אלקטרוניים קטנים בלבד, ודרוש עוד מאמץ מחקרי וטכנולוגי רב עד שניתן יהיה לרכוש בחנות הקרובה לבית נייר אלקטרוני במקום מסך מחשב.

פיקסל המבוסס על הרטבה חשמלית

בכל מסך תצוגה (CRT, פלזמה, LCD, ...) התמונה מורכבת ממספר רב של יחידות בסיסיות הנקראות פיקסלים. מאפייני הפיקסל היחיד קובעים את תכונות המסך השלם - גודלו, מהירות תגובתו, וקשת הגוונים שהוא יכול לייצר או להחזיר. נסביר תחילה את עיקרון פעולתה של יחידת הפיקסל המונו-כרומטי (חד-צבעי) המבוסס על טכניקת ההרטבה החשמלית, כפי שמתואר באיור 11. תחתיתו של התא עשויה חומר לבן ומחזיר אור שהוא גם מבודד חשמלי, ומכסהו העליון עשוי מחומר שקוף. התא מלא במים שקופים ובמעט נוזל שמנוני בלתי מסיס וצבוע. מתח חשמלי מופעל בין אלקטרודה הצמודה לתחתית התא לבין מחט (אלקטרודה שנייה) המוכנסת בצד התא. במצב רגיל, ללא הפעלת מתח, שכבת השמן מרטיבה את כל תחתית התא כך שיוחזר אור בצבע השמן. שכבת השמן הנוזלית נמצאת מתחת למים היות שמתח הפנים בין המים למבודד גבוה ממתח הפנים בין השמן למבודד. זהו מצב עם אנרגיית שטח פנים נמוכה יותר. עם הפעלת המתח החשמלי יימשכו המטענים החופשיים במים אל האלקטרודות המתאימות



איור 12: פיקסל הרטבה חשמלית צבעוני שמורכב מחיבור של שלושה פיקסלים מונו-כרומטיים בצבעי היסוד האופטיים אדום R , כחול B , ירוק G .

יתרונות תצוגת הרטבה חשמלית

צריכת האנרגיה של מסך הרטבה חשמלית היא נמוכה במיוחד, מאחר שהאנרגיה היחידה הנדרשת היא במעבר בין מצבים. כל זמן שהתמונה סטטית אין תנועת מטענים ואין צריכת אנרגיה, כי הצבע נוצר על ידי האור החיצוני שמוחזר. בהשוואה למסכי וידאו פולטי-אור מבוססי LCD צריכת החשמל של צג הרטבה חשמלית אכן נמוכה בערך פי חמישה.

יתרון נוסף של צג הרטבה החשמלי על פני תצוגת LCD הוא זווית הצפייה הרחבה, הנובעת מכך שהאור מוחזר ממנה לכל הכיוונים. ממסך LCD רגיל האור נפלט בעיקר לכיוון המרכז ולא ניתן לצפות בו מזווית צד גדולה, בעיה המוכרת בכל מסך של מחשב נייד. לעומת זאת במסך הרטבה החשמלית אפשר להביט גם מן הצד ולראות תמונה איכותית.

נזכיר כאן טכנולוגיה נוספת ליצירת נייר אלקטרוני מחזיר-אור, שאינה מבוססת על הרטבה חשמלית, הנקראת Electrophoretic Display. בטכנולוגיה זו הפיקסל הוא קפסולה מיקרוסקופית המכילה חלקיקים שחורים ולבנים הנעים בכיוונים הפוכים בהשפעת שדה חשמלי, כך שניתן לייצר שני מצבי צבע. טכנולוגיה זו כבר נמצאת בשימוש לשלטים ולמשטחי תצוגה דקים וגמישים, אך היא אינה מסוגלת להציג וידאו מאחר שזמן התגובה שלה הוא בערך שנייה (מוצר מסחרי של ספר אלקטרוני המשתמש בטכנולוגיה זו יצא לאחרונה לשוק על ידי חברת סוני).

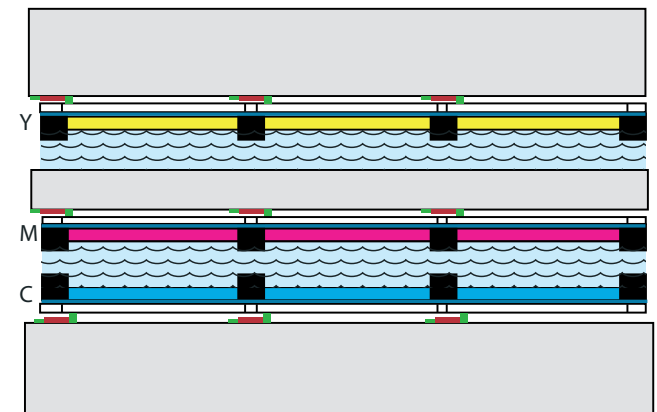
למסך תצוגה צבעוני מחזיר אור המבוסס על הרטבה חשמלית יתרונות רבים בהשוואה לטכנולוגיות המקבילות. הוא דק מאד, מתאים במהירותו להצגת וידאו, אינו מגביל את זווית הצפייה וחסכוני מאוד בחשמל. סיכום יתרונות אלו נתון בטבלה הבאה, המשווה תצוגה המבוססת על הרטבה חשמלית עם טכנולוגיות תצוגה עיקריות אחרות.

