# אוניברסיטת בן גוריון בנגב

# הפקולטה למדעי הטבע

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

# מחקר ניסיוני של מנגנון תנועת בלוקים במדרונות סלע המונע משינויי טמפרטורה

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת התואר "מוסמך למדעי הטבע" (M.Sc.)

<u>מאת:</u>

אבירן פלדהיים

## <u>בהנחיית</u>:

פרופ' יוסי חצור, המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

ד"ר דגן בקון-מזור, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון.

תמוז התשע"ז

17 יולי, 2017

# אוניברסיטת בן גוריון בנגב

# הפקולטה למדעי הטבע

המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

# מחקר ניסיוני של מנגנון תנועת בלוקים במדרונות סלע המונע משינויי טמפרטורה

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת התואר "מוסמך למדעי הטבע" (M.Sc.)

<u>מאת:</u>

אבירן פלדהיים

# <u>מנחים</u>:

פרופ' יוסי חצור, המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

ד"ר דגן בקון-מזור, המחלקה להנדסת בניין, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון.

חתימת המחבר:	:תאריך
חתימת המנחה:	
חתימת המנחה:	
חתימת יו"ר הועדה המחלקתית:	

תמוז התשע"ז

17 יולי, 2017

# מחקר ניסיוני של מנגנון תנועת בלוקים במדרונות סלע המונע משינויי טמפרטורה מאת אבירן פלדהיים עבודת גמר לתואר "מגיסטר" המחלקה למדעי הגאולוגיה והסביבה אוניברסיטת בן גוריון בנגב,2017

#### תקציר

פני השטח של כדור הארץ אינם תמיד אופקיים. הרים ונחלים הם רק חלק מתבניות הנוף השונות. מדרונות סלעיים הינם אחד מהמרכיבים של תבניות נוף אלו. במדרונות אלו קיימת הסכנה של הדרדרות ונפילת בלוקים המתנתקים מהמדרון הרציף. תנועת סלעים במדרון יכולה להיגרם ממספר מכניזמים שונים , כגון: רעידת אדמה, עליית לחץ המים בעקבות גשם ותהליך הקיפאון של מים המלווה בעלייה בנפח המים והפעלת לחץ על חללים בסלע. מנגנונים אלה יכלים לגרום לכשל מסוג החלקה (Sliding) או הפלה (Toppling) של בלוקים במורד המדרון. חשוב לציין שישנם אירועים שמקורם באדם כגון בנייה וכרייה, אך אלו הם מנגנונים הניתנים לשליטה. מנגנון נוסף העלול לגרום לתזוזת בלוקים במדרון הוא התגובה של הסלע לשינויי טמפרטורה. בעבודה זו נחקר מודל עקרוני שהוצע לאחרונה, המסביר כיצד התגובה לשינויי טמפרטורה מחזוריים עלול להביא לכשל מצטבר במדרון. במודל זה קיים סדק בבלוק בדיד הנשען על מישור משופע וממולא ע"י בלוקים מהסביבה כאשר בעקבות מחזורי חימום-קירור תתקיים תזוזה פלסטית של הבלוק הבדיד. ביטוי אנליטי עבור מודל זה הוצע בעבר על ידי Pasten and Santamarina. הבנת תהליך גיאומורפולוגי זה יכול לספק כללים חדשים בהערכת שיעור שחיקתם של מדרונות סלע. בעוד שעבודות קודמות נבדק המנגנון באמצעות מודלים פיזיקליים קטנים יחסית (ס"מ בודדים), במחקר זה נבדק מודל מבטון בקנה מידה גדול הקרוב לממדים של בלוקים בשדה (אורך המודל היינו 1.5 מטר), בתנאים מבוקרים בחדר אקלים מבוקר (CCR). על מנת למצוא את התערובת היעילה ביותר לביצוע הניסוי בוצעו בדיקות מעבדה למציאת תכונות מכניות ותרמיות של שלוש תערובות שונות. המקדמים השונים שנמצאו בבדיקות שימשו בהמשך לחישוב המודל האנליטי. המקדמים ( $\sigma_c$ ) שנמדדו הם: קשיחות הגזירה (Kj) , זווית חיכוך ( $(\emptyset)$ ), מקדם חיכוך ( $(\mu)$ ), חוזק לחיצה חד צירי מקדם התפשטות תרמי ליניארי (α), מוליכות תרמית (λ) ומקדם דיפוזיה תרמי (k). לאחר בחינת התערובות השונות ובחירת התערובת המתאימה ביותר, הוכן המודל הפיזיקלי מהתערובת שנבחרה. במהלך יציקת המודל הפיזיקלי הושתלו בתוכו מדי טמפרטורה (Thermocouple) אשר מדדו את השתנות הטמפרטורה בתוך הבלוק במשך כל שלבי הניסוי. בנוסף, בעזרת סדרה של שני סוגים של מדי תזוזה דיגיטליים וכן מצלמה ברזולוציה גבוהה נמדדה התזוזה של הבלוקים במודל הפיזיקלי. מכיוון שמדובר בשלוש שיטות בלתי תלויות למדידת תזוזה, ניתן להתייחס לתוצאות התזוזה המצטברת באמינות גבוהה.

טווח הטמפרטורה שנבדק במחקר זה הינו של כ 30° [2°] (35° – 5°), המייצג שינוי עונתי של הטמפרטורה בדרום הארץ ובמדבר יהודה. תוצאות התזוזה המתקבלת היא שהבלוק הבדיד מחליק כ- 0.018 מ"מ במחזור חימום-קירור אחד. כמות התזוזה של הבלוק הבדיד שווה גם מחליק כ- 0.018 מ"מ במחזור חימום-קירור אחד. כמות התזוזה של הבלוק הבדיד שווה גם לכמות הפתיחה שנמדדה בסדק. בנוסף לניסוי של המודל עם היתד, בוצע ניסוי של מאסף הבלוקים לכמות הפתיחה שנמדדה בסדק. בנוסף לניסוי של המודל עם היתד, בוצע ניסוי של מאסף הבלוקים אך ללא יתד, כאשר שאר התנאים נותרו זהים לאלו של הניסוי עם היתד. תוצאות הניסוי מראות שבעקבות שינויי הטמפרטורה בחדר קיימת תזוזה של הבלוק הבדיד גם ללא היתד (0.0077) מ"מ מחזוה ממתקבלת מהניסוי עם היתד. מוצאות הניסוי מראות שבעקבות שינויי הטמפרטורה בחדר קיימת תזוזה המתקבלת מהניסוי עם היתד. מוזה ממתחזה מ"מ"מ מ"מ

