



הטכניון מכון טכנולוגי לישראל, הפקולטה להנדסה  
אזרחית וסביבתית, המסלול להנדסה חקלאית



## מודל לחיזוי נזק מכני הנגרם בתהליכי טיפול ושינוע תפוחים

סיכום ביניים

מוגש

למו"פ צפון

מאת

רן מיכאליס ויצחק שמולביץ

## 1. מבוא

יבולים רבים כגון תפוחים סובלים מאחוזי פחת גבוהים שמקורם בנוק מכני הנגרם החל משלב הקטיף, דרך שלבי השינוע והאריזה ועד הגיעם לצרכן. הנזק המכני עלול להגרם לפרי עקב התנגשויות ו/או חיכוך בפירות שכנים ובדפנות המיכל או על ידי פגיעה במוצר באמצעות מכונות הבאות עמו במגע בשלבי המיון, האריזה והשיווק. אחוזי הנזק נעים בין 8 ל- 10% במדינות מפותחות בהן ישנן דרכים סלולות ומדעות גבוהה לנושא, ועד לכדי 50% במדינות אחרות. בישראל הנזק מוערך בכ- 30% בתפוח הזהוב (Golden Delicious) שהוא הזן העיקרי בענף התפוח בארץ, ונחשב לזן רגיש למכות קטיף ושינוע.

במשך השנים פותחו מודלים שונים שתכליתם לחזות את מידת הנזק שתהליך כזה או אחר עלול לגרום לפרי. לאחרונה, עם התפתחות יכולות החישוב ותוכנות הסימולציה, מוצגים גם מודלים נומריים להערכת נזק. מחקר שתכליתו לפתח כלי לחיזוי נזק מכני נערך בטכניון במסלול להנדסה חקלאית. במסגרת המחקר נבנה מודל ממוחשב המדמה את תהליך השינוע של צובר תפוחים. המידול במחשב נעשה בגישת האלמנטים הבדידים (Discrete Element Method- DEM). במחקר הושם דגש על הייצוג הגיאומטרי של הפרי במודל, וכן על תיאור התנהגותו המכנית של החומר בתגובה לעומסים הדינמיים להם הוא נתון. לצורך כך נבנתה מערכת ייחודית לאפיון התכונות המכניות של הפרי תחת עומסי הולם. מערכת זו כללה מטוטלת ממוכשרת בחיישניים דינמיים, ותוכנה לאיסוף הנתונים ועיבודם לכדי פרמטרים מכניים אותם ניתן להזין למודל הסימולציה. מערכת זו שימשה גם לבחינת הקשר בין גודל הנזק המתפתח למאפייני המכה שגרמה להיווצרותו. המודל אומת בהצלחה אל-מול תוצאות מנסויי הרעדה מבוקרים.

תהליך הבנייה והכילול של מערכי הניסוי והפיזור הסטטיסטי של הגדלים הנדרשים, חייב כמות גדולה של חזרות בכל אחד מהניסויים. הפרי ששימש אותנו (כ- 4000 יחידות) נתרם על ידי מו"פ צפון.

## 2. מטרת המחקר

### 2.1 מטרה כללית

פיתוח כלי לחיזוי נזק מכני הנגרם בתהליכי טיפול ושינוע תפוחים

### 2.2 מטרת ספציפיות

- פיתוח מודל לצובר תפוחים הנתון להטרחה דינמית
- בחינת שיטה לקביעת התכונות המכניות הדרושות למודל
- בחינת קריטריון נזק לתפוח בצובר
- אימות המודל בהשוואה לתוצאות ניסיוניות
- אפיון ההטרחות על צובר תפוחים במהלך שלבי השינוע השונים
- קביעת אמדנים לנזק בצובר תפוחים כתלות במשטר השינוע

## 3. שיטת המחקר

שיטת העבודה במחקר זה הינה מידול של תופעות מכניות המתרחשות בתהליך השינוע של הפרי בעזרת כלים נומריים, ואימות תוצאות הסימולציות אל – מול תוצאות אמפיריות.

