

עלון

אישח"מ

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 3

מרץ 2000

עורך: דן גבעולי, הפקולטה להנדסת אירונותיקה וחלל, טכניון, חיפה 32000, טל. 8293814 (04), פקס 8231848 (04), דואר אלקטרוני: givolid@aerodyne.technion.ac.il
חברי ועד אישח"מ: עמנואל אור, מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף (נשיא), מישל ברקוביה, דן גבעולי (נציג ב-IACM), יצחק הררי (מנהל אתר האינטרנט), זוהר יוסיבש (מזכיר-גזבר).
אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.eng.tau.ac.il/~harari/IACMM/iacmm.html>
רישום לחברות באגודה ופרטים נוספים: באתר האגודה הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, ד"ר זוהר יוסיבש, המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר שבע 84105, טל. 6477103 (07), פקס 6472813 (07), דואר אלקטרוני: zohary@pversion.bgu.ac.il

דבר העורך:

מעתיק יש בדעתנו לפרסם שני גליונות בשנה. נא שלחו לכתובת המערכת (בדואר אלקטרוני או רגיל) חומר לפרסום בעלון. ניתן ורצוי לצרף ציורים ותמונות. לידיעת חברות - ניתן גם לפרסם חומר מסחרי- פרסומי בתשלום. לפרטים נא לפנות למערכת.

דבר הנשיא:

שני העלונים הראשונים של האיגוד נערכו ע"י זוהר יוסיבש. לרגל חילופי בעלי התפקידים (זוהר נתמנה כמזכיר-גזבר ודן גבעולי כעורך העלון), ברצוני להודות לזוהר על המאמץ הרב שהשקיע בעריכת העלון ולאחל לשניהם הצלחה מלאה בתפקידיהם החדשים. עלון מס' 3 נערך במתכונת חדשה וכולל אפילו תשבץ (נראה שהתשובות לתשבץ זה אינן תלויות ב"גודל הסריג..."). אני פונה בקריאה לחברי אישח"מ לתרום מכישוריהם וממרחם לעיצובו של עלון זה, למשל ע"י כתבות, עדכונים מקצועיים, דיווח על קידומים של חברי האיגוד (לאו דוקא בסגנון רחל המרכלת...), מכתבים למערכת, יצירת פורום לדיון בבעיות חישוביות שלא נמצא להן פתרון וכו', להפיץ את דבר האיגוד בין עמיתיהם, ולנסות לגייס חברים נוספים לאיגוד.

יום העיון האחרון של אישח"מ

ISCM-8 התקיים בינואר 2000 באוניברסיטה העברית בירושלים, ואורגן ע"י מישל ברקובייה. יום העיון כלל הרצאות בנושאי מכניקה חישובית שונים, והיה מעניין ביותר. בפתחה, זוהר יוסיבש נשא דברים מרגשים לזכרו של פרופ' ברנרד שיף ז"ל. הרצאות מוזמנות מרתקות ניתנו ע"י שרה יניב מתע"ש (על חישובי זרימה במנוע דלק מוצק של טיל) ופנחס בר-יוסף מהטכניון (על אלגוריתם השולט על תנועת רשתות). שש הרצאות נוספות ניתנו ע"י חוקרים וסטודנטים. את יום העיון חתמה לומדה (tutorial) מעניינת ולא-פורמלית שנתן מישל ברקובייה על NURBS. המשתתפים הלא-ירושלמים ביום העיון חשו שמאמץ ההגעה לבירה היה כדאי בהחלט למרות הקור העז ששרר בחוץ.

תוצאות תחרות ההרצאות

בתחרות שכללה הרצאות שניתנו בשני ימי העיון האחרונים זכה מר ישי רינת, שהרצה על עבודתו לתואר שני בטכניון. מר רינת יסע לברצלונה בספטמבר 2000, בתמיכת אישח"מ,

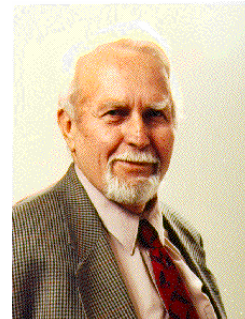
לייצג את האיגוד בכנס ECCOMAS. זהו כנס בינלאומי של האיגוד האירופי למכניקה חישובית (שאישח"מ משויך אליו). במקום שני זכתה ט. מצקביץ, סטודנטית לתואר שני באוניברסיטה העברית. גב' מצקביץ זכתה בחברות חניס באישח"מ לשלוש שנים. על הזוכים החליטה ועדה שכללה ארבעה שופטים. פרטים נוספים ניתן למצוא באתר אישח"מ.

יום העיון הבא של אישח"מ

ISCM-9 יערך בטכניון באחד מימי השבוע המתחיל ב- 22.10.2000. פרטים מלאים יפורסמו במהלך החודשים הבאים.