לאחר קבלת הנתונים מהמודל הפיזיקלי, נעשה חישוב של המודל האנליטי של Basten and בליחות המכניות Santamarina בהתאם לגיאומטריה של המודל בניסוי ועל סמך התכונות הפיזיקלי בוצע תיקוף של הבטון אשר נמדדו בניסויי מעבדה. בעזרת השוואת התוצאות מהמודל הפיזיקלי בוצע תיקוף למודל האנליטי על מנת לבחון את הפרמטרים המשפיעים ביותר על המודל האנליטי. התזוזה למודל האנליטי על מנת לבחון את הפרמטרים המשפיעים ביותר על המודל האנליטי. התזוזה שהתקבלה מהמודל האנליטי היא 0.277 מ"מ/מחזור, אשר גדולה בסדר גודל אחד מהתזוזה שהתקבלה מהמודל האנליטי היא 0.277 מ"מ/מחזור, אשר גדולה בסדר גודל אחד מהתזוזה שהתקבלה במודל האנליטי היא 0.277 מ"מ/מחזור, אשר גדולה בסדר גודל אחד מהתזוזה שהתקבלה במודל האנליטי היא 10.277 מ"מ/מחזור, אשר גדולה בסדר גודל אחד מהתזוזה שהתקבלה במודל האנליטי היא 10.277 מ"מ/מחזור, אשר גדולה בסדר גודל אחד מהתזוזה שהתקבלה במודל האנליטי, מוזיה שהתקבלה במודל הפיזיקלי מוני זה יכול לנבוע ממספר סיבות, כגון: ההבדל בממדיות שהתקבלה במודל האנליטי (1D) למודל הפיזיקלי (3D), הבדל בין הגאומטריה במקרים השונים. יחד עם זאת בדיקת הרגישות של הפרמטרים השונים ומידת השפעתם על המודל האנליטי, מראים שלבחירת הפרמטרים ישנה השפעה גדולה על תוצאות המודל האנליטי, כאשר הפרמטר המשפיע שלבחירת היינו מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי (מ). שילוב של ערכים בטווח המוכר בספרות, של מקדם התפשטות תרמי לינארי וקשיחות הגזירה של משטח ההחלקה, יכולים להביא להתאמה בתוצאות בין המודל האנליטי לניסוי הפיזיקלי.

לסיכום, המחקר תורם להבנת הפרמטרים המשפיעים על תגובת המודל המונע משינויי טמפרטורה. הבנת המשתנים יכולה להביא לשיפור החיזוי של כשל במדרונות סלע העשויים להוות סיכון. יכולת זאת תאפשר למנוע אסונות בנפש וברכוש וכן שמירה על אתרי מורשת חשובים.

Ш

# הבעת תודה

ברצוני להודות לכל האנשים שתרמו להצלחת מחקר זה ולכתיבת עבודה זו:

לפרופ' יוסי חצור, על ההנחיה המקצועית, היחס האישי , התמיכה והסבלנות לאורך כל הדרך בתואר ובמחקר.

לד"ר דגן בקון מזור, על שהנחה אותי לאורך כל המחקר, על אוזן קשבת וסבלנות רבה לכל הבעיות במהלך התואר בכלל ובמחקר בפרט.

לפרופ' נעם ויסברוד, על השימוש בחדר אקלים מבוקר והעזרה בכל הנוגע לחדר.

לד"ר סלבה פלצ'יק על ביצוע הבדיקות הטריאקסיאליות.

לרבקה עיני וצהלה שרעבי על הדאגה, התמיכה וההתמודדות עם בבירוקרטיה.

לדוד (דירו) קוסשווילי על העזרה הרבה בהכנת הדוגמאות לבדיקות.

לחיים דהן וויקטוריה אלקנברד מהמכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, על העזרה והסבלנות בהכנת המודל הפיזיקלי, העמדת הניסוי בחדר אקלים מבוקר וייעוץ הנדסי.

לבר אוחיון ונדב ביסמוט מהמחלקה להנדסת תוכנה במכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, על העזרה, ההסברים והסבלנות בנושא עיבוד התמונה.

לרועי רם ואילאיל לבקוב, חבריי מהתואר הראשון שעזרו בכל נושא המעבדה בשדה בוקר.

לחברי הקבוצה ההנדסית בבניין 60: נחום קזאז, Benguo He , יאיר גורדין, עומרי שטרית, יובל קיסר ,דורון מורד וניר בדט על ייעוץ, עזרה בסחיבות, העברות ציוד, ארוחות צהריים, הפסקות קפה וחברה.

לביבי קרפל ומתן אביטל מהבניין הסמוך, על התמיכה הנפשית והפסקות הקפה.

ולבסוף , ליעל אשתי - שללא התמיכה, העזרה, הפרגון וההבנה שלה לא הייתי מצליח לבצע את המחקר.

# תוכן עניינים:

1	.1
5 Pasten and Santamarina המודל האנליטי של	1.1
מודלים פיזיקליים9	1.2
מטרות המחקר	1.3
חשיבות המחקר	1.4
13	.2
בחירת התערובת המתאימה לבניית הבלוקים	2.1
.14 תכונות תרמיות	1
16 מכניות	2
19	2.2
2.2. הכנת המודל הפיזיקלי	1
2.2 חדר אקלים מבוקר	2
2.2. מדידת הטמפרטורה בבלוקים	3
2.2. מדידת התזוזה במודל הפיזיקלי	4
28 מערך המחשוב ואיסוף הנתונים	5
30	.3
בחירת התערובת המתאימה לבניית הבלוקים	3.1
30	1
33 אכונות מכניות	2
36 סיכום התוצאות של שלב בחירת התערובות	3
תוצאות הניסוי של המודל הפיזיקלי בחדר אקלים מבוקר	3.2
43 תוצאות התזוזה מהניסוי של המודל הפיזיקלי ללא יתד	3.3
46	.4
המודל הפיזיקלי בחדר אקלים מבוקר	4.1
47 אנליטי של Pasten and Santamarina הערכת התזוזה על פי המודל האנליטי של	4.2
סיכום ומסקנות	.5

53	נספחים	.6
53	.6. הטמפרטורה שנמדדה לאורך השנים 1949-2011 בסדום	1
54	.6 נתוני הטמפרטורה שנמדדה לאורך השנים 1949-2011 באילת	2
55	.6 דף כיול למד התזוזה מסוג VW, תיקון הטמפרטורה מודגש בריבוע כתום	3
56	ספרות	.7

