

# עלון

## אישישח"מ

### עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 29

ספטמבר 2013

**עורך:** זהר יוסיבאש, המחלקה להנדסת מכונות, אוני' בן-גוריון בנגב, באר-שבע 84105,

טל. 6477103 (08), פקס 6477101 (08), דואר אלקטרוני: [zohary@bgu.ac.il](mailto:zohary@bgu.ac.il)

**חברי ועד אישח"מ:** עמנואל אור, מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי (נשיא),

יצחק הררי, עמיאל הרשגה (מזכיר-גזבר), יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבאש

**איש-קשר עם ECCOMAS:** מישל ברקובייר

**ועדת ביקורת:** משה איזנברגר ושמואל קידר

**אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט:** <http://www.iacmm.org.il>

**רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים:** באתר האיגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר,

ד"ר עמיאל הרשגה, טל. 8183709 (04), פקס 8183723 (04), דואר אלקטרוני: [amiel@iec.co.il](mailto:amiel@iec.co.il)

#### מ-"שולחן העורך":

בכל פעם, הנני פונה ומעודד אתכם לשלוח אלי בדוא"ל רעיונות לכתבות, נושאים שהייתם מעוניינים שיופיעו, או תגובות לפרסום על כתבות שכבר הופיעו בעבר. ניתן ורצוי לצרף איורים ותמונות. ניתן גם לפרסם חומר מסחרי- פרסומי בתשלום.

אני מבקש להודות לפרופ' ראמי חג'-עלי מאוני' ת"א על הענותו לחיבור הכתבה המעניינת בעלון זה המבוססת על הרצאתו ביום העיון האחרון של האיגוד.

אנא בקרו באתר האיגוד <http://www.iacmm.org.il>, בו מידע על האיגוד ועל מכניקה חישובית בארץ ובעולם. באתר תוכלו לצרף עצמכם (ללא תשלום) לרשימת התפוצה האלקטרונית, להירשם כחברים באגוד או לחדש את חברותכם. טופס רישום ניתן למצוא ב- <http://www.iacmm.org.il/member>

יום העיון ה-34 שנערך באפריל 2013 באוני' תל-אביב אורגן ע"י פרופ' חג'-אלי, פרופ' קרילוב ופרופ' הררי מביה"ס להנדסה מכנית באוני' תל-אביב והיה פורה ומעניין.

#### ISCM-35

יום העיון ה-35 יתקיים ב-10 באוקטובר, 2013, באוניברסיטת בן-גוריון (המארגן הוא פרופ' זהר

יוסיבאש). המרצה המוזמן הוא Prof. Leszek Demkowicz, מאוניברסיטת טקסס, ארה"ב וכותרת הרצאתו:

Discontinuous Petrov Galerkin Method (DPG) with Optimal Test Functions – נוספים – ראו באתר האיגוד ובהודעות לתפוצה.

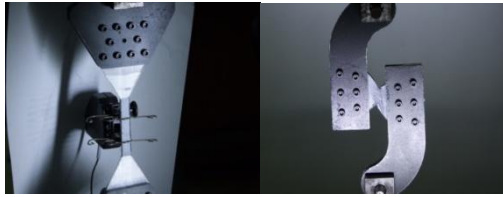
#### מודל רב-סקאלות של חומר מרוכב שכבתי ליישום בסימולציות של פגיעה באליסטית

**ראמי חג'-עלי, שאול מוסטקי, רמי אליאסי**

**הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת תל-אביב, רמת-אביב**

תעשיות בטחוניות ואזרחיות מגלות עניין גובר בשימוש בחומרים סופגי אנרגיה קלי משקל ליישום במערכות מיגון. חומרים מבוססי סיבים פולימריים חזקים דוגמת Dyneema, Kevlar, Spectra, Aramid מצאו את דרכם לאפליקציות מיגון רבות תודות לתכונות המכאניות המשופרות שלהם במתיחה, שמאפשרות ספיגת אנרגיית פגיעה בצורה יעילה. חומרים מרוכבים אלה נמצאים בשימוש מוגבל בתעשייה מאחר ואינם מאופיינים מכאנית לרמה הסופית. כלומר, תכונותיהם המכאניות ידועות עד לרמה מסוימת, מכיון שהם

למניעת החלקה בזמן המתיחה. גישה דומה יושמה בניסויי הגזירה בתוך המישור (איור 2).



