

# עלון

## אי שח"מ

### עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 32

פברואר 2015

**עורך:** זהר יוסיבאש, המחלקה להנדסת מכונות, אונ' בן-גוריון בנגב, באר-שבע 84105, טל. 08) 6477103, פקס 08) 6477101, דואר אלקטרוני: [zohary@bgu.ac.il](mailto:zohary@bgu.ac.il),  
**חברי ועד אישח"מ:** מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי (נשיא), יצחק הררי, עמיאל הרשגה, 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 האגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, ד"ר עמנואל אור, טל. 050-4039151, דואר אלקטרוני: [manuore2@gmail.com](mailto:manuore2@gmail.com)



**ISC37 - פרופ' קוארטרוני בסיום הרצאתו עונה לשאלות הקהל (פרופ' הררי יו"ר המושב)**

#### התפתחות הסתיידות מסתם אבי העורקים - ויזואליזציה תלת מימדית ואנליזה ביומכנית

ראמי חאג' עלי, רותם הלוי - הפקולטה להנדסה מכנית, אוניברסיטת תל אביב

#### רקע ותקציר

מסתם אבי העורקים (Aortic valve) ממוקם בין החדר השמאלי לאבי העורקים (ראה איור 1) ותפקידו לאפשר

#### מ-"שולחן העורר":

אני מבקש להודות למר רותם הלוי על היענותו לחיבור הכתבה המעניינת בעלון זה המבוססת על הרצאתו ביום העיון ה-36 של האיגוד.

אנא בקרו באתר האגוד <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-37 שנערך ב-23.10.2014 באוניברסיטת תל-אביב ואורגן ע"י פרופ' חאג' עלי וגלפגט היה מוצלח מאוד והשתתפו בו מספר רב של משתתפים. האורח, פרופ' אלפיו קוארטרוני מ-EPFL בשויץ הוזמן לתת את הרצאת הפתיחה ופרופ' אדריאן ליו מאונ' סטנפורד בארה"ב נתן את ההרצאה המוזמנת של אחה"צ.

#### ISC38

יום העיון ה-38 יתקיים ב-12 במרץ 2015, באוניברסיטת בן-גוריון (המארגן הוא דר' ארז גל). המרצה המוזמן הוא פרופ' Alvaro Coutinho מהאוניברסיטה ריו-דג'נרו בברזיל. פרטים נוספים באתר האגוד ובהודעות לתפוצה.

קבוצת קרדיולוגים מבית חולים שיבא תחת הנחיית פרופ' חג' עלי ופורסם לאחרונה<sup>1</sup>.

### הקדמה

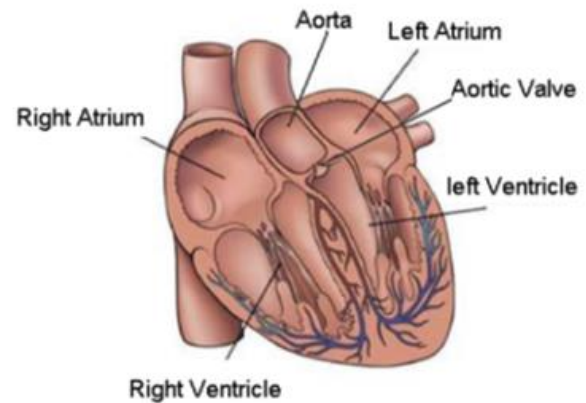
הסתיידות מסתם אבי העורקים הינו מחלת המסתמים הנפוצה ביותר וצפוי כי מספר החולים בשנים הבאות יגדל משמעותית לאור עליית תוחלת החיים. אין כיום תרופה למחלה והפתרון היחיד הוא החלפת מסתם.