מזכרונותיו של א. זינקביץ'

הקטע הבא הוא תרגום חופשי לעברית (ע"י העורך) של חלקים מנאמו של פרופ' O.C. Zienkiewicz (א. זינקביץ') בטקס בו קיבל את "מדליית טימושנקו" על מפעל חייו בתחום המכניקה החישובית. הטקס התקיים ב- 1998 במסגרת כנס של ASME. הנאום פורסם במקור בעלון Applied Mechanics Division Newsletter (AMD) שיצא לאור ע"י ASME בקיץ 1999. המאמר מפורסם כאן ברשות ובאדיבות ASME/AMD. פרופ' זינקביץ' הוא אחד מהמפתחים הראשונים והידועים בעולם של שיטת האלמנטים הסופיים, העובד באוניברסיטת Wales Swansea שבבריטניה. ספריו ועבודותיו על אלמנטים סופיים ידועים לכל מהנדס וחוקר בתחום.



ההתחלות

הפתרונות הראשונים בשיטת הפרשים הסופיים של משוואות האלסטיות הופיעו בעבודה של רונגה ב- 1908 ושל ריצ'רדסון ב- 1910. האחרון פתר את בעיית פילוג המאמצים בסכר, נושא שהיה בעל עניין רב בזמנו עקב הבנייה של סכר אסואן במצרים. אכן, במשך אותה תקופה, התגלה קושי וחוסר עקביות בשימוש בקרובי "הקורה השלוחה" הסטנדרטיים שהיו נהוגים באותה תקופה עבור סכרים, והיה צורך ברור באנליזה אלסטית מלאה על מנת לפתור את הבעיה.

פרופסור פיפרד – מנחה הדוקטורט שלי – הציב בפני את האתגר למצוא פתרון מאד מדויק לבעיה הנ"ל. לבסוף הצלחתי בכך וב- 1945 הגשתי את התיזה שלי, שכללה פתרון לבעיה זו ואחרות עם

רשתות הרבה יותר עדינות מזו שהשתמש בה ריצ'רדסון.

כפי שידוע היטב, מערכות מבנים דיסקרטיות, המהוות את הבסיס עבור כל המהנדסים האזרחיים והאווירונאוטיים העוסקים במבנים, ניתנות לניסוח בשיטת "התזוזות" או בשיטת "הכוחות". הראשונה מהשתיים היא פשוטה וישירה, למרות שידוע היטב שהשנייה (שיטת הכוחות) גם כן שימושית במקרים פשוטים רבים. קשה לומר מי ניסח לראשונה את גישת התזוזות (או הקשיחות). אין ספק שהשיטה היתה ידועה היטב בראשית המאה והיתה כלולה בתוכנית הלימוד של מהנדסים בשנות ה-30. בגישה זו מקדמי הקשיחות חושבו לכל אלמנט מבני, וע"י חיבור פשוט של מקדמים אלו התקבלה מערכת משוואות. רעיונות מטריציאליים היו שימושיים בתהליך זה וסיפקו קיצור דרך. פרייזר, דונקן וקולר היו כנראה הראשונים, בשנות ה-30, שהשתמשו במטריצות לבעיות כאלו בהנדסת מבנים בתעשייה האווירונוטית.

הפרוצדורות בהן השתמשו בגישת הקשיחות היו זהות עבור מערכות הנדסיות רבות אחרות, למשל במערכות צינורות או ברשתות חשמליות. לפיכך ראוי לדבר על *מערכת דיסקרטית סטנדרטית*, וניתן להבחין בספרות במעבר מהיר של רעיונות מתחום אפליקציה אחד למשנהו.

באותה התקופה היתה נטייה לייחס משמעות פיסיקלית-מבנית למשוואות הדיסקרטיות. למשל, משוואת פואסון שייצגה דפורמציה של ממברנה מתוחה, קיבלה לאחר דיסקרטיזציה של הפרשים סופיים משמעות של דפורציה של רשת מיתרים מתוחים. לרשת מיתרים זו התייחסו כאל *מבנה*, שניתן לנתחו בעזרת אותן פרוצדורות בדיוק שבהן השתמשו עבור מבנים אמיתיים.

מעניין לשים לב שאינטרפרטציה פיסיקלית כזו של משוואות הפרשים סופיים, עבור אלסטיות, פותחה באותו זמן באופן בלתי תלוי בארה"ב. תנאי הסודיות של המלחמה, ועקב כך ההגבלות שחלו על חילופי מסמכים, מנעו מארה"ב לדעת על ההתפתחויות באנגליה. מהנדסים בשתי הארצות אהבו את הצורה הפיסיקלית שבה מפרשים את המשוואות ואת תנאי השפה (שגם הם היו פיסיקליים טהורים). צורת מחשבה זו היתה הגישה שהובילה למושג *אלמנטים סופיים*.

