

# "חי מהים", מאת מיקי שטיאסני

חיפה, פברואר 2017

## 1. חמישים השנים הראשונות

נכנסתי בשערי הטכניון בשלהי קיץ 1965 כבחור תאב ידע בן 18, פרשתי בשלהי קיץ 2015 כסבא, כפרופסור אך עדיין תאב ידע כמו בנעורי. אפתח "כמקובל" בתקציר: אלו היו חמישים שנים טובות, רובן אפילו טובות מאוד!

בטכניון רכשתי השכלה מגוונת: תואר ראשון כמהנדס אזרחי (כמו אבלי) ותארים שני ושלישי במתמטיקה שימושית (כלבבי); שמבחינתי התגלו כשילוב מנצח.

המתמטיקה היא כלי העבודה העיקרי שלי, אך לרוב הבעיות בהן טיפלתי יש חשיבות מעשית "פרקטית". העובדה שתחום המחקר העיקרי שלי הוא הידרודינמיקה של גלי-ים, קשורה, כפי הנראה, לחמשת שנות שרותי הצבאי כקצין חיזוי למטאורולוגיה ימית בחיל-הים.

מספר האנשים בארצנו הקטנה שעוסקים בהידרודינמיקה של גלי-ים ברמה אקדמית הוא קטן מאוד, ולפיכך הרגשתי חובה לפרוש את פעילותי על פני היבטים מגוונים של ההידרודינמיקה הימית.

מחקרי בנושאי הים כוללים את הנושאים הבאים:

יצירת גלים על ידי הרוח (4 מאמרים), החפה (6), אדוות (3), צונאמי (6), תהליכים לא-לינאריים בשדה גלים (17), תהליכים אקראיים בשדה גלים (6), גלים עומדים (2), פעולה הדדית של גלים ומבנים (8), פעולה הדדית של גלים וזרמים (3), גלים באוקיאנוס דחיס (3), אוקיאנוגרפיה של חופי ישראל (8).

במשך מספר שנים התעניינתי כ"תחביב" בתורת הפרקטלים ושימושיה לפתרון בעיות הידרודינמיות שונות (6 מאמרים). כמו כן התעניינתי בנגזרות מסדר שבור ושימושיהן למודלים ויסקוטאלסטיים (1) ובקשר בין פרקטלים לנגזרות שבורות (2).

תרומתי הגדולה ביותר היא בהכשרת אלפי סטודנטים במקצועות הבסיסיים "מכניקת זרמים" ו"הידרוליקה", ומספר מאות סטודנטים במקצועות המתקדמים "גלי מים" ו"פרקטלים".

בשנים 9-1997 שימשתי כדיקן הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, ובשנים 2001-1994 כמנהל המכון הישראלי לחקר הנדסה ימית. משני תפקידי אלה, ומעבודה משותפת עם 20 משתלמים (מגיסטרנטים, דוקטורנטים ובת-דוקטורנטים), למדתי רבות על טבע אנוש.

אני אסיר תודה לזוגתי הדסה לבית לוינסקי, שמלווה אותי מאז יומי הראשון בטכניון לפני חמישים שנה, איזה כיף!

## 2. עשרת הגדולים

מבין כ- 80 עבודות שפרסמתי במהלך השנים בחרתי להתייחס ל- 10 מאמרים אשר זכו להד הנרחב ביותר; כלומר, למספר ציטוטים גדול מהאחרים.

יד המקרה הביאה לכך שעשרת-הגדולים כוללים מגוון רחב של נושאים כגון: פעולה-הדדית של גלים ומבנים, יצירת גלים על ידי הרוח, תהליכים לא-לינאריים בספקטראות צרים ורחבים, החפה, וגם מאמר בתחום הוויסקואלסטיות.

מאמרים אלה פורסמו בשנים: 1979 עד 2012.

לכל אחד מהמאמרים בחרתי להביא תרגום עברי של התקציר וגם מעט רקע על נסיבות היווצרותו. את כל המאמרים המלאים שפרסמתי ניתן למצוא באתר <http://stiassnie.net.technion.ac.il> לפי סדר כרונולוגי (כלומר, לפי מספרם באתר), וגם לפי נושאי מחקר ממוקדים.

להלן עשרת-הגדולים לפי סדר הופעתם הכרונולוגי:

**נושא א':** שימוש בנגזרות שבורות לניסוח מודל ויסקואלסטי, מ. שטיאסני 1979.

(מקום רביעי עם 88 ציטוטים, מספר 2.8 באתר).