## 4. רקע מדעי

### 4.1. כללי

בעיית הנזק המכני בתהליך שינוע של מיכל תפוחים מסווגת כבעיה דינמית מרובת חלקיקים. ישנן שתי גישות מקובלות לפתרון בעיות מסוג זה- גישת האלמנטים הסופיים- Finite Element Method- FEM, וגישת האלמנטים הבדידים- Discrete Element Method- DEM (הסבר על הגישות השונות מופיע בסעיפים הבאים). תוכנת הסימולציה, בין אם היא פועלת בגישה זו או אחרת, לא מסוגלת לתאר את הנזק הממשי שנגרם לתפוח, אלא רק את תנועתו במיכל ואת הכוחות המשתנים הפועלים עליו בזמן תנועתו. על – מנת לקבוע האם התרחש נזק ומה טיבו, יש לנתח את המכות שחווה הפרי במהלך הסימולציה בעזרת כלי נוסף, הקושר בין מאפיינים שונים של המכה לבין מידת הנזק הנגרם. אי – לכך, כלי החיזוי שפותח בעבודה זו בנוי משני מרכיבים עיקריים:

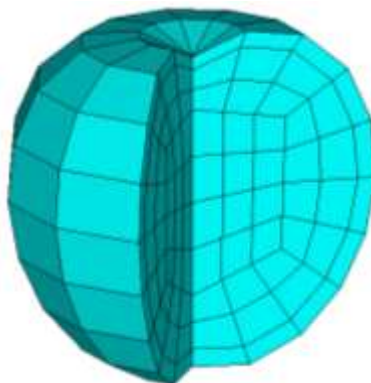
- מודל של צובר תפוחים הנתון לעמיסה דינמית כתוצאה מתנאי השינוע, המתאר את תנועת התפוחים במיכל והכוחות ביניהם במהלך השינוע.

- מודל סטטיסטי לחיזוי הנזק, שקובע את מידת הנזק הצפוי בהתאם לתוצאות מודל השינוע. כלומר, לצורך הערכת מידת הנזק בתהליך שינוע מסוים, נדרש למאפייני השינוע ותכונות מכניות שונות של הפרי. תבוצע סימולציה של תהליך השינוע, בה יחושבו גדלים כגון הכוחות והתאוצות בין התפוחים במהלך השינוע. תוצאות אלו ינותחו בכדי לקבוע אלו נזקים התרחשו, וכך ניתן להעריך את מידת הנזק של תהליך זה.

### 4.2. גישות נומריות לפתרון בעיות דינמיות מרובות חלקיקים

#### 4.2.1. גישת האלמנטים הסופיים- FEM

בגישה זו כל תפוח במיכל יתואר בעזרת אלמנטים רבים. תמונה 4.2.1 מציגה מודל של תפוח בודד הבנוי מ 500 אלמנטים. באלמנטים אלו מוגדרים תכונות חומריות כך שתגובתם לכוחות המתפתחים במיכל תהיה דומה למתרחש במציאות כאשר תפוח מועמס בכוחות שכאלו. ניתן להגדיר תכונות שונות לאלמנטים המרכיבים את הקליפה, בית הגרעינים וכדומה.