נמצא כי שתי תכונות מכניות משפיעות על התפתחות המחלה: (1) עיבורים גבוהים מאיצים את התפתחות ההסתיידות. (2) משטר מאמצי הגזירה של זרימת הדם יכולה לעכב או לעודד את התפתחות המחלה. בסקירה זו נדון רק בהשפעת העיבורים שנחקרה בעזרת מודל אלמנט סופי. למידול המחלה השתמשנו במודל אלמנט סופי של מסתם בריא והוספנו לו גושי הסתיידות שנלקחו מסריקת CT של חולה. לצורך מידול השלבים השונים של המחלה, פיתחנו שיטה לשחזור שלבי הגדילה של ההסתיידות. השיטה מכונה Reverse Calcification Technique (RCT) ומבוססת על נתוני Hounsfield Unit (HU) של ההסתיידות. נתונים אלה משקפים את צפיפות ההסתיידות – HU גבוה משמעותו צפיפות גבוהה. לצורך לימוד צורת הגידול של ההסתיידות ניתחנו סריקות CT של 100 חולים ומצאנו את התבניות (הגאומטריות) האופייניות של גושי ההסתיידות. בעזרת ה-RCT ניתחנו את דרך הגידול שלהם.

### Reverse Calcification Technique

השיטה מבוססת על ההנחה שאזור בעל צפיפות סידן גבוה יותר קדם לאזור עם צפיפות נמוכה. הנחה זו אינטואיטיבית ונתמכת על ידי הנתונים הבאים: ההסתיידות הינה תהליך ארוך (שנים) של ספיחת סידן. סביר שאזורים עם מעט סידן, התחילו לצבור אותו בשלב מאוחר יותר מאשר אזורים בעלי צפיפות גבוהה. בנוסף, הצפיפות הגבוהה ביותר נמצאה תמיד במרכז הגאומטריה של גוש ההסתיידות, כך שיחד עם ממצאי מעבדה שהראו כי ההסתיידות גדלה מהמרכז החוצה, ניתן להסיק כי הגושים גדלו מהמרכז, זאת אומרת מהצפיפות הגבוהה ביותר. שלבי המחלה השונים משוחזרים אם כן, כאשר מסירים מההסתיידות את האזורים עם הצפיפות הנמוכה (HU נמוך). באיור 3 מוצגת ההסתיידות בצורה תלת מימדית בעזרת תוכנת ScanIP. באדום מופיעה ריקמת המסתם (ובלבן גושי ההסתיידות הגדלים ממצב mild למצב moderate).

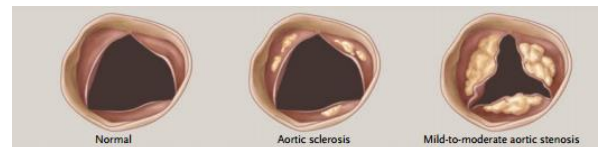
זרימה מהחדר לאבי העורקים ולמנוע זרימה הפוכה. המסתם בנוי משלשה עלעלים פאסיביים גמישים (ללא שרירים) אשר נפתחים ונסגרים על ידי לחצי הדם. כאשר החדר השמאלי מתכווץ והלחץ בו עולה על הלחץ שבאבי העורקים, המסתם נפתח. כשהחדר השמאלי מתרחב המסתם נסגר. על המסתם להיות גמיש בשביל להיפתח, חזק מספיק בכדי לשאת את לחץ הדם בסגירה ולעמוד בעשרות מיליוני מחזורים בשנה לכל אורך חיי האדם.



איור 1 – מיקום מסתם אבי העורקים (Aortic valve)

הסתיידות המסתם (Calcific Aortic Valve Disease) הינה מחלה המופיעה בכ-25% מבני 65 ומעלה. היא מתאפיינת בגידול רקמה דומה לעצם על העלעלים ובכך מקשיחה אותם ומונעת מהם להיפתח. התפתחות המחלה הינה הדרגתית (ראה איור 2), במהלכה הולך וקטן פתח המסתם כך שזרימת הדם לגוף קטנה עד מצב קריטי המכונה stenosis, בו החולה חש חוסר בחמצן ובתופעות הקשורות לכך.

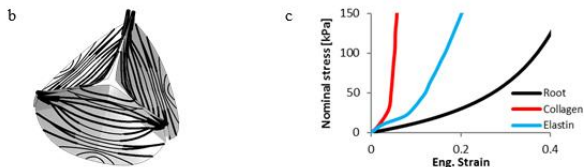
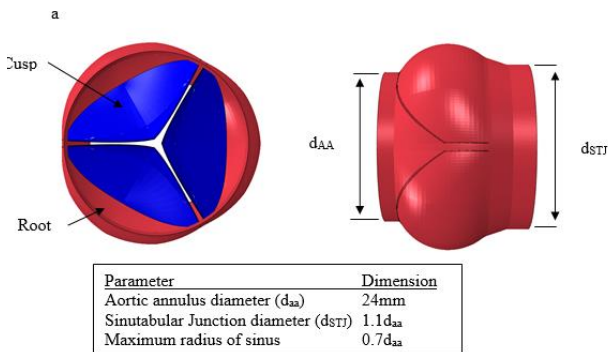
החולים בד"כ לא מרגישים בהתפתחות המחלה עד שהיא במצב מתקדם ורק אז פונים לטיפול. כחלק מתהליך האבחנה מבוצעת סריקת CT ממנה ניתן לראות את גושי ההסתיידות. מכיוון שהסריקה מבוצעת כשהמחלה בשלב מתקדם, אין מידע מספק על השלבים הראשונים שלה ודרכי התפתחותה.