**תקציר:** שימוש בכלים המתמטיים של נגזרות ואינטגרציות שבורות, מאפשר ניסוח חדש של משוואות חוקה המתארות חומרים ויסקואלסטיים. התנהגות המודל שפותח במבחן דו-שלבי סטנדרטי, נחקרה תאורטית ונמצאה בהתאמה סבירה לניסוי של אחרים.

**פרפראות:** מאמר זה, שאינו עוסק בגלי-מים כלל, פורסם בעת שהייתי בתר-דוקטורנט באוניברסיטת בריסטול. בסמינר לא-פורמאלי שנתתי בבריסטול, ציין בפני מיקל בארי (כיום Sir Michael V. Berry), את הקרבה שיש לנגזרות-שבורות לתחום הפרקטלים, שהיה אז חדש יחסית. הערה זו הובילה ברבות הימים להתעניינותי בפרקטלים ושימושיהם בתאור פני-הים, בבעיות הידרודינמיות, ובכלל; והניבה שמונה מאמרים מדעיים שפורסמו בתקופה 1988-1997.

**נושא ב':** החפה של גלים בעלי אמפליטודה סופית במים שעומקם משתנה לאט. מ. שטיאסני וה. פרגרין (D.Howell Peregrine נפטר ב- 20.3.2007), 1980. (מקום שביעי עם 62 ציטוטים, מספר באתר: 2.11).

**תקציר:** שיירת גלים מחזורית הנעה על מים שעומקם משתנה בכיוון התקדמות הגלים, נחקרת באמצעות פתרונות מדויקים לשיירות גלים בעומק קבוע.

מבחר מייצג של נוסחאות מובא באמצעות דיאגרמות. תוצאה בולטת של החישובים המדוייקים היא שבקרבת הגל הגבוה ביותר קיימים שני פתרונות עבור גל נכנס נתון.

למרות שהפתרון איננו מתאר גלים נשברים, אנו מראים שכאשר עומק המים הולך וקטן מגיעים לנקודה שמעבר לה לא קיים פתרון כלל; ומתייחסים לתופעה זו כסימן לאזור בו הגלים אמורים להשבר.

מגבלות השיטה נדונות והשוואה לניסויי מעבדה של אחרים מוצגת.

**פרפראות:** זוהי אחת משתי עבודות שמסכמות את עבודתי עם האול פרגרין בשנה ששהינו בבריסטול במסגרת הבתר-דוקטורט. ההישג העיקרי בשנה זו היה היוולדו של בננו הצעיר אלי (1979), לשמחתם של אחותו גלי (1973), ואחריו הבכור אריק (1971).

**נושא ג':** התפתחות ארוכת טווח על שיירת גלים לא יציבה. מ. שטיאסני וא. קרושינסקי 1982. (מקום עשירי עם 35 ציטוטים, מספר באתר: 2.15).

**תקציר:** ההתפתחות בזמן-ארוך של שיירת גלים לא-יציבה, המורכבת מגל-נושא ושתי הפרעות צדיות, נחקרת באופן אנליטי. ביטויים מתמטיים עבור מעטפת-הגלים מתקבלים באמצעות פונקציות אליפטיות של יעקובי. הפתרון מניב את ההתנהגות בזמן-ארוך בתלות בהפרעה ההתחלתית. במיוחד ראוי לציין את הנוסחה עבור זמן ההישנות בין מצבי מודולציה וחוסר מודולציה. נוסחה זו מתאימה למתקבל מפתרונות ספרתיים של משוואת שרדינגר הלא-לינארית.

**פרפראות:** עם אורי קרושינסקי ישבתי במשרד בתקופת המגיסטר שלנו בשנים 1970-71 ומאז אנו נהנים מחברות ארוכת שנים. לאורי ולי 3 מאמרים משותפים מהשנים 1979-82. חשוב להזכיר ששנינו תלמידיו של גדעון דגן מורנו הדגול, בעל פרס ישראל.

**נושא ד':** הערה אודות משוואת שרדינגר הלא-לינארית המעודכנת, עבור גלים במים עמוקים. מ. שטיאסני, 1984 (מקום חמישי עם 83 ציטוטים, מספר באתר: 2.17).

