

# עלון

## אי שח"מ

### עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 30

מרץ 2014

**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:** מחמוד ג'אבארין ושמואל קידז

**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. 8637776 (076), פקס 8184658 (04), דוא"ל: [amiel.herszage@iec.co.il](mailto:amiel.herszage@iec.co.il)

פרטים נוספים – ראו באתר האיגוד ובהודעות לתפוצה.



תמונה ממהלך יום העיון ה-35 של אישח"מ באוני' בן-גוריון של חברי הועד וחלק ממשתתפי יום העיון עם האורח מחו"ל, פרופ' דמקוביץ

#### מ-"שולחן העורך":

אני מבקש להודות לפרופ' קונסטנטין וולך מהפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון על הענותו לחיבור הכתבה 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-35 אורגן על ידי זהר יוסיבאש ב-10 באוקטובר 2013 באוני' בן-גוריון, ולמיטב הבנתי היה פורה ומעניין.

#### ISCM-36

יום העיון ה-36 יתקיים ב-24 באפריל, 2014, בטכניון בחיפה (המארגנים הם פרופ' דני גבעולי ופרופ' פנחס בר-יוסף). המרצה המוזמן הוא Prof. Anthony T Patera, מ-MIT, בארה"ב וכותרת הרצאתו:

Computational Mechanics and Experimental Observations: Real-Time In-Situ Data Assimilation

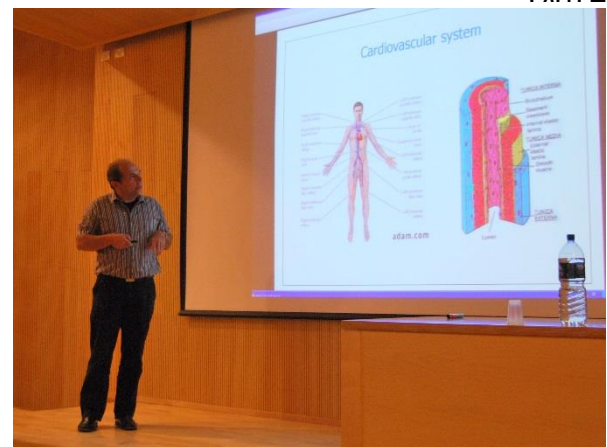
## מידול אנוריזמות

### קיריל בלחובסקי<sup>1</sup>, מחמוד ג' בארין, קונסטנטי וולך

הפקולטה להנדסה אזרחית, הטכניון, חיפה

#### חומרים רכים – רקע כללי

לחומרים רכים מעשה ידי אדם יש היסטוריה של יישומים הנדסיים ורפואיים ארוכה ומתפתחת במהירות. מרסני גומי מגנים על מבנים מפני תנודות ועומסי רעידת אדמה. התפשטות סדק קטסטרופלי גורמת להתמוטטות של צמיגי גומי וכתוצאה מכך קורות תאונות דרכים רבות עם אובדן החיים וההון. הדרוג'לים פולימרים משמשים במכשירים רבים כמו מכשירים לרפואת עיניים, ממברנות ביולוגיות וחישיני ביולוגי.



#### פרופ' וולך במהלך הרצאתו על נושא הכתבה ביום העיון ה-35 של אישח"מ באוני' בן-גוריון

חומרים רכים יכולים להפגין התנהגות פעילה במקרה של חומרים אלסטיים מבודדים או פולימרים שזוכרים צורה שניתן להשתמש בהם, למשל, ליצירת שרירים מלאכותיים. חומרים רכים מתוצרת טבע כמו עור, מוח, לב, כלי דם, גידים, שרירים, סחוס וכו' שבהם עיוות וכשל מכאניים נלווים עם תגובות כימיות ו/או אלקטרומגנטיות. חומרים רכים ביולוגיים הם אבני יסוד העיקריים של חיים וההבנה של ההתנהגות המכאנית שלהם היא חיונית לטיפול בריאותי, ביו-הנדסה, ותעשיית קוסמטיקה.