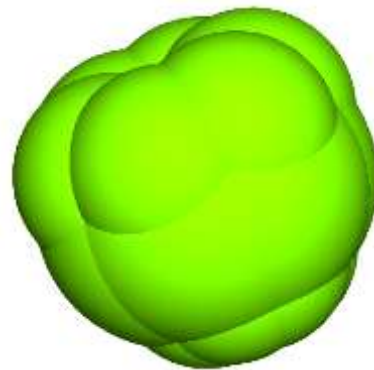
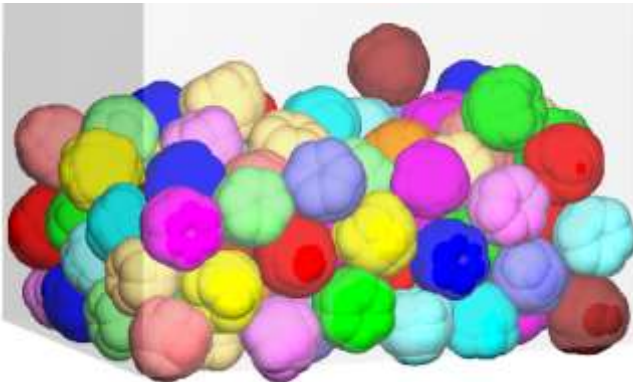


תמונה 4.2.1 חתך במודל FEM של תפוח בודד

היתרון העיקרי בגישה זו הוא היכולת לתאר את הגיאומטריה ואת התנהגות החומר בפירוט רב, כלומר התפוח יכול לשנות את צורתו עקב פעולת הכוחות, וניתן לחשב מאמצים ועיוותים על פני התפוח ובתוכו. החסרונות הינם משאבי המחשב הדרושים לצורך ביצוע הסימולציה, שכן ישנם תפוחים רבים במיכל, והחישובים נעשים בצעדי זמן קטנים ביותר (מסדר גודל של מיקרו-שנייה). על מנת לפתור את הבעיה יש לחשב את הכוחות בכל האלמנטים בכל צעד זמן. זהו תהליך ארוך והוא מכיל המון מידע לגבי כל תפוח שרובו כלל אינו נחוץ לצורך בעיית הנזק אותה אנו מעוניינים לפתור. עובדה זו מסבכת ומאריכה גם את תהליך עיבוד הנתונים בעזרת מודל חיזוי הנזק בשלב השני.

#### 4.2.2. גישת האלמנטים הבדידים - DEM

גישה זו נועדה במקורה לצורך מידול בעיות דינמיות בחומרים גרנולריים כגון שפיכת ערימות חול או זרימת גרעינים בסילו, בהן מעוניינים בהתנהגות הצובר בעוד שהמצב הפרטני של כל חלקיק אינו רלוונטי. בגישה זו כל תפוח במיכל יתואר בעזרת אלמנט בודד. הכוחות המתפתחים בין האלמנטים מחושבים בעזרת מודל מגע המוגדר בין האלמנטים. בגישה זו האלמנטים אינם משנים את צורתם ולכן תיתכן למעשה חפיפה בין שני תפוחים בצעד זמן כזה או אחר במהלך החישוב (כלומר תפוח "נכנס" בתוך תפוח שכן). מודל המגע מחשב את כח התגובה המתפתח בהתאם לעומק החפיפה בין האלמנטים, והוא זה שיגרום להם להתרחק זה מזה בצעד הזמן הבא. היתרונות העיקריים בגישה זו הינם קיצור זמן החישוב והקלות בה ניתן להתחקות אחר תנועת תפוח זה או אחר במהלך הסימולציה. החסרונות באים לידי ביטוי במידת הפירוט בה ניתן לתאר את גיאומטריית התפוח (אבני היסוד לבניית האלמנטים הם כדורים, בעזרתם ניתן לבנות גיאומטריה מורכבת יותר כגון תפוח), ובכך שהגדרת מודל מגע הוא תהליך פחות טריוויאלי מאשר הגדרת תכונות חומר.



תמונה 4.2.2 ייצוג תפוח בודד וצובר תפוחים בגישת ה DEM

מכיוון שגישת ה DEM מספקת את המידע הדרוש לנו לעיבוד בשלב השני בצורה מהירה ויעילה, בחרנו בגישה זו בכדי למדל את מיכל התפוחים בשלב תהליך השינוע.