# תוכן איורים:

2	איור 1א: מערכת המדידה לאורכו של הבלוק בצידו המזרחי של אתר מצדה מדרון מזרחי
3	איור 1ב: מערכת המדידה לאורכו של הבלוק בצידו המערבי של אתר מצדה מדרון מערבי
4	איור 2א: תוצאות מדידה מאתר מצדה בבלוק במדרון מערבי
5	איור 2ב: תוצאות מדידה מאתר מצדה בבלוק במדרון מזרחי
6	איור 3 –. אילוסטרציה של המודל הפיזיקלי
10	איור 4 המודל המוצע. A. כפי שקיים בטבע, B. מודל מופשט
11	איור 5 : סקיצת המודל לצורך חישוב FMAX הרלוונטי למקרה שלנו
	איור 6: א. יציקות הבטון עליהם נמדדו התכונות האלסטיות, ב. יציקת הבטון עליה נמדדה
14	התכונות התרמיות
	איור 7: א. מערך הבדיקה למדידת המקדם הדיפוזיה והמוליכות התרמית, ב. תנור החימום
15	ובלוק בתוכו במהלך קירור הבלוק
16	איור 8: הטמפרטורה היחסית כפונקציה של המיקום בדוגמה
	איור 9.1: א. מכבש גזירה מתוצרת TERRA TEK INC . ב. הכנת הדוגמאות למכבש
17	גזירה ישירה
	א. מבט צד. DIGITAL SHEAR MACHINE איור 9.2: מכשיר גזירה ישירה של קרקעות מסוג
18	ב. מבט על . ג. תא הגזירה התחתון. ד. תא הגזירה העליון
20	איור 10: מידות המודל שנבנה בסנטימטרים
	איור 11: א. מערבל הבטון במהלך העבודה להכנת התערובת ליציקה. ב. תבנית הבלוק
21	התחתון של המודל במהלך היציקה
21	איור 12: א. חבלים ומדי טמפרטורה שתולים בתוך הבטון. ב. הבלוקים בהשפרה
22	איור 13א: איור סכמתי של השולחן השופע שעליו הונח המודל
22	איור 13ב: המודל המורכב מחוץ למעבדה
23	איור 14. המערכת כולה בCCR
24	איור 15: עקרונות הפעולה של מדי התזוזה השונים
25	איור 16: מדי התזוזה מסוג פוטנציומטר 4 ו-3 בהתאמה, על גבי המודל
26	איור 17: מיקומי המדידים במודל ומספרם
27	איור 18: א. אזור הצילום במודל. ב. אזור ההתרחשות העיקרי
	איור 19: תמונה של אזור ההתרחשות העיקרי, א. לפני תהליך עיבוד התמונה.
27	ב. אחרי תהליך עיבוד התמונה

28 -	איור 20: מכשירי אגירת הנתונים AVW200 ו-CR1000
29 -	איור 21: סכמה של מערך המחשוב בניסוי
30 -	איור 22: תוצאות מבדיקת מקדם התפשטות התרמי של שלושת התערובות
	איור 23 : פרופילים של הטמפרטורה המנורמלת לטמפרטורת המטרה בזמנים שונים
32 -	בבדיקה למציאת מקדם הדיפוזיה התרמית והמוליכות התרמית
33 -	איור 24: תוצאות בדיקת גזירה ישירה לחישוב הקשיחות לגזירה
	איור 25: תוצאות בדיקת גזירה ישירה במרחב קולומב-מוהר לחישוב זווית החיכוך ומקדם
34 -	החיכוך של תערובת B1, תערובת B3 ותערובת B3
36 -	איור 26: תוצאות מהבדיקה הטריאקסיאלית לפי סוג התערובת
39 -	איור 27 : התפלגות הטמפרטורה לאורך המודל הפיזיקלי במהלך הניסוי.
	איור 28 : תוצאות המדידה ממדי התזוזה 1 ומצלמה 1– התקדמות הבלוק המחליק במורד
40 -	משטח ההחלקה
41 -	איור 29 : תוצאות המדידה של מדי תזוזה 3 ומצלמה 3 - התנהגות הסדק במהלך הניסוי.
41 -	איור 30 : השוואת תוצאות המדידה בין מד תזוזה 1 למד תזוזה 3 לפי סוג החיישן
42 -	איור 31 : תוצאות המדידה מחיישנים מספר 2
	איור 32 : תוצאות התזוזה האנכית של היתד לאחר החישוב מהפרש המדידה בין הVW2
43 -	לפוטנציומטר2
43 -	איור 33 : מערך המודל ללא היתד, מספרי החיישנים ומיקומם במודל
44 -	איור 34 : התפלגות הטמפרטורה לאורך המודל הפיזיקלי ללא היתד במהלך הניסוי
45 -	איור 35 : תוצאות המדידה מפוטנציומטר 1 – ניסוי ללא יתד
45 -	איור 36 : תוצאות המדידה מפוטנציומטר 3 – ניסוי ללא יתד
	איור 37: תוצאות הבדיקה במכשירי הגזירה השונים של ממשק בטון-בטון במאמצים גבוהים
48 -	ומאמצים נמוכים
	איור 38: השוואת תוצאות קשיחות לגזירה כפונקציה של המאמץ הנורמלי בממשק בטון-בטון
49 -	במאמצים גבוהים ומאמצים נמוכים בגרף חצי לוגריתמי
	איור 39 : התזוזה הצפויה מהמודל האנליטי עם השתנות מקדם ההתפשטות התרמי
50 -	והקשיחות לגזירה
	איור 40 : התזוזה הצפויה מהמודל האנליטי כפונקציה של מקדם ההתפשטות התרמי
51 -	והקשיחות לגזירה

# תוכן טבלאות:

טבלה 1 - מרכיבי התערובות במשקל, גרם(אחוז משקלי)
טבלה 2 - טבלת משקלים ונפחים.
טבלה 3 - משוואות החישוב לצורך השוואת המצלמה למד התזוזה 28
31 טבלה 4 - הערכים של מקדם ההתפשטות התרמי של שלושת סוגי הבטון שנבדקו.
טבלה 5 - הערכים של מקדם הדיפוזיה התרמי והמוליכות התרמית של שלושת סוגי הבטון 31
34 טבלה 6 - ערכי מקדמי החיכוך לפי סוג התערובת.
35 טבלה 7 - ערכי מקדמי החוזק לפי סוג התערובת.
טבלה 8 - סיכום תוצאות הבדיקות המכניות והתרמיות לפי סוגי התערובות 37
38 סבלה 9 - תוצאות חישוב המודל האנליטי לפי סוגי התערובות.
45 טבלה 10 - השוואה בין תוצאות התזוזה מהניסויים השונים.
טבלה 11 - ערכי קשיחויות לגזירה במאמצים נורמליים נמוכים 49
טבלה 12 - השוואת התזוזה במחזור חימום-קירור אחד המתקבל מהמודל האנליטי לתוצאות
49 שנמדדו במעבדה.

# 1. מבוא

פני השטח אינם תמיד אופקיים. הרים ונחלים הם רק חלק מתבניות הנוף שמרכיבות את טופוגרפיית כדור הארץ. מדרונות סלעיים הינם אחד מהמרכיבים של תבניות נוף אלו. במדרונות טופוגרפיית כדור הארץ. מדרונות סלעיים הימת הסכנה של הדרדרות ונפילת בלוקים המתנתקים מהמדרון הרציף. תנועת סלעים במדרון יכולה להיגרם ממספר רב של מכניזמים שונים. המכניזמים השונים הגורמים לנפילת בלוקים במדרון יכולה להיגרם ממספר רב של מכניזמים שונים. המכניזמים השונים הגורמים לנפילת בלוקים במדרון יכולה להיגרם ממספר רב של מכניזמים שונים. המכניזמים השונים הגורמים לנפילת בלוקים במדרון יכולה להיגרם ממספר רב של מכניזמים שונים. המכניזמים השונים הגורמים לנפילת בלוקים במדרון וכולה להיגרם ממספר רב של מכניזמים שונים. המכניזמים השונים הגורמים לנפילת בלוקים במדרון סלע על ידי מנגנונים שונים המסכנים את יציבות המדרון על ידי אירועים קצרי טווח כגון: רעידת אדמה [למשל (Yagoda-Biran, Hatzor, Amit, & Katz, 2010)], עליית לחץ המים רעידת אדמה [למשל (Iverson, 2000)], עליית לחץ המים הפלות גורם כשל במדרונות סלע [למשל (Toppling)]. מנגנוני כשל אלו יכולים להוביל למקרי החלקה (Sliding) או מקרי הפלה (Goodman, 1989)]. חשוב (מסלר החלקה נכויה, אך אלו הם מנגנונים הניתנים לשליטה בלוקים במורד המדרון, מנגנון התלוי בגאומטריה של הבלוק [למשל (Croll, 2080)]. חשוב למקרי החלקה (כרייה, אך אלו הם מנגנונים הניתנים לשליטה בלייה. (Croll, 2015).