במאמר קלאסי מ- 1956, טרנר, קלף, מרטין וטופ הציגו את הרעיון של חלוקת הרצף ישירות לאלמנטים בעלי צורה שרירותית והראו כיצד לחשב את הקשיחות שלהם. השם "שיטת האלמנטים הסופיים" נקבע רק ב- 1960, במאמר של ריי קלף (Clough). בעבודה זו הוצגו מודלים פיסיקליים בצורה מאד מפורשת, וכך נמנעה לחלוטין כתיבת משוואות דיפרנציאליות או משוואות הפרשים.

הרבה יותר מאוחר שיטת האלמנטים הסופיים בוססה על שימוש בפרוצדורות וריאציוניות או בשארית-משוקללת מסוג גלוקין לקרוב המשוואות הדיפרנציאליות שמתארות את הרצף. אגב, יש להעיר שהמתימטיקאי קורנט עשה זאת הרבה יותר מוקדם, ב-1943, עבור משוואת פואסון. קורנט הציע את מה שמכונה היום אלמנט משולש לינארי, שפותח ע"י קלף ב-1956 עבור אלסטיות. אולם מכיוון שקורנט היה מתימטיקאי, הוא לא ראה צורך לחפש פירוש פיסיקלי. זו אולי הסיבה שעבודתו "התגלתה" מספר שנים לאחר שמהנדסים רבים כבר השתמשו באושר בשיטת האלמנטים הסופיים לפתרון בעיות המבנים שלהם.

נהערת העורך: אני חולק על פרופ' זינקביץ' בנקודה זו. מאמרו של קורנט כן מתייחס להיבט הפיסיקלי – פיתול סאן ונאן. הסיבות לכך שעבודתו לא יצרה בזמנה הדים בקהיליית המהנדסים היו שתיים: (1) בשנת 1943 לא היו מחשבים ואיש גם לא חלם עליהם, כך שעבודתו של קורנט נראתה אז בלתי מעשית כי דרשה חישובים ידניים מפרכים, (2) היה נתק בין הספרות המתימטית שבה קורנט פרסם את מאמרו לבין הספרות ההנדסית, נתק שאגב קיים במידה לא מעטה גם כיום, ומאיט את ההפרייה ההדדית של שתי הקהילות.

מדוע שיטת האלמנטים הסופיים כל כך מצליחה?

אין ספק שזוהי הגישה האינטואיטיבית של אלמנטים סופיים שעושה את השיטה כל כך פופולרית כיום. כאשר בסוף שנות ה-50 פגשתי את ריי קלף ובפעם הראשונה נחשפתי לרעיון שלו של חלוקת הרצף ל"חתיכות פיסיקליות", הפרוצדורה לא מצאה חן בעיני. חשבתי ששיטות הפרשים סופיים תהיינה יותר נוחות ומדויקות. יחד עם זאת, הסכמתי שקיימת בעייה אחת הדורשת פתרון – זו של קליפות בעלות צורה שרירותית, שהיה צורך בפתרונה באותם הימים עבור בניית סכרים קשתיים ועבור סיפוק הדמיון של ארכיטקטים.

ריי ואני הסכמנו שבנושא זה אלמנטים סופיים יהיו שימושיים מאד: על מנת לייצג את משטח הקליפה יש להשתמש באוסף של אלמנטים שטוחים קטנים, בעלי צורה מלבנית או משולשת. עבור פורמולציית אלמנטים סופיים מסוג זה, הקשיחויות במישור כבר פותחו, וניתן היה להוסיף בקלות את קשיחות הכפיפה בהתבסס על תורת הטבלות הדקות של קירכהוף.

על בעיות אלו הסטודנטים של ריי ושלי בילו זמן רב במשך תחילת שנות ה-60. עד 1965 שתי הקבוצות הצליחו למצוא ניסוחים מתאימים עבור טבלות משולשות. שנתיים מאוחר יותר הן הצליחו לפתור קליפות עם צורה שרירותית. מידול קליפה דקה בעזרת פסאטות שטוחות התגלה כמתכנס למרות מספר פשעים וריאציוניים שבוצעו בדרך. אך תגליות אלו הועמו ע"י התפתחויות שארעו במקביל.

עמיתי ברוס איירונס (Irons) ואני פתחנו ב-1965 את הפתרון התלת-מימדי הראשון תוך שימוש באלמנטים מסדר גבוה, שהיו יכולים להיות עקומים

בזכות מיפוי איזופרמטרי. ע"י שימוש באלמנטים דקים מסוג זה, ניתן היה לייצג כל טבלה או קליפה מבלי שהדבר יהיה כרוך במאמץ על-אנושי להשגת רציפות C1 או לאכיפת ההנחות של תורת הטבלות או הקליפות.