**איור 2 – ניסויי מתיחה (שמאל) וגזירה במישור IP(In-Plane)**

לאחר חקירת תגובת החומר לעמיסות השונות, ניתן לסכם את תכונותיו כדלהלן:

- קשיחות וחוזק מתיחה גבוהים IP, לעומת תכונות חלשות בהרבה בלחיצה IP.
- התנגדות גבוהה ללחיצה מחוץ למישור OOP
- התנגדות לגזירה IP נמוכה מזו שב-OOP.
- רגישות גבוהה לדלמיניציה עקב חיבור בין שכבתי חלש יחסית.
- תלות בקצב עיבור, התנהגות אלסטית לא ליניארית בתוך המישור.
- אינרסיות, מקדם חיכוך נמוך ומקדם הולכה תרמית נמוך.

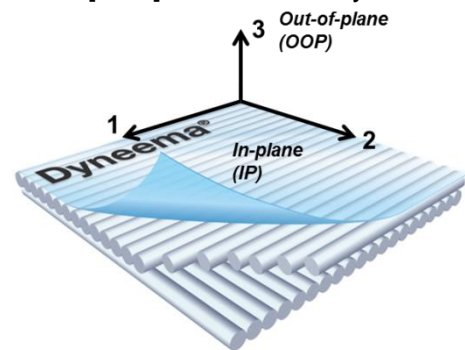
### **הירארכיית המודל ויישומו באנליזות FE**

מודל ה-FE מורכב מאלמנטים תלת מימדיים בעלי נק' אינטגרציה בודדת (C3D8R). כל נק' אינטגרציה מיוצגת ע"י מודל ה-sublinate, שמישום באמצעות שגרה חיצונית-VUMAT. הקוד לתכנית נכתב ב-Fortran, תכנת ה-FE היא Abaqus/explicit. במהלך האנליזה כל נק' אינטגרציה בכל צעד זמן שולחת את אינקרמנט העיבורים ומצב המאמצים הנוכחי ל-VUMAT, ומחושב מצב המאמצים הסופי בנקודה, בנוסף מחושב מצב המאמצים והעיבורים בכל תת שכבה וכן הנזק וכשל במידת הצורך.

### **מבנה מודל התת-ליווח - sublinate**

כל נק' בחומר מיוצגת ע"י תא יחידה מחזורי של תת-ליווח המורכב משכבות אורתוטרופיות [0] ו-[90] בעלות תכונות זהות, הנגזרות מתכונות הסיב, המטריצה, והשבר הנפחי של כ"א מהפאזות. בין השכבות מצויה שכבת ממשק בעלת עובי אפסי עם קשיחות גבוהה מחוץ למישור ונמוכה בתוך המישור, ע"מ ליישם רציפות הטרחות. שתי מטרות למודל התת-ליווח. הראשונה, לחשב את טנזור הקשיחות האיפקטיבית של תת-ליווח מחזורי מיוצג ע"י תאור מתמטי למבנה חומר תלת-מימדי אנאיזוטרופי עם רצף. על כן, מודל זה מאפשר השימוש באלמנטים סופיים תלת-מימדיים לתיאור המבנה תחת העמסה. המטרה השנייה, היא לאפשר פיתוח וישום מודל נזק של הפרדה בין השכבות או כשל במישור השכבה. לתאר את השינוי בקשיחות האיפקטיבית בעיקבות זיהוי מצב של כשל. המודל המוצע מהווה פשרה הולמת בין שני צרכים מנוגדים של רזולוציה בתיאור התת-מבנה המחזורי ורמת עידון מספקת (עד לרמה של מיקרו). במודל זה מנגנוני הכשל מיוחסים לרמת