במהלך שני העשורים האחרונים הראו מספר עבודות ששינויים בטמפרטורה של מסת הסלע עלולים לגרום לתזוזה בלתי הפיכה (פלסטית) מצטברת במערכות גיאולוגיות המורכבות מרכיבים בדידים [למשל (Pasten & Santamarina, 2014a, 2014b)]. עדויות מתחנות ניטור שעקבו אחר תזוזת בלוקים במדרונות סלע מראות כי לתזוזה זו יש קשר לטמפרטורת האוויר, ולעיתים רבות התנועה הינה חד כיוונית. Gunzburger וחובריו הראו שתנודות בטמפרטורה משחקות תפקיד מרכזי במערכת של נפילת בלוקים. תנודות אלו גורמות לתזוזה בלתי הפיכה אשר יכולה להעצים את השבירה במסת הסלע (Gunzburger, Merrien-Soukatchoff, & Guglielmi, להעצים את השבירה במסת הסלע (2005) ואף להתפתחות מאמצי מתיחה בסלע (Collins & Stock, 2016). Gischig הראו איך האפקטים המכאניים מורגשים גם בעומקים גדולים מעומק ההשפעה של הטמפרטורה cai כן, השפעת שינויי הטמפרטורה (Gischig, Moore, Evans, Amann, & Loew, 2011) נבחנה במספר מדרונות סלע טבעיים. למשל, בפארק יוסמיטי שבקליפורניה Collins וחובריו הראו שבעקבות שינויי טמפרטורה מתפתחים מאמצי מתיחה הגורמים להתקדמות של סדקים קיימים (Collins & Stock, 2016), בנוסף Vicko and greif בחנו מספר אתרי תיירות ומורשת בסלובקיה והראו שעל מנת לשמור על אתרים אלו יש צורך להביא בחשבון גם את התזוזה של הבלוקים בעקבות שינויי הטמפרטורה (VIcko & Greif, 2009). נתונים מאתר Bitchu-Matsuyama ביפן מראים שהסדקים מגיבים לטמפרטורה (Vladimir Greif, Sassa, & Fukuoka, 2006), באותו נושא של פתיחת וסגירת סדקים בעקבות טמפרטורה ניתן לראות עדויות מאתר מצדה אשר נמצא בצמוד להעתק ים המלח. באתר זה ישנן עדויות לנפילות בלוקים סביב ההר. בעקבות עדויות אלו (Bakun- התבצע ניטור של בלוקים במדרון המזרחי(Hatzor, 2003) (איור 1א) ובמדרון המערבי (Mazor, Hatzor, Glaser, & Carlos Santamarina, 2013)



איור 1א: מערכת המדידה לאורכו של הבלוק בצידו המזרחי של אתר מצדה מדרון מזרחי (Hatzor, 2003)

ההסבר הטבעי לכך הוא שסלעים, כיאה לחומר בטבע, מתכווצים בקור ומפשטים בחום. בעקבות מחזורים אקלימיים, בלוק הסלע מתנהג בהתאם לטמפרטורה. תוצאות הניטור מאתר מצדה מראות שישנה השפעה של שינויי הטמפרטורה היומית-שנתית על סדקים, מתוצאות אלו אשר מובאים באיור 2 ניתן לראות ששנוי טמפ' במחזור שנתי הינם קורלטיביים לפתיחה וסגירה של סדקים. אולם המחזוריות של הטמפרטורה לבדה אינה יכולה להסביר תנועה מצטברת של בלוקים במורד המדרון כפי שנצפה בתחנות הניטור. בעקבות תוצאות אלו הוצע מודל עקרוני למכניזם נוסף אשר מהווה גורם לתזוזת בלוקים במדרונות סלעיים ואף לנפילתם. המודל מבוסס על מנגנון עקרוני שבו קיים סדק בבלוק בדיד הנשען על מישור משופע וממולא ע"י בלוקים מהסביבה, כאשר בעת טמפרטורות נמוכות הסלעים מתכווצים עקב הקירור, חומר המילוי שבסדק נדחף פנימה, עמוק יותר במורד הסדק. כאשר הטמפרטורה עולה הבלוק מתרחב עקב החימום, הבלוק יזוז במורד המדרון עקב חומר המילוי המשמש כמחסום, תהליך זה יחזור על עצמו מספר פעמים עד לנפילת המדרון עקב חומר המילוי המשמש כמחסום, תהליך זה יחזור על עצמו מספר פעמים עד לנפילת הבלוק במורד המדרון. ניתן לראות אילוסטרציה של התהליך הפיזיקלי באיור 3. מודל זה מציג הבלוק במורד המדרון. ניתן לראות אילוסטרציה של התהליך הפיזיקלי באיור 3. מודל זה מציג לכן, ניתן לראות באיור 2 ששינויי הטמפרטורה המשמעותיים ביותר הם השינויים השנתיים ולא לכן, ניתן לראות באיור 2 ששינויים יומיים הינם שינויים קצרי טווח ועל כן לא מצליחים לחדור עמוק היומיים וזאת מכיוון ששינויים יומיים הינם שינויים קצרי טווח ועל כן לא מצליחים לחדור עמוק מספיק לבלוק על מנת ליצור השפעה גדולה על הסלע (Bakun-Mazor et al., 2013) ולגרום לתוזה הפלסטית של הסדק (Pasten, 2013). במחקר זה נעסוק בשינויים עונתיים בלבד.



איור 1ב: מערכת המדידה לאורכו של הבלוק בצידו המערבי של אתר מצדה מדרון מערבי Bakun-Mazor et al., 2013).



.(Bakun-Mazor et al., 2013) איור 2א: תוצאות מדידה מאתר מצדה בבלוק במדרון מערבי



איור 2ב: תוצאות מדידה מאתר מצדה בבלוק במדרון מזרחי (Hatzor, 2003).

# Pasten and Santamarina המודל האנליטי של 1.1

על מנת לנתח תנועה חד כיוונית על ידי המנגנון החדש הוצע מודל אנליטי על ידי Pasten and על מנת לנתח תנועה חד כיוונית על ידי המנגנון החדש הוצע מודל אי רציפות בדמות סדק, כאשר Santamarina. המודל מניח מקרה בו קיים בלוק סלע בעל מישור אי רציפות בדמות סדק, כאשר בלוקים קטנים מהסביבה נפלו פנימה לתוך הסדק ומילאו אותו, דבר הגורם לטריז בין הבלוק ומסת בלוקים קטנים מהסביבה נפלו פנימה לתוך הסדק ומילאו אותו, דבר הגורם לטריז בין הבלוק ומסת הסלע כמודגם באיור 4. במקרה כזה מחזורי טמפ' יכולים להביא לתזוזה פלסטית מצטברת (Pasten, 2013).