#### 4.3. מודל חיזוי הנזק

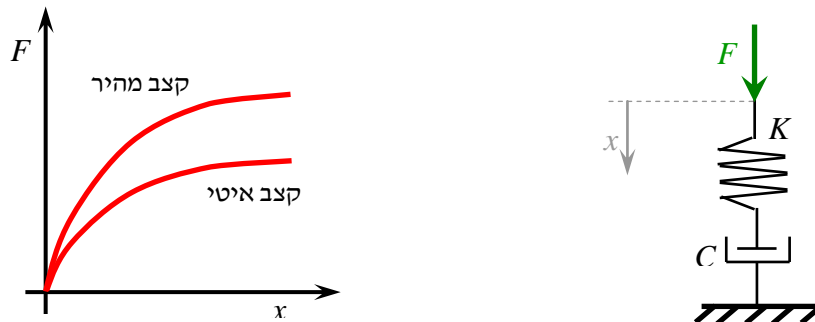
כמוסבר לעיל, בכדי לקבל אומדן לנזק שנוצר במהלך הסימולציה יש לנתח כל אחת מהמכות שהתרחשו ולהחליט האם מכה זו גרמה לנזק ואם כן מה גודלו. חשוב לציין שנכון להיום, לאחר יותר מ 40 שנה של מחקרים בתחום, עדיין אין קריטריון נזק אחיד המקובל על – ידי רוב החוקרים. יש הטוענים כי גודל הנזק תלוי בעיקר בכוח המרבי המתפתח במכה, ויש הטוענים כי גודל הנזק תלוי באנרגיה שנוצרת במהלך המכה. יתרה מזאת, אופן כימות הנזק אף הוא אינו מוסכם. ברב הפרסומים הנזק נמדד לפי נפח החומר הניזוק בפרי, ואולם אחרים טוענים כי יש למדוד את הנזק לפי גודל הכתם על פני הקליפה מפני שזה מה שנגלה לעיני הלקוח. על-כל-פנים, ניתן למצוא בספרות מודלים שונים לחיזוי הנזק, בכלם מוצג קשר בין מאפיינים כאלו או אחרים של המכה ותכונות מכניות ופיסיקליות של הפרי לבין גודל הנזק שמכה זו גורמת.

בעבודה זו נמדדו מכות רבות בעוצמות שונות על תפוחים רבים, ונבנה מודל חיזוי נזק המבוסס על ניתוח סטטיסטי של הקשר בין קוטר הנזק על פני קליפת הפרי לבין אנרגיית ההתנגשות בכל מכה. תיאור מפורט יותר של מודל חיזוי הנזק ניתן למצוא בפרק 5.2.3 .

## 5. שלבי המחקר

### 5.1. בניית מודל לצובר תפוחים

המודל נבנה בתוכנת PFC 3D שהיא תוכנת סימולציה נומרית הפועלת בגישת ה DEM. התיאור הגיאומטרי של תפוח אופייני ושל הצובר כולו מופיע בתמונה 4.2.2. כל תפוח מיוצג בעזרת 18 כדורים שמוגדרים כגוף קשיח. כלומר אין ביניהם תנועה יחסית. מידות המיכל במודל זהות למידות המיכל ששימש בניסויי האימות והוא מכיל 100 תפוחים בעלי פילוג נורמלי בגודלם. בסך הכל משקל המיכל במודל קרוב מאד למשקל המיכל ששימש בניסויי האימות ובו גם-כן היו 100 תפוחים. מודל המגע שהוגדר בין התפוחים הינו מודל ויסקו-אלסטי לינארי המוכר בשם מודל Maxwell. ניתן לתאר את המודל כקפיץ המפתח כח בהתאם למידת התכווצותו, המחובר למרסן שמפתח כח בהתאם למהירות התכווצותו. למודל זה דרושים שני פרמטרים מכניים: מידת הקשיחות של הקפיץ- $K$  ומידת הריסון של המרסן- $C$  עקום הכח – דרך של המודל ( $F$  כתלות ב- $x$ ) תלוי בקצב הפעלת העומס  $F$ , ונמצא שמודל זה מתאים לתיאור ההתנהגות המכנית של התפוחים בתחום העומסים הפועלים עליהם במהלך שינוע.