איור 2 – התפתחות הסתיידות המסתם

במחקר זה, אנו מציעים שיטה לזהות על פי סריקת ה-CT את שלביה הראשונים של המחלה ודרך התפתחותה. אנו משתמשים ביכולת זו למידול המחלה באלמנט סופי, חקירת צורת התקדמותה והגורמים המכניים המשפיעים עליה. המחקר מבוצע בשיתוף עם

גאומטריית ההסתיידות, המייצגת שלב בגידול, יובאה למודל נפרד כך שנוצרה סדרת מודלים אשר מתארת את השלבים השונים של המחלה. כל מודל מורץ בנפרד (non linear dynamic implicit) וזמן הריצה על PC הינו מספר שעות בודדות לכל מודל. לאלמנטים שבהיטל ההסתיידות ניתנו תכונות אלסטיות לינאריות. מודול האלסטיות של ההסתיידות מבוסס על מודול אלסטיות של עצם כיוון שתהליך ההסתיידות דומה ביולוגית לתהליך בניית עצם. מכיוון שה HU של ההסתיידות מעט מתחת ל HU של עצם, נבחר הערך 1GPa. יש לציין כי ההסתיידות קשיחה לחלוטין יחסית לרקמה הבריאה. ריתום המודל מבוצע בעזרת קיבוע  $u_1=u_2=u_3=0$  (pinned) בשתי שפות המודל שקוטרם מופיע כ-  $d_{aa} - 1 d_{stj}$  באיור 5.



### איור 5 – תאור מודל אלמנט סופי של מסתם בריא – גאומטריה ותכונות חומר

העומס במודל זה הוא לחץ אחיד על שטח העלעלים, כמקובל במודלים "יבשים" (ללא מידול הזרימה). הנחה זו נמצאה כטובה בעיקר מצב דיאסטולי (מסתם סגור). עוצמת הלחץ היא הפרש הלחצים בין הלחץ באבי-העורקים לחדר השמאלי כתלות בזמן. מכיוון שהפרש הלחצים משנה את כיוונו במהלך מחזור פעימה אחת, כך גם המסתם נפתח ונסגר ומתקבלת הדינמיקה שלו. באיור 6 מוצגות תוצאות האנליזות במצב דיאסטולה (מסתם סגור ועומס מקסימאלי). ניתן לראות את אזור ההסתיידות על פי העיבור הנמוך בהן ולצידן את ריכוזי העיבורים ברקמה. העיבורים עולים מ- 0.17 ל- 0.24 באזור ריכוזי העיבורים ובכך מסמנים את האזור הבא שבו ככל הנראה תתפתח ההסתיידות בעתיד. ניתן להבחין כי מיקום ריכוזי המאמצים נוטה לכוון השלמת צורת הקשת, כפי שהתקבל מה RCT.



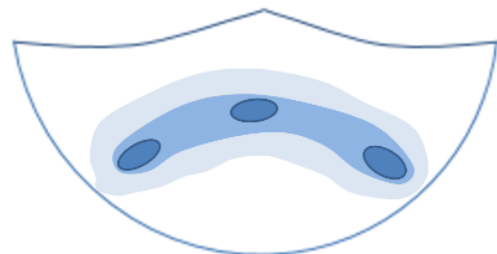
### איור 3 – תוצאות RCT המשקפות את שלבי המחלה ממצב בריא ועד מצב moderate

לשם הוכחת התאוריה, נמצאו מספר חולים אשר עם סריקת CT שבוצעה לאחרונה וסריקת CT מלפני מספר שנים. גאומטריית ההסתיידות של המחלה לפני מספר שנים הושוותה לגאומטריה שיוצרה על בסיס הסריקה שבוצעה לאחרונה ונמצא כי ה RCT הצליח לשחזר את שלבי המחלה המוקדמים.