איור 3 - אילוסטרציה של המודל הפיזיקלי (Bakun-Mazor et al., 2013).

אף הראו שהשפעת הטמפרטורה הינה קריטית במצב בו המערכת Pasten and Santamarina נמצאת בגבול היציבות הסטטית שלה ואף הראה שמשרעת הטמפרטורה ואורך התקופה של המחזור הינה משמעותית למערכת (Pasten & Douglas, 2015). על מנת לכמת את התזוזה הפלסטית של סדק בעקבות שינויים תרמיים, Pasten and Santamarina השלטית של סדק בעקבות שינויים  $\Delta T$  [°C] גדול מהשינוי המקסימלי שגורם לתזוזה אלסטית בסדק, ניתן להגדיר את התזוזה הפלסטית בסדק  $\delta_j^p$  (*m*] לפי משוואה (1):

$$\delta_j^p = \delta_T - \delta_\sigma - \delta_j^* \tag{1}$$

כאשר:  $\delta_{j}^{*}\left[m
ight]$  - התפשטות תרמית , דחיסה אלסטית של הבלוק -  $\delta_{j}^{*}\left[m
ight]$  - עיבור אלסטי $\delta_{T}\left[m
ight]$  - אשר: של הגבשושיות במשטח ההחלקה.

6

בעקבות הפיתוח של Pasten and Santamarina ניתן לרשום את המשוואות הבאות:

זמן ההומוגניזציה [sec]  $t^*$  מוגדר כזמן הדרוש על מנת להעלות את הטמפ' במרכז הבלוק  $t^*$  [sec] זמן ההומוגניזציה מטמפרטורה התחלתית -  $T_0$  [°C] ל-  $T_0$  מטמפרטורת המטרה  $T_1$  [°C] וניתן לרשום אותו על ידי משוואה (2):

$$t^* \approx \frac{L_B^2}{2k} \tag{2}$$

 $.[m^2/s]$  - אורך הבלוק k ,[m] - מקדם הדיפוזיה התרמי של הסלע -  $L_B$  - כאשר:

את עומק ההשפעה ( נקרא גם "עומק החדירה" ) של הטמפ' בבלוק [*m*] ניתן להגדיר על ידי משוואה (3):

$$S_d \approx \sqrt{\frac{\lambda t_{exp}}{2\rho C_p}} \approx \sqrt{\frac{k t_{exp}}{2}}$$
 (3)

כאשר:  $\lambda$  - מוליכות תרמית (W/m/K, [W/m/K] - צפיפות הסלע ( $[Kg/m^3]$ ,  $[Kg/m^3]$  - קיבול החום הסגולי כאשר:  $\lambda$  - מוליכות הרמית ( $\lambda$  - מוליכות הסלע ( $t_{exp}$  , [J/Kg/K] - מול הסלע (J/Kg/K

מקדם הדיפוזיה התרמי  $k [m^2/ses]$  הינו פרופורציונלי ביחס ישיר למוליכות התרמית מקדם הדיפוזיה התרמי  $C_{\rm p} [J/Kg/K]$  וביחס הפוך לקיבול החום הסגולי  $\lambda [W/m/K]$  וביחס הפוך לקיבול החום הסגולי נינו אניתן לראות במשוואה (4):

$$k = \frac{\lambda}{\rho C_p} \tag{4}$$

7

מוליכות תרמית מוגדרת ככמות החום שעוברת בחומר, בעוד שקיבול חום מוגדר ככמות החום שדרושה על מנת להעלות את הטמפרטורה של יחידת מסת חומר במעלת צלסיוס אחת. מקדם הדיפוזיה התרמי מייצג את המהירות שבה החום יעבור בחומר.

בהתייחס לגיאומטריה המוצגת באיור 4 ובהנחה שזמן החשיפה גדול מספיק על מנת לחמם את כהתייחס לגיאומטריה המוצגת באיור 4 ובהנחה שזמן החשיפה לגיאומטריה כל המודל בצורה אחידה, ניתן להניח שעומק ההשפעה  $S_d\left[m\right]$  הינו כל רוחב הבלוק ( $L_B$ ) ורוחב המודל בצורה אחידה, ניתן להניח שעומק ההשפעה  $\delta_T\left[m\right]$  על ידי משוואה (5):

$$\delta_T = \alpha \Delta T_p (L_w + L_B) \tag{5}$$

כאשר:  $\Delta T_p$  ,[m] - מקדם התפשטות תרמי ליניארי  $L_w$  , $[1/^{\circ} ext{C}]$  - אורך הטריז  $\alpha_L$  - טווח שינוי הטמפרטורה המקסימלי [ $^{\circ} ext{C}$ ] .

מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי [1/ºC] מוגדר ככמות העיבור באורך של החומר כתלות בטמפרטורה וניתן לראות זאת במשוואה (6):

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \times \frac{dL}{dT} = \frac{\Delta \varepsilon_L}{\Delta T}$$
(6)

ינוי -  $dT, \Delta T$ , [m] - המרחק בין שתי נקודות המדידה - dL,[m] - שינוי באורך הדוגמא - L - שינוי -  $\Delta r, \Delta T$ , [m] - הטמפרטורה - L - מנחרה -  $\Delta \varepsilon_L$ , [°C] - עיבור אורכי

משיקולים של שיווי משקל סטטי הכוח המקסימלי שפועל במקביל למשטח ההחלקה לפני ההחלקה  $F_{max} \left[ N/m 
ight]$ על ידי משוואה (7):

$$F_{max} = \gamma L_B (H - \frac{1}{2} L_B \tan \eta) (\tan \phi \cos \eta - \sin \eta)$$
(7)

כאשר:  $\gamma$  - משקל מרחבי של הסלע [ $N/m^3$ ] ( $\gamma = \rho g$ ),  $\emptyset$  - זווית החיכוך של משטח ההחלקה ( $\gamma$  - משר:  $\gamma$  - זווית הנטייה של משטח ההחלקה ("],  $\eta$  - זווית הנטייה של משטח ההחלקה [].

ההתקצרות האלסטית שמתפתחת בסדק ובבלוק עצמו בעקבות הכוח המקסימלי מוגדרת ע"י משוואה (8):

$$\delta_{\sigma} = \frac{F_{max}}{HE} \left( L_W + \frac{L_B}{2} \right) \tag{8}$$

כאשר: E [Pa] - מודול האלסטיות של הסלע.