ציור 5.1 תיאור סכמתי של מודל Maxwell

### 5.2. ניסויי כיוול ואימות

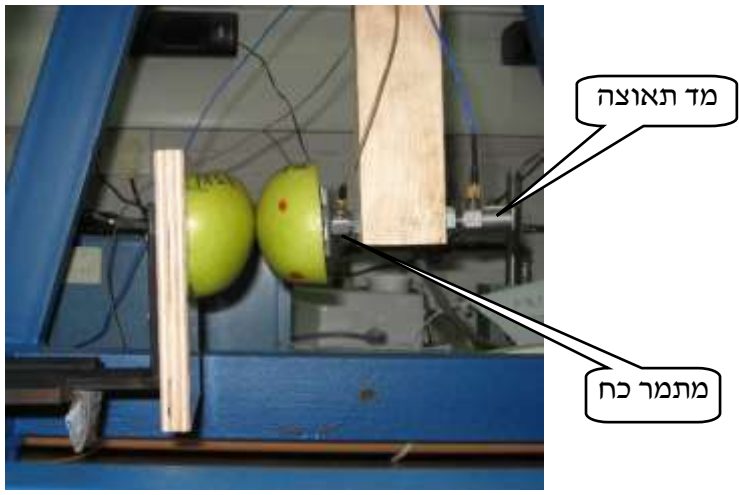
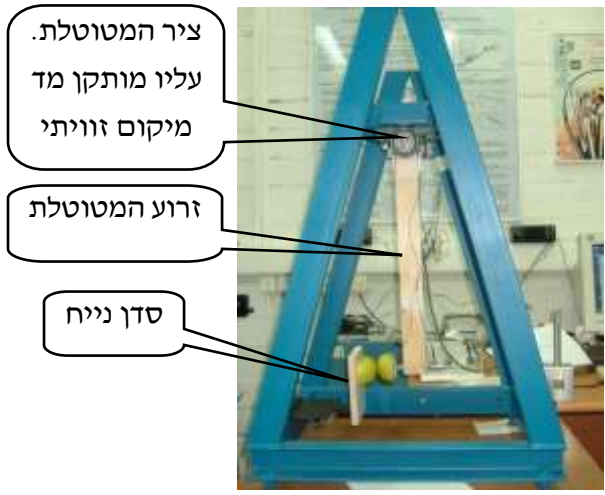
- ניסויים סטנדרטיים לאפיון מצב הפרי
- ניסויי כיוול לצורך קביעת הפרמטרים למודל המגע
- ניסויים לצורך הגדרת מודל חיזוי הנזק
- ניסויי אימות לשיטה ולמודל כולו

#### 5.2.1. בדיקות סטנדרטיות לאפיון מצב הפרי

נערכו מספר ניסויים לצורך קביעת מצב הפרי בשלבים שונים של המחקר. ניסויים אלו כללו בדיקת מוצקות MT, ניסויי לחיצה לפי תקן ASABE S368.4, וניסויים ללא הרס כגון נגיפה קלה ובדיקת קשיחות אקוסטית.

#### 5.2.2. קביעת פרמטרים מכניים

לצורך קביעת הפרמטרים (קשיחות וריסון) נבנה מתקן ייחודי המדמה את העומס הדינמי הפועל על הפרי במהלך נגיפה בין שני תפוחים במיכל. המתקן הוא למעשה מטוטלת ממוכשרת בה חצי תפוח מוצמד לזרוע וחצי שני לסדן ניח. בוצעו נגיפות בעצמות שונות תוך כדי מדידת הכח, התאוצה והמיקום של זרוע המטוטלת כתלות בזמן. נתונים אלו נותחו על-מנת לחלץ מתוכם את הפרמטרים הדרושים. כמו – כן בוצע ניתוח סטטיסטי על מדגם רחב של תפוחים.