לסיכום, הרטבה חשמלית היא תופעה פיסיקלית מרתקת. אף שהתגלתה לראשונה במאה ה-19 התופעה עדיין אינה מובנת במלואה, ויש בה עניין עכשווי רב לאור יישומיה החדשים

פיקסל צבעוני

מתוך עקרון הפעולה של התא המונו-כרומטי קל להסביר את עקרון הכללתו לפיקסל צבעוני. ניתן לעשות זאת בשתי דרכים: הראשונה והמסורתית היא לחבר ביחד, זה ליד זה שלשות של תאים בצבעי אדום, ירוק, וכחול (RGB), שהם צבעי היסוד האופטיים (הנובעים ממאפייני העין האנושית), ועל ידי מינוי הבהירות של כל תא ליצור יחידה בעלת הצבע הרצוי (איור 12). התמונה הכללית נראית טוב אם כי הרזולוציה בשיטה זו נמוכה פי שלושה מן הרזולוציה האפשרית במסך מונו-כרומטי, כי יחידה צבעונית גדולה פי שלושה מהתא המונו-כרומטי.

גישה שונה, המיושמת גם היא על ידי חברת פיליפס, היא לייצר יחידה צבעונית בסיסית בעלת שלוש שכבות של שמן, הצבועות כל אחת באחד משלושת צבעי היסוד של הדפוס: ציאן, מג'נטה וצהוב (CMY). היחידה בנויה משני תאים המונחים זה על גבי זה (איור 13), ובתחתון שכבות שמן מונחות על שני צדי התא. שוב, אין בעיה של השפעת כוח כובד על השמן "ההפוך" היות שכוחות מתח הפנים חזקים ממנו בהרבה. בשיטה זו אין הפחתה ברזולוציה כי כל פיקסל מסוגל לייצר את כל קשת הצבעים בעצמו. הצבע הסופי של הפיקסל, בדומה להדפסה צבעונית, נקבע על ידי השליטה בשטח שתופס השמן הצבעוני בכל שכבה, באמצעות הרטבה החשמלית.



איור 13: פיקסל הרטבה חשמלית צבעוני שבו שכבות שמן בצבעים שונים ממוקמות זו על גבי זו, צהוב Y , מג'נטה M , ציאן C .

טכנולוגיית תצוגה	שימוש מקובל	גודל פיקסל	מהירות תגובה	זווית צפייה	עובי	פולט/מחזיר אור	צריכת חשמל
CRT - שפופרת קרן קתודית	צגי טלוויזיה רגילים	0.21 מ"מ	קצב וידאו	רחבה	כ-50 ס"מ	פולט	גבוהה
LCD - גבישים נוזליים	צגי מחשב שטוחים	0.28 מ"מ	קצב וידאו	מוגבלת	מילימטרים בודדים	פולט	בינונית-נמוכה
Electrophoretic מיקרו-קפסולות	נייר אלקטרוני שחור לבן	0.15 מ"מ	1 שנייה בין תמונה לתמונה	רחבה	פחות ממילימטר	מחזיר	נמוכה מאד
EICE - הרטבה חשמלית	צגים שטוחים ונייר אלקטרוני צבעוני	0.16 מ"מ	קצב וידאו	רחבה	פחות ממילימטר	מחזיר	נמוכה מאד



איור 15: הדגמת מסך הרטבה חשמלית של חברת ליקוויסטה (Liquavista) במכשיר אלקטרוני קטן.

והמגוונים. במאמר זה התמקדנו בישומה לנייר אלקטרוני. יישום, שייתכן שיהפוך בעתיד הקרוב לחלק בלתי נפרד מחוויות הקריאה והצפייה שלנו בטקסט כתוב, בתמונות ובמידע גרפי-ויזואלי, ואולי יתפוס את מקומם של מסך המחשב, הספר או העיתון הרגילים (ראו אירורים 14 ו-15).

את המאמר הזה אנו קוראים על נייר שהופק בתעשייה הצורכת מיליונים רבים של טונות עץ ומאות אלפי טונות דיו מדי שנה, עם השלכות אקולוגיות קשות. מעניין מתי לא נזדקק עוד למשאבים אלה ונוכל לקרוא את עיתוננו באמצעות פיקסלים של שמן, מים וקצת חשמל...



איור 14: המחשה של שימוש בנייר אלקטרוני לקריאת עיתון. זהו אב-טיפוס של חברת פלסטיק לוגיק (Plastic Logic) המבוסס על טכנולוגיית המיקרו-קפסולות.

- אתרים מעניינים בתחומי הרטבה חשמלית ונייר אלקטרוני:
- www.liquavista.com - אתר חברת הבת של חברת פיליפס, המייצרת משטחי תצוגה המבוססים על הרטבה חשמלית.
- www.varioptic.com - אתר של חברה צרפתית המייצרת עדשות אופטיות מתכווננות על ידי הרטבה חשמלית.
- www.eink.com - חברה המייצרת נייר אלקטרוני המבוסס על Electrophoretic Display.
- www.ececs.uc.edu/devices/NDL_Research.html - אתר של מעבדת מחקר באוניברסיטת סינסינטי בארה"ב העוסקת במחקר הרטבה חשמלית.
- www.ee.duke.edu/research/microfluidics - אתר מאוניברסיטת DUKE במדינת צפון קרוליינה, ארה"ב. סרטי וידאו יפים של הסעת טיפות באמצעות הרטבה חשמלית.

כל המעוניין בחומר נוסף יפנה אל המחברים לפי הכתובות:
 andelman@post.tau.ac.il, romishamai@gmail.com

המאמר התפרסם לראשונה בגיליון 101 של "גליליאו", ינואר 2007.

תהודה

תודות: המחברים מודים ליורם בורק, רועי בק, דוד ברגמן, משה דויטש, חיים דימנט, דניאל הריז, מיכאל כוגן, אורי נבו, מיכל ומשה סימן-טוב, שמעון רייך, יואב צרי ועדי שפיר על הערותיהם המועילות.