בעלי מבנה מורכב יחסית ומנגנוני דפורמציה מגוונים. לוחות Dyneema הינם מערכת ליווחים בכיוונים שונים. כל ליווח מורכב משכבות של סיבי UHMWPE במטריצת Polyurethane, הכבושים יחד. הלוחות מיוצרים בתהליך מיוחד בחברת DSM ההולנדית. הסיבים מעניקים לחומר חוזק רב במתיחה, והמטריצה תורמת לגמישות. חומר זה אטרקטיבי מאוד לתעשיית המיגון, שמשקיעה משאבים רבים לניתוח התגובה של החומר/מבנה לפגיעה של איומים שונים (רסיס, קליע, וכו') במהירות גבוהה. פיתוח כלי סימולציה מדויק ואמין יכול להחליף את ניסויי הירי היקרים ולתת מענה ככלי תכן יעיל. עקב פני השטח החלקים והנטייה של השכבות להיפרד בקלות יחסית, התגלו קשיים בביצוע ניסויים מכאניים סטנדרטיים לאפיון החומר וכך המקורות השונים בספרות חלוקים לגבי התוצאות המדויקות. קושי נוסף טמון במגבלה לבצע ניסויים בקצבי עיבור גבוהים המאפיינים את תופעת הפגיעה הבליסטית. במחקר זה נעשתה עבודה ניסויית ראשונית, הכוללת פיתוח דגמים ומערכי ניסוי ייעודיים לחומר על מנת לבדוד מודי עומס שונים (מתיחה, גזירה, כפיפה, לחיצה וכד') והתנהגותם. ניסויי ירי וחקר ספרות נעשו ללמידת מנגנוני ספיגת האנרגיה העיקריים תחת פגיעה במהירות גבוהה. לאחר מכן, בהתבסס על תוצאות הניסויים והמבנה השכבתי של החומר, יושמה ההתנהגות ומנגנוני הכשל המיוחדים של החומר ברמת השכבה הבודדת לתוך קוד חיצוני ב-Fortran שיתממשק לתכנת FE, שבה ממודלת בעיית הפגיעה הבליסטית בפלטה של החומר. מודל זה נקרא מודל ה-Sublinate ועליו יורחב בהמשך. סימולציות של הניסויים הבליסטיים הושאו לניסויים לצורך כיול המודל. החומר בו עוסק המחקר הוא Dyneema HB26 בעל תת-ליווח [0/90] רב מחזורי.



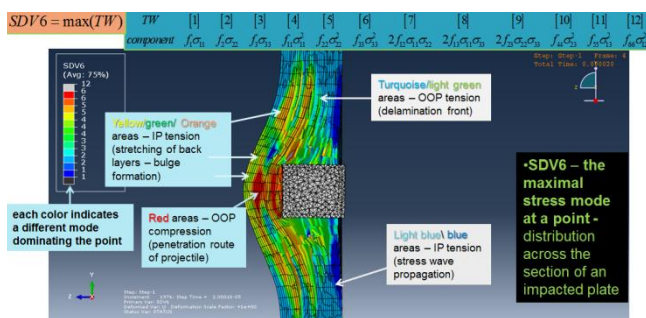
**איור 1 – מבנה סכימתי של שכבות החומר – ליווח של [0/90] של סיבי UHMWPE עם מטריצת PU**