Pasten and Santamarina לקחו בחשבון רק מחצית מאורך הבלוק כיוון שלפחות צד אחד הינו מישור חופשי. בהנחה שנקודה A (נקודת המגע בין הבלוק למשטח ההחלקה באיור 4) נשארת סטטית במהלך תקופת החימום, ניתן להגדיר את תזוזת הגזירה של מישור ההחלקה במחזור אחד על ידי משוואה (9):

$$\delta_j^* = \frac{F_{max}}{K_j L_B} \tag{9}$$

.[Pa/m] כאשר  $K_i$  - קשיחות לגזירה של משטח ההחלקה (Pa/m

# 1.2 מודלים פיזיקליים

מספר מחקרים קודמים בדקו את המודל האנליטי של Pasten and Santamarina באמצעות מודל פיזיקלי במעבדה. במחקרים אלו נבחן המודל הפיזיקלי על בלוקים בסדר גודל של ס"מ בודדים, בתוך תאים שולחניים בהם ניתן לשלוט על הטמפרטורה. Greif וחובריו הראו את תנאי הגבול של היחס בין אורך הבלוק ( $L_b$ ) לאורך הטריז( $L_w$ ) על מנת שתתרחש דפורמציה פלסטית של הבלוק הבדיד (Pasten 2014). בנוסף Pasten וחובריו הראו על יציבות המודל ועל סגנון הכשל שיתרחש בעקבות שינויי הטמפרטורה, בנוסף Pasten מול $L_w$ ) לאורך הטריז משפיע על יציבות המודל ועל סגנון הכשל שיתרחש בעקבות שינויי הטמפרטורה, בנוסף משפיע קל יוחובריו הראו שהתזוזה המצטברת הינה קורלטיבית לאורך החשיפה וגודל האמפליטודה של הטמפרטורה (2015). בעבודת המחקר הנוכחית נבדק המודל הפיזיקלי הטמפרטורה (2015). בעבודת המחקר הנוכחית נבדק המודל הפיזיקלי המוצג באיור 4 בקנה מידה גדול (אורך כולל של 1.5 מטר). המודל שנבחן במעבדה במחקר זה נבנה מבטון. המודל שנבנה הוכנס לתוך חדר אקלים מבוקר (CCR - Climate Control Room).

כפי שצוין קודם לכן, המודל שנבחן במעבדה נבנה מבטון. אך בדומה לסלע, שמרכיביו השונים משפיעים על תכונותיו התרמיות והאלסטיות, גם מרכיבי תערובות הבטון משפיעים על תכונותיו התרמיות והאלסטיות של הבטון. לצורך תכנון תערובת הבטון ממנה נבנה המודל, נבדקו התכונות התרמיות והאלסטיות של שלוש תערובות בטון שונות (טבלה 1). כאשר התערובת שנבחרה לביצוע המודל הינה התערובת שתאפשר את בדיקת המודל הפיזיקלי בצורה היעילה ביותר. על מנת להתאים את המודל האנליטי של Pasten and Santamarina למודל הפיזיקלי שנבחן במחקר זה, חושב הכוח המקסימלי שפועל במקביל למשטח ההחלקה, לפני ההחלקה ע"י משוואה (10):

$$F_{max} = (L_b H_b \gamma) (\cos(\eta_1) \tan(\emptyset) - \sin(\eta_1)) + (\frac{L_{w1} L_{w2}}{2} H_w \gamma) (\cos(\eta_2) \tan(\emptyset) \cos(\eta_2) - \eta_1) - \sin(\eta_1))$$
(10)

[°]  $\eta_1$  , אורכי היתד,  $[m] L_{w1}, L_{w2}$  (כאשר:  $[m] H_w$  , גובה היתד,  $[m] H_b$  - אורכי היתד,  $[m] H_b$  - אורכי חונחת הנטייה של משטח ההחלקה  $\eta_2$  , אווית הנטייה של היתד מהאופק כשהיתד מונחת בתוך המערכת (איור 5).



.(Pasten, 2013) איור **ב**: A. כפי שקיים בטבע, B. מודל מופשט (A. כפי שקיים בטבע, B. מודל מופשט (Pasten, 2013).



איור 5 : סקיצת המודל לצורך חישוב FMAX הרלוונטי למקרה שלנו.

# 1.3 מטרות המחקר

במחקר זה נבדק המודל הפיזיקלי של תזוזת בלוקים במדרונות סלעיים בעקבות שינויים אקלימיים. המטרה העיקרית של המחקר היא לבצע תיקוף של המודל האנליטי של Pasten and Santamarina מול התוצאות המתקבלות מניסוי על מודל פיזיקלי במעבדה ולבחון את יישומו של המודל האנליטי לתהליכים בטבע. לשם כך בוצע מודל המורכב מבלוקים מבטון אשר הוכנסו לחדר אקלים מבוקר ונמדדה התנועה המצטברת שלהם כפונקציה של הטמפרטורה. מטרות המשנה של מחקר זה הן אם כן:

- 1. מדידה של תכונות החומר אשר יש להן חשיבות למודל האנליטי ותכנון תערובת בטון אשר תגיב בצורה היעילה ביותר לשינוי בטמפרטורה.
- הקמת מודל פיזיקלי ומערכת מדידה והתקנתם בחדר אקלים מבוקר ומדידה של תנועת הבלוקים כתגובה לשינויי הטמפרטורה בחדר.
- ניתוח התוצאות המתקבלות מניסוי המעבדה והשוואתן לתוצאות המתקבלות מהמודל
   האנליטי, תוך בדיקת רגישות הפרמטרים במודל.

# 1.4 חשיבות המחקר

מחקר זה עוסק בהבנת מודל פיזיקלי המדמה אחד מהתהליכים הטבעיים אשר עלולים להביא לכשל במדרונות סלע. בעזרת מחקר זה ניתן להבין טוב יותר את אחד מתהליכי הארוזיה המשפיעים על מדרונות סלע ומושפעים משינויי טמפרטורה. על ידי הבנת תהליך גיאומורפולוגי זה ניתן לספק כללים חדשים בהערכת קצב הבליה של מדרונות סלע. בנוסף, המחקר תורם לשיפור יכולת החיזוי של כשל במדרונות סלע העשויים להוות סיכון. יכולת זאת תאפשר למנוע אסונות בנפש וברכוש וכן שמירה על אתרי מורשת חשובים.

# 2. שיטות

בכדי לבחון את המודל הפיזיקלי בתנאי מעבדה, נבנה מודל מבטון על סמך הגאומטריה באיור 4. המודל הפיזיקלי עשוי מבטון ולא מסלע, על מנת לשלוט בצורה טובה יותר בגיאומטריה של רכיבי המודל וכן לאפשר הכנסה של מדי טמפרטורה לתוך מרכז הבלוקים זאת מתוך הנחה כי ההתנהגות המכאנית והתרמית של הבטון דומה לזו של הסלע. בנוסף, במודל מבטון ישנה אפשרות לקבוע את תכונות החומר, התרמיות והאלסטיות, שכמובן משפיעות על מהלך הניסוי. המודל מבטון הוכנס ל- CCR. השימוש ב- CCR מאפשר לבחון את המודל בקנה מידה גדול ולזרז את זמן המחזור העונתי. בדומה לסלע, שמרכיביו השונים משפיעים על תכונותיו התרמיות, גם מרכיבי תערובות הבטון משפיעים על תכונותיו התרמיות של הבטון. היחסים בין המרכיבים השונים משפיעים על המוליכות התרמית הסופית של הבטון, למשל הגדלת היחס מים/צמנט בתערובת תוביל למוליכות תרמית נמוכה יותר של הבטון. הגדלת נפח האגרגטים בבטון תביא לעלייה במוליכות התרמית. לסוג האגרגטים גם השפעה גדולה על המוליכות, מכיוון שלסלעים השונים המהווים את מקור האגרגטים, יש מוליכות תרמית שונה (Khan, 2002).על מנת לקבוע את התערובת האופטימלית לביצוע הניסוי נבחנו שלוש תערובות שונות, כאשר הפרמטרים שנבדקו הם התכונות המכניות והתרמיות של החומר: קשיחות לגזירה (Kj) , זווית חיכוך (θ), מקדם חיכוך (μ), חוזק לחיצה חד (k) אירי ( $\sigma_c$ ), מקדם התפשטות תרמי ליניארי ( $\alpha$ ), מוליכות תרמית ( $\lambda$ ) ומקדם דיפוזיה תרמית ( $\sigma_c$ ). בחירת התערובת המתאימה נעשתה על סמך התגובה למנגנון המוצע לפי חישובים המבוססים על המודל האנליטי של Pasten and Santamarina. לאחר בחירת התערובת המתאימה, נבנה המודל הפיזיקלי והוכנס לחדר אקלים מבוקר, שם נמדדה התגובה שלו לשינויי טמפרטורה. התוצאות מהניסוי בחדר אקלים משמשות לתיקוף המודל האנליטי ובחינת הרגישות של הפרמטרים עליו הוא מבוסס.