תמונה 5.2.2 מתקן המטוטלת הממוכשרת

5.2.3. הגדרת מודל חיזוי נזק

ניסויים אלו בוצעו גם – כן בעזרת המטוטלת, אלא שבניסויים אלו כל פרי ניגף במכה אחת בלבד ואחר כך נמדד קוטר הנזק שהתקבל. ניתוח הנתונים מאפשר לבחון באופן סטטיסטי את הקשר בין קוטר הנזק למאפייני המכה כגון הכח המרבי, חדירה מרבית בין חצאי הפרי או האנרגיה הקינטית של המכה.

5.2.4. ניסויי כיוול ואימות

ניסויים אלו כללו הרעדה של מיכלי תפוחים על מתקן הרעדה סטנדרטי של המעבדה לאריזה ושינוע בטכניון. לצורך ביצוע ניסויים אלו נבנה מיכל ממוכשר בו הותקנו חיישני כוח ותאוצה וכן נכתבה תוכנה ייעודית לצורך איסוף הנתונים וניתוחם. בניסויים אלו הורעדו המיכלים בתדרים שונים ולפרקי זמן שונים, ונבדקה רמת הנזק שנגרם לפרי לפי פילוג של שכבות במיכל. בארגו הותקנו מתמרי כח בדופן התחתונה, מתמרי תאוצה בשלושה צירים ומתמר כח נוסף שהותקן בין שני חצאי כדור על – מנת למדוד כוחות בתוך הארגו.



תמונה 5.2.4 b - ארגזי הפרי על המרעד



תמונה 5.2.4 a - הארגו הממוכשר

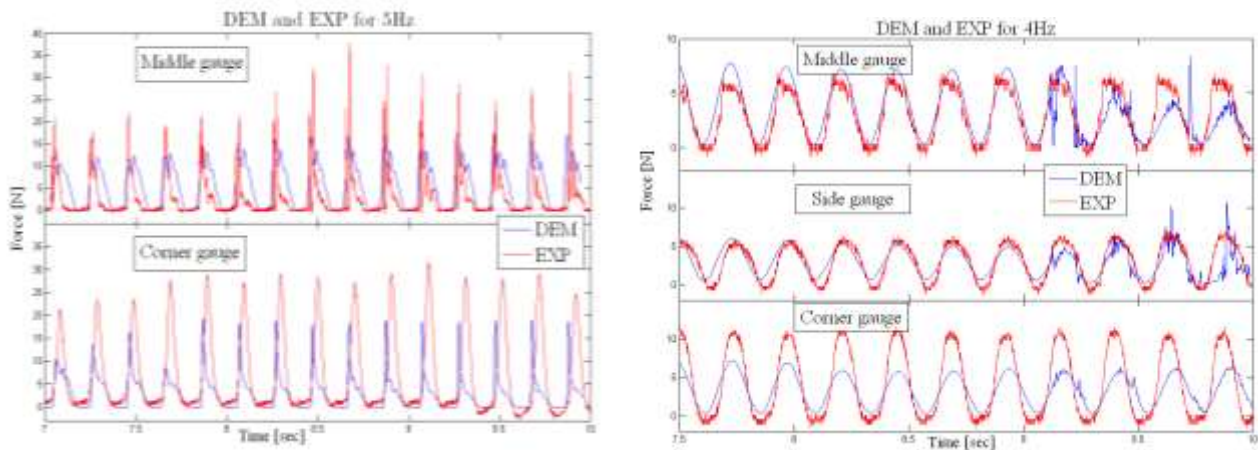
ניסויים אלו מהווים ניסויי אימות לסימולציות ה DEM שכן ניתן להשוות את הכוחות והתאוצות שנמדדו בניסוי לאלו המחושבים בסימולציה של ניסוי זהה. מעבר לכך, ניסויים אלו אף מהווים ניסויי אימות למודל כולו. שכן לאחר ניתוח התוצאות בעזרת המודל הסטטיסטי לחיזוי הנזק, ניתן להשוות בין הנזק שנמדד בניסויים לזה שחושב על – פי המודל.