### **אפיון מכאני של התנהגות החומר**

כפי שהוזכר, החומר מציג מספר מכשולים בפני המעוניין לבחון את התנהגותו המכאנית בשיטות הסטנדרטיות. כך למשל, ניסוי מתיחה חד צירי לא צלח בדגמי Dog-Bone סטנדרטיים עקב החלקת התפסניות מפני החומר והפסדי אנרגיה בהחלקה הבין שכבתית. לכן פותחו דגמים בעלי גיאומטריית 'פפיון' עם תפסניות מיוחדות שניתן להדק במספר ברגים

$$\begin{aligned} \phi = & f_1\sigma_{11} + f_2\sigma_{22} + f_3\sigma_{33} + f_{11}\sigma_{11}^2 + f_{22}\sigma_{22}^2 + f_{33}\sigma_{33}^2 \\ & + 2f_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2f_{13}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2f_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} \\ & + f_{44}\sigma_{23}^2 + f_{55}\sigma_{13}^2 + f_{66}\sigma_{12}^2 \end{aligned}$$

כאשר מקדמי הפולינום  $f_{ij}$  מורכבים מהחוזקים הרלוונטיים לכל מוד עמיסה ( $X_t, X_c, Y_t, Y_c, S_i, S_o$ ), כך שכל רכיב בביטוי מורכב ממאמץ המנורמל לחוזק החומר במוד מאמץ זה. פולינום (Tsai-Wu) TW מכיל אינטראקציה בין מצבי העמיסה השונים בכל כיוון, לא מדויק להשתמש בערך הקריטי של פולינום זה כתנאי בלעדי לכשל בכל אחד ממודי הכשל שהוזכרו. יש צורך להפריד בין התגובה השונה באזורים שונים סביב נקודת החדירה והעומסים הנוצרים בהם לניסוח תנאי הכשל המדויק. ע"מ לנצל את המידע הרב שמכיל פולינום TW, הוכנס כל איבר בפולינום למערך ונמצא הרכיב המכיל את הערך המקסימלי בכל נקודה בחומר ליצירת 'מפת' התפלגות העומסים הדומיננטיים בכל נק'. ניתן לראות באיור 4 את האזורים השונים בפלטה והעומסים הדומיננטיים בהם, תחת חדירה של רסיס במהירות גבוהה. למעשה, כל מוד עמיסה דומיננטי נצבע בצבע אחר, כך למשל ניתן לראות שהאזורים האדומים מייצגים נקודות בהן המאמצים העיקריים הם מאמצי לחיצה OOP, מכיוון שנמצאים מול מסלול החדירה של הרסיס והשכבות שם נלחצות כנגד השכבות החיצוניות של הפלטה. לעומתן, המוד הדומיננטי בשכבות החיצוניות הנמתחות בחוזקה הוא של מאמצים נורמלים ב-IP, שצבען צהוב-כתום. בשכבות הפנימיות במרחקים משתנים סביב מסלול החדירה של הרסיס, ישנם אלמנטים הצבועים בירוק בהיר/טורקיז, המאפיין מתיחה ב-OOP, מה שמאפיין דלמינציה במוד 1.



איור 4 – מפת התפלגות העומסים הדומיננטיים בכל אזור בפלטה תחת פגיעה באליסטית

בהסתמך על מידע זה, ועל מנגנוני הכשל העיקריים הידועים של החומר, ניתן היה לנסח תנאי כשל מתאימים:

1.  $(\phi \geq 1) \& (TW(3) \geq 1)$
2.  $(\sigma_{11}^{(k)} > X_t) \text{ or } (\sigma_{22}^{(k)} > X_t)$
3.  $(\phi \geq 1) \& \{ (TW(10) \geq 1) \text{ or } (TW(11) \geq 1) \}$

השכבה הבודדת ולא לרמת מרכיבי השכבה, או במילים אחרות, סקאלת meso ולא micro.

**מנגנוני כשל עיקריים בחומר ויישום תנאים למימושם**

**מנגנון החלשה מקומי: דלמינציה מפולגת (distributed delamination)**

כאמור, ניתן לעמוד על מנגנוני כשל ברמת השכבה. מנגנון נזק ראשון מיוחס לשכבת הממשק ב-sublimate, שכבת ה-cohesive. מכיוון שההדבקה בין השכבות נחשבת כחוליה החלשה במבנה החומר, הוא רגיש למאמצים בין שכבתיים – OOP. על כן כאשר המאמץ המשוקלל ב-OOP בשכבה זו מגיע לערך קריטי, ייחלשו תכונות החומר, על פי התנאי הבא:

$$\sigma_{eff}^{(3)} = \sqrt{(\sigma_{33}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)^{(3)}} \geq Y_t$$

כאשר  $Y_t$  מייצג את החוזק למתיחה ב-OOP. תנאי זה מיישם החלשת החומר עקב הצטברות מס' סדקים קטנים באזור מסוים בחומר שאינם מתבטאים בדלמינציה משמעותית ולכן מביאים רק לדגרדציה בתכונות החומר המקומיות.