# 2.1 בחירת התערובת המתאימה לבניית הבלוקים.

על מנת להעריך את התגובה הצפויה של המודל הפיזיקלי, הוזנו הפרמטרים של התכונות הנבדקות של הבטון למשוואות (1),(5), (8) ו-(10) לצורך חישוב המודל האנליטי. הבדיקות המכניות והתרמיות בוצעו על כל אחת מהתערובות, התערובות שנבדקו מוצגים בטבלה 1.

B3	B2	B1	
5200 (36%)	5500 (24%)	6000 (26%)	צמנט (פורטלנד)
6000 (41%)	7600 (33%)	14000 (61%)	אגרגט דק (חול קוורץ)
1000 (7%)	7600 (33%)	0 (0%)	אגרגט גס (גיר)
2420 (17%)	2500 (11%)	3000 (13%)	מים

## טבלה 1- מרכיבי התערובות במשקל, גרם(אחוז משקלי).

# 2.1.1 תכונות תרמיות

על מנת לבצע בדיקות למציאת התכונות התרמיות: מקדם התפשטות תרמי, מוליכות תרמית ומקדם הדיפוזיה התרמית, נוצקה תבנית בגודל של 28X7X7 ס"מ<sup>3</sup> מכל תערובת. בזמן היציקה הוכנסו 7 מדי טמפרטורה במרווחים שווים למרכז הבלוק. בנוסף, הוכנסו שני ברגים שאליהם חובר מד התזוזה (איור 6ב).



# איור 6: א. יציקות הבטון עליהם נמדדו התכונות האלסטיות, ב. יציקת הבטון עליה נמדדה התכונות התרמיות.

לצורך בידוד הבלוק מהשפעות חיצוניות ובריחת חום החוצה בודד הבלוק על ידי קצף בידוד מסוג פוליאתילן. על הבלוק הקטן בוצעו שתי בדיקות, הבדיקה הראשונה נועדה למצוא את מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי. בבדיקה זו חומם הבלוק בתנור ל-50°C, לאחר הגעה לטמפ' אחידה, כובה התנור ובכך ניתן לבלוק להתקרר עד להגעה לטמפ' החדר (איור 7ב). Linear Variable ) LVDT במהלך ההתקררות נמדדה התכווצות הבלוק בעזרת מד התזוזה Linear Variable ) במהלך ההתקררות נמדדה התכווצות הבלוק בעזרת מד התרמי הלינארי של הבטון חושב באופן ישיר (Differential Transformer , מקדם ההתפשטות התרמי מציאת מקדם הדיפוזיה והמוליכות התרמית באמצעות משוואה (6). בבדיקה השנייה שמטרתה מציאת מקדם הדיפוזיה והמוליכות התרמית חומם הבלוק על ידי שני גופי חימום שהוצמדו לקצוות הדוגמא (ראה איור 7א).

v/V בכל שלב במהלך הניסוי נמדדו הטמפרטורות לאורך הבלוק. מנתונים אלה שורטט גרף של v/V (°C] . כפונקציה של v/v - טמפרטורת המטרה v-v - טמפרטורת המטרה [°°], v-v - מיקום מד הטמפרטורה בבלוק [m], l- אורך חצי הדוגמה [m]. הפרופילים של הטמפרטורה - x Carslaw& Jeager שהתקבלו מהבדיקה מושווים באופן גרפי לעקומים תיאורטיים שהוצגו על ידי Carslaw& Jeager שהתקבלו מהבדיקה מושווים באופן גרפי לעקומים תיאורטיים שהוצגו על ידי T - גלכל עקום ערך T (איור 8) ומייצגים ערך חסר ממד - 1. לכל עקום ערך T אורך אשר נתון במשוואה (11) ובאמצעותו יחושב מקדם הדיפוזיה התרמי של הבטון  $k [m^2/sec]$ 

$$T = \frac{k * t}{l^2} \tag{11}$$

כאשר : T- פקטור הזמן, k - מקדם הדיפוזיה התרמי [m<sup>2</sup>/sec], t- זמן [sec], l - אורך חצי - T. הדוגמה [m].

לאחר מציאת מקדם הדיפוזיה התרמית ניתן יהיה להעריך את המוליכות התרמית של הבטון בהנחת קיבול חום אופייני לבטון.



איור 7: א. מערך הבדיקה למדידת המקדם הדיפוזיה והמוליכות התרמית, ב. תנור החימום ובלוק בתוכו במהלך קירור הבלוק.



איור 8: הטמפרטורה היחסית כפונקציה של המיקום בדוגמה (H.S.Carslaw & J.C.Jaeger, n.d.).

#### 2.1.2 תכונות מכניות

על מנת לבצע בדיקות למציאת התכונות המכניות : קשיחות הגזירה (Kj) , זווית חיכוך (heta), מקדם חיכוך ( $(\mu)$ , חוזק לחיצה חד צירי ( $\sigma_c$ ), הוכנו קוביות בטון בגודל של 10X10X10 ס"מ<sup>3</sup> (איור 6א).

הבדיקות בוצעו בעזרת שלושה מכשירים הנמצאים במעבדה למכניקת הסלע באוניברסיטת בן גוריון (מכשירים 1,3) ובמעבדה לקרקעות במכללה האקדמית ע"ש סמי שמעון קמפוס באר שבע (מכשיר 2):

1. מכבש גזירה ישירה לסלעים מתוצרת Terra Tek Inc (איור 9.1) המשמש לבדיקת גזירה ישירה בטווח מאמצים גבוה (מגה - פסקלים).

2. מכשיר גזירה ישירה לקרקעות מסוג Digital Shear Machine מתוצרת ELE (איור 9.2)
 המשמש לבדיקת גזירה ישירה בטווח מאמצים נמוך (קילו - פסקלים).

3. מכבש טריאקסיאלי FX-S-33090 מתוצרת Terra Tek - המשמש לבדיקת לחיצה חד צירית.



ב. הכנת הדוגמאות למכבש . TERRA TEK INC איור 9.1 איור 9.1 איור 1.6: א. מכבש גזירה ישירה לסלעים מתוצרת גזירה ישירה .1, שתי הקופסאות לאחר הביטון של הקופסא העליונה. 2. מבט-על על שתי הקופסאות לאחר ביצוע הניסוי.