5.3. השוואות והתאמות

בשלב זה בוצעו התאמות לאימות מודל ה DEM בלבד. המודל הורעד במחשב בהתאם לתאוצות שנמדדו במהלך ניסוי ההרעדה וחושבו הכוחות המתפתחים ברצפת המיכל באותם מיקומים בהם הותקנו חיישנים בניסוי. נמצא שישנה התאמה טובה הן בעוצמת הכוחות והן באופי האותות כתלות בזמן.

## 6. הצגת תוצאות

ניסויי ההרעדה בוצעו בתחום תדרים שבין 2.5Hz ל- 5Hz, ובפרקי זמן שנעו בין 5 ל- 30 דקות הרעדה. תחום זה נבחר היות ומחקרים שונים הראו כי התדר הדומיננטי ביותר ברוב תהליכי השינוע הוא באזור ה- 4Hz. הניסויים הראשוניים הראו כי נזק ממשי מתקבל בהרעדות מעל 4Hz בלבד אך הרעדה ב- 5Hz כבר גורמת לנזקים קטסטרופליים אותם ממילא לא ניתן לחזות בעזרת המודל הנומרי. התרשימים המוצגים להלן מראים את הכוח כפי שנמדד ברצפת המיכל בהשוואה לכוח כפי שחושב בעזרת המודל בשני ניסויים אופייניים.



תמונה 6.1. השוואת מדידות כח ברצפת המיכל לתוצאות סימולציה בהרעדות 4Hz ו- 5Hz

ניתן לראות שהאותות דומים בהתנהגותם ועוצמתם. בניסוי ההרעדה ב- 5Hz התפוח שהיה מונח על אחד החיישנים זו במהלך ההרעדה ולכן מוצגות תוצאות רק משני חיישנים. מהשוואת האינטגרלים בין כל זוג אותות, נמצא שרמת ההתאמה היא בין 75% ל- 97%.

## 7. המשך העבודה

לאחר שמודל ה- DEM אומת בהצלחה ניתן לומר שהכוחות, המהירויות והתאוצות המחושבות בעזרת המודל הנומרי תואמים את שמתרחש במיכל. בעבודת הפיתוח של מודל חיזוי הנזק נמצא שישנה קורלציה גבוהה בין ההפרש באנרגיה הקינטית שנמדדה בזרוע המטוטלת לקוטר הנזק שהתפתח על פני הפרי. כעת נותר להריץ את המודל הנומרי תוך כדי חישוב האנרגיות הקינטיות של התפוחים בכל מפגש ולנתח את התוצאות בעזרת מודל חיזוי הנזק. התאמה טובה בין הנזק שיחושב לבין הנזק שנמדד בניסויי ההרעדה, תהווה אימות למודל כולו ולשיטה שמחקר זה מציע.

## 8. סיכום והמלצות להמשך

מוצע מודל נומרי לחיזוי נזק המתבסס על תוכנת סימולציה בגישת האלמנטים הבדידים- DEM. למודל דרושים תכונות מכניות ופיסיקליות של הפרי, וכמו כן נתונים המאפיינים את תהליך השינוע, כגון ממדי המיכלים, והתאוצות הפועלות על המיכלים במהלך השינוע. בשלב זה המודל אומת חלקית ובוצעו הניסויים הדרושים לאמת את המודל כולו. בהמשך, לכשיאומת המודל כולו, רצוי לבצע מדידות על – מנת לאפיין תהליך שינוע אמיתי, בכדי שניתן יהיה לבחון את יכולות המודל לתאר תנאי שדה ולא רק הרעדות מבוקרות במעבדה. ניסוי שכזה צריך לכלול מדידות תאוצה במהלך השינוע ובקרת נזק בסוף התהליך.