התפתחות זו הובילה לכך שעד סוף העשור בעיית הטבלה והקליפה הדקה נעלמה, וכיום היא בעיקר בעלת עניין הסטורי. אך קשיים רבים עדיין נשארו לקבלת ניסוח רובסטי. לא אכנס כאן לפרטים, אך אציין שכל הקשיים האלה נפתרו עד אמצע שנות ה-80. נהערת העורך: אני בטוח שמהנדסים וחוקרים רבים לא יסכימו עם קביעה זו!

האם אינטואיציה או מתימטיקה אחראית להצלחה של התפתחות זו? מי יודע? אך ללא שימוש נכון ומדויק במתימטיקה הטיפול במבנים דקי דופן לא היה קיים כיום. כמו כן, פיתוח גישות פתרון דומות לשטחי הנדסה חדשים כגון מכניקת הזרמים או אלקטרומגנטיות לא היה אפשרי.

לאן עכשיו?

עובדה ידועה לרבים היא ששיטת האלמנטים הסופיים היא מקרה פרטי של גישת השארית המשוקללת. ההבדלים בין סכימות הקרוב השונות שבשימוש כיום הם בבחירת פונקציות הקרוב או המשקל. הרבה מהמחקר כיום מתרכז במציאת סכימות יותר טובות ועיליות. פון קרמן אמר: "המדען חוקר את מה שישנו, המהנדס יוצר את מה שעדיין איננו". בודאי שיש צורך בשיטות אנליזה יעילות יותר כדי לתכנן את "מה שעדיין איננו".

צ'רלס ה. דואל, ראש משרד הפטנטים האמריקאי ב-1899 אמר ש"כל מה שניתן להמציא כבר הומצא". אני לא שותף למבט פסימי זה ואני סבור שנראה התפתחויות מלהיבות רבות בשנים הבאות. ברור שגם אנשי המכניקה השימושית וגם המתמטיקאים ימשיכו לתרום לתחום המכניקה החישובית. יחד עם זאת, יש לי הסתייגויות

מהתנבאויות על העתיד, במיוחד משום שאלו עלולות להביא לטעויות כמו הטעות המפורסמת של תומס ווטסון, יו"ר IBM ב-1943. הניבוי שלו היה: "אני חושב שיש שוק עולמי לחמישה מחשבים אולי". מתחרה רציני לניבוי כושל זה הוא ניבוי של המדען הבריטי המפורסם לורד קלווין, אשר אמר: "מכונות מעופפות כבדות-מהאוויר הן בלתי אפשריות". אולי שתיקה בענייני חיזוי העתיד היא זהב – ולכן אעצור כאן.

תשבץ אישה"מ

	5		4	3	2	1		
8		7						6
		10				9		
		12						11
	13							
	18		17		16		15	14
		22	21			20		19
						23		
	26						25	24
		28						27
			30					29

מאונך :

1. יחידה בסיסית בשיטה נומרית מפורסמת
2. כמות החום העוברת דרך משטח
3. על שמו קרוי תהליך איטרטיבי מפורסם
4. סיוטו של כל תכניתן
5. חוקר ידוע של שיטת האלמנטים הסופיים
6. רב-מעבדים (מחשב)
7. דרוש לייצר אותה בשיטות נומריות רבות
8. סוג של חשבון המתאר שינויים
15. מוניטור הפוך
16. מבנה מוטות הפוך
17. קירוב סופי של נגזרת
20. סוגי אלמנטים נוספים בעתיד
22. תחילית נפוצה לשם הולנדי
24. באנליזה דינמית אסור לו להיות גדול מידי
25. . . . שייכות הזכויות על השיטה הזו?
26. ביצע assembly, הרכיב
28. התחלה של פוסט קריסה

מאוזן :

1. חלון (window)
6. שיטה רבת סריגים
9. בצעו טרנספורמציה
10. סדר דיוק של אינטגי טרפז
11. בדק (למשל תוכנה)
12. נכון ורלוונטי (למשל טיעון)
13. גג אנגלי מעל לאות
14. פיגור אנגלי בזמן
16. קרא למשהו בשם (כתיב חסר)
18. מקדם פואסון הפוך
19. כל אלגוריתם צריך להיות כזה
21. הוא חילק באפס ו... את המחשב
23. תוכנית אלמנטים סופיים ידועה
24. פעולת מפוי המציאות לנייר (כתיב חסר)
26. מאיכות מעולה
27. מה שפועל על מבנה (כתיב חסר)
28. הוציא מכלל אפשרות
29. תכונה רצויה של כל שיטה נומרית
30. משותף לאלמנט ולהפרש

פתרונות יש לשלוח לעורך. הפתרון ושמות הפותרים נכונה יפורסמו בגליון הבא. המערכת תקבל בברכה הצעות לחידות ושעשועים נוספים בתחום המכניקה החישובית.