**תקציר:** בהערה זו אני מראה שמשוואת זכרוב האינטגרלית מניבה את משוואת שרדינגר המעודכנת עבור המקרה המיוחד של ספקטרום צר.

**פרפראות:** מאמר קצר זה נכתב תוך ימים ספורים בשבתון הראשון שלנו שהיה בבוסטון. עם צ'יאנג מי, המארח שלנו בשבתון, ועם דיק יו שהכרתי אז, כתבתי לימים את הספר "תאוריה ושימושים של גלי-ים" שמהדורתו השלישית יוצאת לאור ב-2017.

**נושא ה':** על עידכונים של משוואת זכרוב לגלי-מים. מ. שטיאסני ול. שמר, 1984. (מקום שני עם 135 ציטוטים, מספר באתר: 2.18).

**תקציר:** משוואת זכרוב האינטגרלית לגלי-מים מורחבת להכיל יחסי-גומלין מסדר גבוה-יותר, (בין חמשיות גלים), במים עם עומק קבוע (סופי, או אינסופי). המשוואה החדשה שמתקבלת משמשת לחקירת היבטים מסוימים של אי-יציבויות מטיפוס אחד (4 גלים), ומטיפוס שניים (5 גלים) של גל סטוקס.

**פרפראות:** בכנס בדלפט בחורף 1982, ציין מדען דני בשם סקובגורד את התרשמותו העמוקה ממאמר סקירה ארוך של יואן ולייק אודות גלים לא-לינאריים, ובעקרה את התאוריה של המדען הרוסי זכרוב שנדונה בסקירה בצורה יסודית. בבואי לשבתון הראשון בבוסטון החלטתי ללמוד את הגישה של זכרוב לעומק, נושא שהפך לציר מרכזי בפעילותי המדעית לאורך שנים רבות. תודתי לסקובגורד, ליואן ולייק וכמובן לזכרוב.

**נושא ו':** חישובי אנרגיה עבור התפתחות אי-יציבויות מטיפוס I ומטיפוס II עבור גלי-סטוקס. מ. שטיאסני ול. שמר, 1987. (מקום שמיני עם 54 ציטוטים, מספר באתר: 2.23).

**תקציר:** משוואת זכרוב המעודכנת משמשת לחקירת ההתפתחות המשולבת של הפרעות מטיפוס I עם טיפוס II, עבור גל-כובד במים שעומקם אינסופי. בניגוד להתפתחות של טיפוס יחיד (I או II), ההתפתחות המשולבת אינה מחזורית. פרט למקרים של גלים מאוד תלולים, הרכיבים של טיפוס I מתגלים כגוברים על אלה של טיפוס II. חישובי אנרגיה מראים שההמילטוניאן של שדה-הגלים הוא כמעט קבוע. לפיכך משוואת זכרוב, ומשוואת זכרוב המעודכנת מהוות קרובים עקביים של בעיית גלי-המים המקורית.

**פרפראות:** כפי שכבר סיפרתי התעניינותי בתורה של זכרוב התחילה בשבתון בבוסטון. הנושא והרחבותיו מורכב למדי ודורש כישורים לפיתוחים מתמטיים ארוכים, ולכך טובים השניים מהאחד.

למזלי הרב מצאתי שם שותף מעולה בשם לב שמר מתל-אביב, שאת ההיכרות ביננו עשה אליעזר קיט ערב צאת שנינו לבוסטון. החברות עם לב ושיתוף הפעולה שהחל אז הם אחד הדברים הטובים ביותר שקרו לי במהלך השנים. ככלל העבודה המדעית מאפשרת כר נרחב לפעילות משותפת, התורמת ליצירת חברויות לכל החיים.

**נושא ז':** מודל אנליטי מפושט של שובר-גלים צף במים עם עומק סופי. נ. דרימר, י. עגנון, ומ. שטיאסני, 1992. (מקום שלישי עם 93 ציטוטים, מספר באתר: 2.28).

**תקציר :** בעבודה זו נחקרים הביצועים של שובר-גלים צף מטיפוס קופסא. היישום של הנחה מפשטת עבור הזרימה מתחת לקופסא מאפשר פתרון אנליטי לבעיית-זרימה לינארית ודו-מימדית. בהשוואה בין הפתרון האנליטי לבין פתרון נומרי של הבעיה הלינארית המלאה, מתגלה התאמה טובה עבור טווח רחב של פרמטרים.