### תבניות ההסתיידות וצורת גידולם

למרות שההסתיידות נראית כמו גושים אמורפים, יש להם מספר תבניות אופייניות. אנו ביצענו בחינה של סריקות CT מ- 100 חולים (300 עלעלים) ואיתרנו ארבע תבניות שכיחות. בעזרת ה- RCT מצאנו כיצד תבניות אופייניות אלה מתפתחות.

נמצא כי התבנית השכיחה ביותר הינה בצורת קשת כמוראה באיור 4 כאשר הצבעים הכהים יותר משקפים נקודות קדומות יותר.

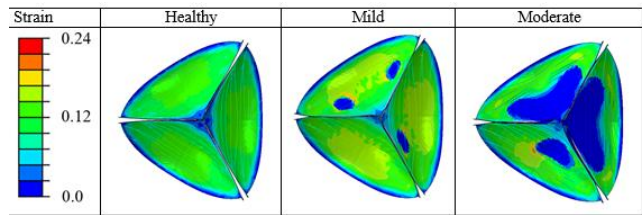


### איור 4 – צורת ההסתיידות השכיחה (44%) והתפתחותה

ההסתיידות מתחילה בד"כ ממספר נקודות בודדות בצדי העלעל, לאחר מכן הן מתחברות ולבסוף ההסתיידות מתעבה ומוסיפה נפח.

### מודל אלמנט סופי

מודל האלמנט סופי מבוסס על מודל שפותח ופורסם בעבר ע"י Marom et al (2012)<sup>2</sup>. באיור 5 מוצגות הגאומטריה, תכונות החומר ומידול העלעלים בעזרת מצע אלסטין (אפור) וצרוור של סיבי קולגן (שחור). הגאומטריה פותחה בעבר על ידי Haj Ali et al (2012)<sup>3</sup>. תכונות החומר הן היפר-אלסטיות הן לסיבי הקולגן והן לאלסטין. צורת ומיקום הסיבים פותחו על ידי Marom et al (2012)<sup>4</sup>. המודל נבנה בתוכנת ABAQUS בעזרת אלמנטי shell כאשר גאומטריות ההסתיידות יוצרו בעזרת ה RCT ויובאו למודל. כל



איור 6 – עיבורים בעלעלים עם התפתחות ההסתיידות

### סיכום

מחקר זה דן בהיבטים המכניים של התפתחות ההסתיידות בעלעלי מסתם אבי העורקים. אנו מציגים שיטה לשחזור תהליך גידול ההסתיידות בעזרת צילום CT אחד ומראים תבניות של גאומטריות וצורת גדילה של גוש ההסתיידות. כמו כן, הצלחנו לקשור לראשונה בין ריכוזי המאמצים ומיקומם לבין צורת ההסתיידות. בימים אלה אנו מסיימים מחקר המשך בו מודלה המחלה בעזרת מודל Fluid – Structure interaction (FSI). מודל זה מאפשר חקירה גם של הזרימה ומאמצי הגזירה של הזורם על התפתחות המחלה.

### מראי מקום

1. Halevi, R. *et al.* Progressive aortic valve calcification: Three-dimensional visualization and biomechanical analysis. *Journal of Biomechanics* **48**, 489-497, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.12.004> (2015).
2. Marom, G., Haj-Ali, R., Raanani, E., Schäfers, H.J., Rosenfeld, M., 2012. A fluid-structure interaction model of coaptation in fully compliant aortic valves. *Med. Biol. Eng. Comput.* 50, 173-182.
3. Haj-Ali, R., Marom, G., Ben Zekry, S., Rosenfeld, M., Raanani, E., 2012. A general three-dimensional parametric geometry of the native aortic valve and root for biomechanical modeling. *Journal of Biomechanics*.
4. Marom, G., Peleg, M., Halevi, R., Rosenfeld, M., Raanani, E., Hamdan, A., Haj-Ali, R., 2013b. Fluid-Structure Interaction Model of Aortic Valve With Porcine-Specific Collagen Fiber Alignment in the Cusps. *ASME Journal of Biomechanical Engineeri*