איור 1: אפליקציות של חומרים רכים

#### מטרות העבודה

<sup>1</sup> תגובות ניתן לשלוח לקיריל בלחובסקי [kirill@g.co.il](mailto:kirill@g.co.il)

בעבודה הנוכחית (Balakhovsky et al, 2014) אנחנו משפרים, ע"י הוספת תיאוריית הכשל, את המודלים הקיימים של שני סוגי האנוריזמות: ISA - intracranial saccular aneurysm, ו- AAA - abdominal aortic aneurysm. אנחנו מביאים בחשבון את ההתפתחות של סיבי קולגן אשר יכולים להימתח ולהיקרע והמטרה העיקרית היא לפתח מודל מתמטי חדש - Growth-Remodeling-Failure. Remodeling מתייחס לשינוי צורה מרחבית כאשר מסת סיבי קולגן קבועה, growth - שינוי במסה של הסיבים ו-failure זה קרע אשר קורה כתוצאה משינוי צורה. המודל כולל שלושה שלבים:

- ניסוח חוקים קונסטיטטיביים להתפתחות סיבי קולגן במודל המוצע (G-R-F).
- חישוב בעזרת אלמנטים סופיים ממברנות, בעלות סימטריה סיבובית, אשר מדמות ISA ו-AAA.
- ניתוח תוצאות של קריעת אנוריזמות ISA ו-AAA הכולל חקירה פרמטרית.

#### שיטות

העבודה הזאת תיאורטית וכוללת מידול וסימולציה ע"י אלמנטים סופיים של ממברנות בעלות סימטריה סיבובית עשויות מחומר רך ופעיל. סכימת אלמנטים סופיים אשר פותחה ע"י Fried (1982) משמשת לפתרון נומרי בעזרת אלמנטים סופיים.

#### מידול אנוריזמה

למרות ההצלחה בתיאור Growth - Remodeling המודלים הקיימים של אנוריזמות הם לא מתארים את העיקר - הכשל, אשר חייב להיות המרכיב החיוני של התיאוריה. Volokh ו- Vorp (2008) הציעו פרדיגמה חדשה של Growth-Remodeling-Failure (G-R-F) על ידי הכנסת תיאוריית הכשל בתיאור של G-R. העבודה הנ"ל של Volokh ו- Vorp (2008) משתמשת בגישה גרידא פנומנולוגיה ולא הונחה על ידי שיקולים מיקרו-מבניים. אנחנו משערים שקרע כולל של האנוריזמה קורה עקב קריעה של סיבים בודדים (או קריעה של קשרים בין הסיבים) וכך אנו מתחשבים בשיקולים המיקרו-מבניים. אנו בוחנים את ההשערה הזאת בהדמיות מחשב של גדילת אנוריזמה כאשר משוואות קונסטיטטיביות מתארות גם אבולוציית קולגן וגם כשל סיבים. כשל הוכנס למשוואות קונסטיטטיביות על ידי הגבלת אנרגיית (Energy limiter) העיבור שיכולה להצטבר בסיבים. במסגרת העבודה המוצעת מצאנו טווח רחב של פרמטרים שהובילו לקרע של האנוריזמה. אנו מסיקים בהסכם איכותי עם תצפיות קליניות שחלק מאנוריזמות ייקרעו בעוד שאחרים לא.

### טבלה 1: פרמטרים של סיב בודד, ISA

$$\mu = 2 \cdot 10^7 [\text{N/m}^2]$$

$\lambda_{cr}$	$\Phi$ [Pa]	$\sigma_{max}$ [Pa]	$\beta t_{if} = 0.3$	$\beta t_{if} = 0.45$	$\beta t_{if} = 0.6$
1.05	2.90E+04	1.32E+06	rupture	rupture	rupture
1.10	2.35E+05	5.85E+06	rupture	rupture	rupture
1.20	3.10E+06	2.16E+07	rupture	intact	intact

### טבלה 2 : פרמטרים של סיב בודד, AAA

$$\mu = 2 \cdot 10^7 [\text{N/m}^2]$$

$\lambda_{cr}$	$\Phi$ [Pa]	$\sigma_{max}$ [Pa]	$\beta t_{if} = 0.3$	$\beta t_{if} = 0.45$	$\beta t_{if} = 0.6$
1.05	2.90E+04	1.32E+06	rupture	rupture	intact
1.10	2.35E+05	5.85E+06	intact	intact	intact
1.20	2.21E+06	2.16E+07	intact	intact	intact

### מסקנות

לפי התוצאות שלנו כשל חומרי קורה מהר מאוד בתחילת התנפחות האנוריזמה. הדבר הזה מוכח ע"י ניסויים למשל לפי Mitchell ו Jakubowski (2000) על סמך אנליזה סטטיסטית הגיעו למסקנה שאנוריזמות מהסוג ISA נוטעות להיקרע אחרי פרק זמן קצר של גדילה אינטנסיבית. ואלה ששרדו את התקופה, הסיכוי שאנוריזמה תקרע נמוך. מתמטית זה עומר שכאשר Energy limiter קבוע זה קורה מיד או לא קורה בכלל. פיסיקאלית – לסיבי קולגן יש אותו חוזק לכול החיים וקריעת אנוריזמה מתרחשת בגלל קריעה של סיבי קולגן בודדים.