**מנגנוני כשל**

מתוך חקר ספרותי מעמיק ותוצאות ניסויים שבוצעו בפלסאן, נקבעו 3 מנגנוני כשל עיקריים המביאים למחיקת אלמנטים במודל:

1. **דלמינציה** – הפרדה בין שכבות החומר
2. **קריעת סיבים** – מתיחה של שכבה אל מעבר לחוזק המתיחה שלה
3. **גזירה מחוץ למישור** – קריעת שכבה עקב מאמצי גזירה OOP הנוצרים כתוצאה מפגיעה במהירות גבוהה בניצב למישור השכבה

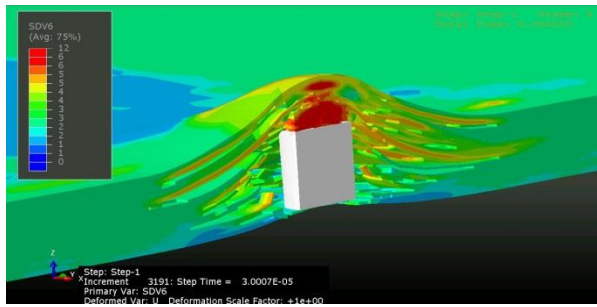


איור 3 – פלטת Dyneema לאחר ניסוי ירי, כאשר 3 מנגנוני הכשל העיקריים מסומנים באזורים האופייניים להם

**קריטריון Tsai-Wu**

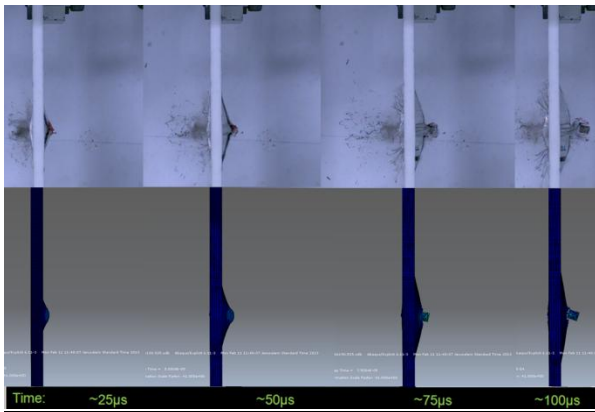
קריטריון כשל זה מאפיין חומרים מרוכבים אנאיזוטרופיים, ובעבודה זו הוא הוכנס ל-VUMAT ע"מ לאפיין את התקדמות הנזק בנק' כתוצאה מהמאמצים המשולבים בכל אזור בפלטה הפגועה. ניסוחו הוא כדלהלן:

דלמינציה (צבע ירוק שמיחוס לרכיב 3 בפולינום TW).



**איור 5 – מבט סכימתי על מנגנוני הדפורמציה בחתך הפלטה במהלך החדירה**

שכבות חיצוניות בחומר נמתחות בשיעור ניכר וסופגות אנרגיה אלסטית ופלסטית רבה. נוצרת כיפה קונית סביב אתר הפגיעה, שגדלה עם התקדמות הרסיס עד לעצירתו. אם לרסיס נותרת מספיק אנרגיה להביא את השכבות לכשל סופי במתיחה, הוא יחדור את המיגון (ניתן לראות דוגמא לכך באיור 6, בצילום צד של שלבי חדירת רסיס הפוגע במהירות של כ-700m/s).