**פרפראות :** מאמר זה הוא תוצאה של עבודת המגיסטר של נתאי דרימר בהנחיה משותפת של יהודה עגנון ושלי. מעניין לציין כי שלושתנו יוצאי חיל-הים, אך רק נתאי ויהודה הם יורדי ים של ממש. עם חברי יהודה ונתאי פרסמתי ברבות השנים עשרה וארבעה מאמרים, בהתאמה. היה תענוג לעבוד איתם.

**נושא ח' :** התפתחות לא-לינארית במהלך החפה חד-ממדית של שדה גלים. י. עגנון, א. שרמת, ג' גונסלבס, ומ. שטיאסני, 1993. (מקום שישי עם 77 ציטוטים, מספר באתר : 2.29).

**תקציר :** במאמר מפותחת משוואה לא לינארית המתארת את תהליך ההחפה ממים עמוקים למים רדודים. שיפוע הקרקעית נלקח כקטן או כשווה לתלילות-הגל, וההחזרה מהחוף מוזנחת. המשוואה מכילה איברים ריבועיים המתאימים לפעולה הדדית של שלישיות גלים; ובמים רדודים היא דומה למשוואת בוסניקס. בדיסקרטיזציה של הספקטרום ובהנחה של מצב-תמידי, הבעיה מותמרת לבעיית ערך-שפה. עבור מקרה זה חושבו פתרונות הנותנים את הגלים הארוכים (התת-הרמוניים) לספקטרום מלא. התוצאות החישוביות הושו ונמצאו בהתאמה טובה לניסויי מעבדה ולניסויי שדה של אחרים.

**פרפראות :** על נושא זה התחלתי לעבוד עם גונסלבס בעת שבתון-קיץ בדרום-אפריקה בקיץ 1990, אך לא הגענו לתוצאות שהשביעו את רצוני. הנושא קבל טיפול מחודש בעבודת המגיסטר של שרמת בהנחיה משותפת של עגנון ושלי, והמאמר הנוכחי הוא תוצאה מוצלחת של מאמץ זה. יותר מאוחר, עגנון בטכניון ושרמת בפלורידה הפכו למומחים בינלאומיים מובילים בתחום של גלים במים-רדודים. ואני כמעט וזנחתי תחום זה, למעט מאמר 3.5 עם שרמת ב-1996, ומאמר 2.44 עם דרימר ב-2006.

**נושא ט' :** על החספוס הגבולי של פני-הים ברוחות חזקות מאוד. מ. דונלן, ב. האוז, נ. ראול, ו. פלנט, מ. שטיאסני, ה. גרבר, א. בראון וא. זלצמן. 2004. (מקום ראשון עם 491 ציטוטים, מספר באתר : 2.41).

**תקציר :** החיכוך האוירודינמי בין האוויר לים הוא מרכיב חשוב במאזן התנע בעת התפתחות ציקלונים טרופיים. מדידות של מקדם הגרר, הקושר את המאמץ המשיקי בין הרוח למים למהירות הרוח ולצפיפות האוויר, הניבו תוצאות

מהימנות עבור רוחות חלשות מ- 20 מטר לשניה. עבור רוחות אלה מוסכם שמקדם הגרר (או באופן שקול, "החספוס האווירודינמי") גדל עם עלית עוצמת הרוח. האם מותר להניח שמגמה זו נמשכת גם ברוחות חזקות מאוד, מעל 30 מטר לשנייה, כמו בהוריקאנים? המאמר הנוכחי מנסה לספק מענה לשאלה זו, תוך שימוש בניסויי-מעבדה עם רוחות קיצוניות, ומגיע למסקנה שהחספוס האווירודינמי שואף לערך גבולי עבור רוחות חזקות, תופעה שניתנת להסבר משיקולי מכניקת-זורמים בסיסיים.

**פרפראות:** מאמר רב משתתפים זה הוא תוצר של השבתון שלי במיאמי, ותרומתי בו צנועה למדי. עקר הקרדיט מגיע למרק דונלן. במהלך שבתון זה הבנתי כי הידע הקיים בנושא החשוב של יצירת גלים על ידי הרוח רחוק מלהיות מספק, והחלטתי שעלי לנסות את כחי גם בתחום זה. תוכנית זו הניבה בסופו של דבר שלושה מאמרים נוספים בשנים 2005, 2008 ו-2012 (שמספרם באתר: 2.45, 2.47 ו-2.54 בהתאמה), אך לטעמי המצב עדיין אינו מספק.