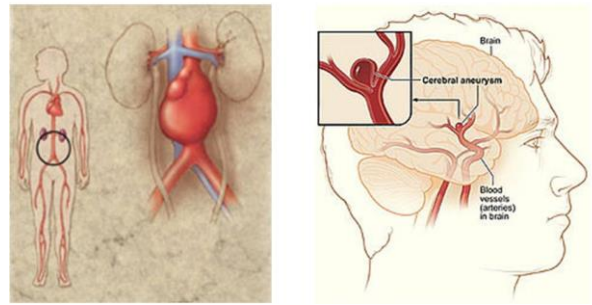
תרחיש אחר אפשרי שמתאים לאנוריזמה מהסוג AAA, לפי Humphrey (2002) et al, (2005) קריעת אנוריזמה מתרחשת עקב כשל של מטריצה המחברת את הסיבים ולא עקב כשל של סיבים עצמם. מבחינה מתמטית, זה אומר שיש לפרש Energy limiter כמדד לחוזק הקשר בין הסיבים, והוא אמור להשתנות במהלך התפתחות האנוריזמה. מבחינה פיסיקאלית זה אומר שהקרע של האנוריזמה נגרמת על ידי התפרקות של רשת הסיבים ולא כישלון של סיבים בודדים.

### מראי מקום

1. Balakhovsky, K., Jabareen, M., Volokh, K.Y., 2014. Modeling rupture of growing aneurysms. J. Biomech. 47, 653-658.
2. Humphrey, J.D., 2002. Cardiovascular Solid Mechanics: Cells, Tissues, and Organs. Springer, New York.
3. Kroon, M. and Holzapfel, G.A., 2007. A model of saccular cerebral aneurysm growth by collagen fiber remodeling. J. Theor. Biology 247, 775-787.

Abdominal Aortic

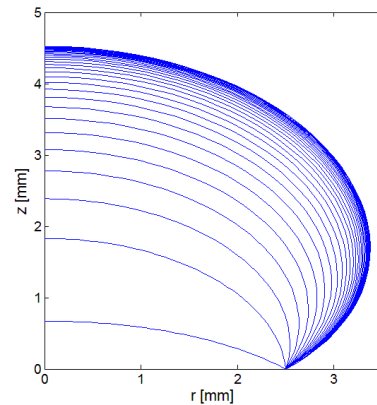
Intracranial Saccular



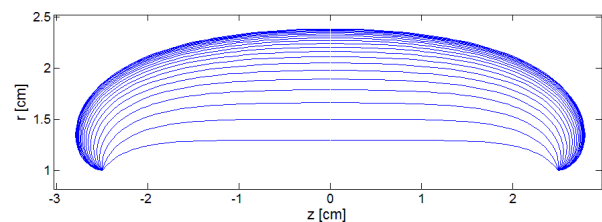
איור 2: שני סוגים של אנוריזמות

### תוצאות

בהעדר הגבלת אנרגיה, כלומר כאשר חומר שלם, התפתחויות האנוריזמות מהסוג ISA ו AAA מוצגות באיור 3 ו 4. חשוב לציין כי בשני המקרים אנוריזמה מתפתחת בהדרגה עד שמגיעה למצב יציב. סימולציות שמוצגות באיור 3 (ISA), בעצם, מהוות שיחזור תוצאות של Kroon ו Holzapfel (2007) כאשר חומר נשאר שלם. על סמך זה בנינו מודל של AAA והכנסנו תופעת הכשל ע"י הגבלת אנרגיית עיבור.



איור 3: התפתחות אנוריזמה מסוג ISA



איור 4: התפתחות אנוריזמה מסוג AAA

תוצאות הסימולציה מוצגות בטבלאות שני סוגי תוצאות נצפו: אנוריזמה נקרעת (rupture) או נותרת בשלמותה (intact). אם הקורא ירצה לבחון את התוצאות הוא יכול בקלות להגיע למסקנה ששני סוגי התוצאות יכולות לקרות בהתאם לתצפיות הקליניות.

4. Mitchell, P., Jakubowski J., 2000. Estimate of the maximum time interval between formation of cerebral aneurysm and rupture. J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry 69, 760-167.
5. Sakalihan, N., Limet, R., Defawe, O.D., 2005. Abdominal aortic aneurysm. Lancet 365, 1577-1589.
6. Volokh, K.Y. and Vorp, D.A., 2008. A model of growth and rupture of abdominal aortic aneurysm. J. Biomech. 41, 1015-1021.