**איור 6 – שלבים עוקבים בחדירת רסיס במהירות 708m/s כפי שניצפו בניסוי (מעלה) ובסימולציות**

איור 5 מדגים באופן איכותי את מנגנוני הדפורמציה הפועלים בחומר סביב אתר הפגיעה, כאשר החלוקה בין גורמי הכשל השונים משתנה כתלות במהירות הפגיעה (לדוגמא, יותר שכבות יחוו גזירה OOP תחת מהירות גבוהה יותר, ולכן פחות יחוו דלמינציה), אך יש קונסיסטנטיות בהתנהגות.

כאשר תנאים 1 ו-3 (דלמינציה וגזירה מחוץ למישור) מובילים לכשל מידי – מחיקת אלמנט, ותנאי 2 להחלשה הדרגתית של הקשיחות למתיחה ב-IP והצטברות נזק עד לכשל סופי. ייחוד נוסף לתנאי 2 הוא ניסוחו ברמת השכבה הבודדת, בעוד שני התנאים האחרים מנוסחים למאמצים משוקללים של כל ה-sublaminates, ומתחשבים בערך קריטי של  $\phi$ , המייצג מצב מאמצים שעלול להוביל לכשל מקומי. שילוב עם תנאי מקומי לעומס הקריטי הרלוונטי למוד הכשל יביא למחיקת האלמנט מיידית.

### **סימולציות באנליזת FE**

סימולציות של פגיעת רסיס 44GRN FSP עשוי פלדה, קשיח ואלסטי לחלוטין, בפלטת Dyneema 400mmx400mmx8.7mm המתוארת ע"י המודל המוצע הורצו ב-Abaqus/explicit. הרסיס פוגע במרכז הפלטה בניצב למישור השכבות במהירות פגיעה משתנות, בין 436-907m/s. מידות ונתוני הסימולציות תואמים לאלה של הניסויים שבוצעו במעבדת הירי בפלסאן, תועדו ופוענחו ע"י מצלמה מהירה.

### **תוצאות: מבט איכותי**

ניתן לבחון את תוצאות הסימולציות בהשוואה לניסויי הירי באופן איכותי. אם נסתכל על שלבי החדירה ומנגנוני הדפורמציה הפועלים במערכת החומר כתוצאה מהפגיעה, קיימת התאמה יפה וניתן לסכמה בנקודות הבאות:

- שכבות ראשונות הבאות במגע עם הרסיס נגזרות עקב מאמצי גזירה אינטנסיביים ב-OOP. מוד כשל זה הוא מידי, מקומי, דורש אנרגיה רבה ומאפשר יצירת חור חדירה נקי יחסית בשכבות הראשונות.
- שכבות פנימיות סביב אתר החדירה עוברות דלמינציה עקב עומסים קריטיים של מתיחה ב-OOP, המקדמים סדקים במוד 1. סדקי דלמינציה אלה מתפזרים מהר לרוחב השכבה, בצורת גלי הדף בחומר. החוזק הנמוך בעמיסה כזו ומהירות התפשטות הגל, תורמים להתרחבות נזקי הדלמינציה בשכבות הפנימיות. חשוב מאוד לציין, שסדקי הדלמינציה מופיעים ככשל בחומר שממודל כרצף הומוגני (continuum) וללא שימוש באלמנטי cohesive מלאכותיים, שיטה שנהוג למדל בעזרתה דלמינציה. למעשה, סדקים אלה נוצרים באמצעות מחיקת שורות של אלמנטים באופן סלקטיבי ע"י אלגוריתם הכשל במוד 1 של התכנית. ניתן להתרשם מיצירת מישורי הדלמינציה באיור 5, שם ניתן לראות היווצרות סדקים בשכבות הפנימיות, על אף שהחומר ממודל כרצף. גם באיור זה הצבעים מסמלים עומס דומיננטי בנק', וניתן לראות בבירור שבקדמת הסדקים העומס השולט הוא מתיחה ב-OOP המעודדת