**נושא י':** על מצב תמידי בתהודה מלאה של גלים מתקדמים במים עם עומק סופי. ד. שו, צ'. לין, ש. ליאאו ומ. שטיאסני, 2012. (מקום תשיעי עם 36 ציטוטים, מספר באתר: 2.56).

**תקציר:** המאמר מראה שקיימים פתרונות מדויקים של מספר גלים-מתקדמים המתקיימים בו-זמנית במצב תמידי. כלומר, כל גל שומר על כל הפרמטרים שלו כגון: אמפליטודה, תדירות ומספר גל, ואינו מושפע כלל מהגלים האחרים, למרות שהם נמצאים בתנאי תהודה של רבעיות גלים.

**פרפראות:** זהו מאמר שנשלח אלי לסקירה על ידי כתב העת, ורובו עוסק בטכניקה מתמטית חדשה שפותחה על ידי ליאאו, ובישומה למציאת פתרונות חדשים לגלי-מים. לביקורת החיובית שלי צרפתי מסמך מפורט בו הראתי כיצד ניתן לקבל פתרונות אלה גם ממשואת זכרוב. המחברים המקוריים שכללו את המנחה ליאאו ושניים מתלמידיו וגם עורך כתב העת הציעו לי להצטרף כמחבר למאמר. תרומתי העיקרית מצויה בנספח מפורט שעל החשובים שבו עבדתי בשיתוף עם הדוקטורנטית הסינית דלי שו דרך הרשת. לימים פרופסור ליאאו בקרני בטכניון וד"ר שו באה לעשות אתי את הבתר-דוקטורט שלה, (אכן, עולם קטן).

כישראלי שחי כל חייו לחופו של הים-התיכון וששרת בצה"ל בשנים שמפרץ-אילת ומפרץ-סואץ היו חלק מישראל ה"גדולה", הקדשתי חלק מזמני המקצועי לחקר הים-התיכון והים-האדום. זאת בעיקר בעת שרותי הצבאי ובשנים הראשונות לאחר מכן, אך גם בתקופת כהונתי כמנהל המכון הישראלי לחקר הנדסה ימית. פעילותי זו תועדה בדוחות ובפרסומים מדעיים, אשר מטבע הדברים לא זכו לציטוט רב. חלק מפעילות זו יקרה ללבי מאוד ולכן החלטתי לפרט מעל אודותיה. הגעתי למרכז-החיזוי המטאורולוגי של חיל ים לאחר סיום עבודת המגיסטר בטכניון ושמתי לי כמטרה לשדרג את שיטות חיזוי הגלים שהיו מרכיב עקרי בתחזית. בשנים מאוחרות יותר השתדלתי לסייע בשדרוג שיטות חזוי-הגלים גם בשרות המטאורולוגי הישראלי. נושא זה מגובה במאמרים מדעיים מהשנים 1978, 1979, 1981 וגם 2000, (מספרם באתר: 2.5, 2.7, 2.14, 3.9, בהתאמה). האחרון נכתב בעת כהונתי כמנהל המכון הישראלי לחקר הנדסה ימית, בשיתוף עם יוחנן קושניר מאוניברסיטת קולומביה, שהיה מפקדי בחיל הים שנים רבות קודם לכן.

בשנים 1973-1974 התעניינתי בחישובי גאות ושפל בחופי ישראל ובהקשר לכך גם פתרתי מודל מתמטי לחיזוי הזרמים בתעלת סואץ.

הזרמים על מדף היבשת הישראלי מהווים מידע תיכנוני חשוב, אותם חקרתי יחד עם תלמידי צבי רוזנטראוב ודמטרי קוניצה, נושא שסוכם בפירסום מספר 2.42 משנת 2004 וזכה לשישה ציטוטים.

לאחרונה, בשנת 2012 (מספר 2.53 באתר), בשיתוף עם המגיסטרנט יהושוע טוביאס, פרסמנו אומדנים לעצמת גלי הצונאמי הצפויים בחופנו הים-תיכוני, מאמר שזכה לצערי לציטוט אחד בלבד!!

בימים אלה אני מוטרד מההשפעות הנלוות הצפויות מעלית פני הים, הכוללות: כמובן שינוי במיקום קו החוף, הסטה מזרחה של הפן הבייני, ועלית מפלס מי-תהום שלה השלכות על יסודות המבנים. נושאים אלה וההתמודדות עימם ראויים למחקר מעמיק, ויפה שעה אחת קודם. שוטי, שוטי ספינתי....