<u>בדיקת גזירה ישירה במאמצים גבוהים:</u> הבדיקות לגזירה ישירה במאמצים גבוהים (מגה -פסקלים) בוצעו באמצעות מכבש הגזירה הישירה לסלעים על קוביית בטון של 10X10X10 ס"מ<sup>3</sup> ( איור 6א). בדיקת גזירה ישירה נועדה להערכת קשיחות לגזירה (Kj),מקדם החיכוך (μ) וזווית החיכוך (∅) של ממשק בטון-בטון. מכבש הגזירה הישירה מורכב מבוכנה אנכית ובוכנה אופקית. ניתן לשלוט הן על הכוח הנורמלי הפועל על הדוגמא על ידי הבוכנה האנכית והן על כוח הגזירה המופעל על ידי הבוכנה האופקית, בשני מעגלי בקרה, כוח ותזוזה. ההכנה לניסוי זה כללה המופעל על ידי הבוכנה האופקית, בשני מעגלי בקרה, כוח ותזוזה. ההכנה לניסוי זה כללה הכנסת הדוגמא לקופסת הגזירה התחתונה, ווידוא שהדוגמא מפולסת וביטון הדוגמא בתוך בקופסה. לאחר שהבטון התייבש, הולבש על החלק הבולט של הדוגמא קרטון עם "חלון" התואם לבלוק, קופסת הגזירה העליונה הורכבה על ידי פלטות וברגים לקופסה התחתונה. בשלב האחרון בוטנה הדוגמא העליונה על גבי הדוגמא התחתונה (איור 9.11). הבדיקה בוצעה במס'

הקשיחות לגזירה [Pa/m נמצאה על ידי חישוב השיפוע של החלק הליניארי בגרף של מאמץ  $K_{j}$  [Pa/m] הגזירה [ $rac{ra}{a}$  למול כמות התזוזה (u [mm], מקדם החיכוך [ $\circ$ ] ע וזווית החיכוך  $\tau$  [Pa] חושבו על  $\tau$  [Pa] הגזירה המקסימלי כמות התזוזה ( $\tau_{max}$  [Pa] ועל ידי המאמץ הנורמלי ( $\sigma_{n}$  [Pa] אמץ הגזירה המקסימלי ( $\tau_{max}$  [Pa] אוגדר ע"י משוואה (12):

$$\mu = \frac{\tau_{max}}{\sigma_n} \tag{12}$$

זווית החיכוך מוגדרת ע"י משוואה (13):

$$\emptyset = \tan^{-1}(\mu) \tag{13}$$

<u>בדיקת גזירה ישירה במאמצים נמוכים:</u> בנוסף לבדיקת הגזירה הישירה במכבש הגזירה הישירה ההידראולי לסלעים בוצעה בדיקת גזירה ישירה על ממשק בטון – בטון באמצעות מכשיר גזירה ישירה של קרקעות מסוג Digital Shear Machine של חברת ELE international (איור 2.9,2,9,2), שבו ניתן להפעיל מאמצים בטווח של קילו-פסקלים. השימוש בשני מכבשים מאפשר לחקור את התלות של התכונות המכאניות, לרבות קשיחות הגזירה, על פני טווח רחב של מאמץ נורמלי על ממשק הגזירה. במכשיר זה ניתן לשלוט על הכוח הנורמלי הפועל על הדוגמא על ידי הבוכנה האנכית בצורה ידנית, על ידי הוספת משקל. כמו כן ניתן לשלוט גם על מהירות הגזירה המופעל על ידי הבוכנה האופקית בצורה ממוחשבת. תאי הגזירה של המכשיר הינם 10 X ס"מ<sup>2</sup>. ההכנה לניסוי זה כללה חיתוך הדוגמא מקוביית הבטון של 1000 ס"מ<sup>2</sup> והכנסתה לתא הגזירה התחתון(איור 2.9ג). בנוסף הוכנה דוגמא של 8.7 X 9 ס"מ<sup>2</sup> אשר הוכנסה לתא הגזירה העליון(איור 2.9ג). בנוסף הוכנה דוגמא מפולסת קובעה הדוגמא בעזרת דבק אפוקסי קשיח הגזירה העליון(איור 2.9ג). בנוסף הוכנה דוגמא מפולסת עובעה איגמיר בעזרת דבק אפוקסי קשיח לתא הגזירה העליון. הבדיקה בוצעה במס' מחזורים שונים של כוח נורמלי בטווח של 7.00 עד לתא הגזירה העליון. הבדיקה בוצעה במס' מחזורים שונים של כוח נורמלי בטווח של 0.00 עד העליון (במאמצים נמוכים וגבוהים).



ELE איור 3.2: מכשיר גזירה ישירה של קרקעות מסוג Digital Shear Machine של חברת ואיור 9.2 מכשיר גזירה ישירה של ה. וא הגזירה העליון. א. מבט צד, ב. מבט על . ג. תא הגזירה התחתון. ד. תא הגזירה העליון.

בדיקת לחיצה חד צירית: בדיקה במכבש הטריאקסיאלי בוצעה על גלעין באורך 100 מ"מ ובקוטר 50 מ"מ. הגלעין לוטש לדרגת חספוס עד 0.025 מ"מ וסטיית הניצבות אינה עולה על 0.25 <sup>°</sup>. על הגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד ליצירת כשל. מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים: חוזק הגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד ליצירת כשל מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים הגלעין היגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד מיצירת כשל. מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים הגלעין היגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד ליצירת כשל מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים היזק הגלעין היגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד ליצירת כשל מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים היזק הלחיצה החד הגלעין מופעל בהדרגה כוח צירי עד מידי ליצירת כשל מבדיקה זו ניתן לחשב מספר פרמטרים היזק היזק היזק היזק מופעל בהדרגה כוח צירי נחשב באסון [Pa] ויחס פואסון [-] את חוזק הלחיצה החד צירי נחשב באמצעות משוואה (16) ואת יחס פואסון נחשב באמצעות משוואה (16) ואת יחס פואסון נחשב באמצעות משוואה (16):

$$\sigma_c = \frac{P_{peak}}{A} \tag{14}$$

כאשר: P<sub>peak</sub> - כוח הלחיצה המרבי בו התרחש הכשל בדוגמה[N], A - שטח החתך של הדוגמה [m<sup>2</sup>].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{axial}} \tag{15}$$

.[-] עיבור צירי ε<sub>axial</sub> :כאשר

$$\nu = \frac{\varepsilon_{mean\,radial}}{\varepsilon_{axial}} \tag{16}$$

.[-] כאשר -  $\epsilon_{axial}$  - ממוצע העיבורים הרדיאלים -  $\epsilon_{mean\ radial}$  - נירי (-].

# 2.2 מודל פיזיקלי

# 2.2.1 הכנת המודל הפיזיקלי

לאחר תהליך בחירת תערובת הבטון המתאימה, הוכנו הבלוקים המיועדים למודל הפיזיקלי על ידי יציקת תערובת הבטון לתוך תבניות עץ שנבנו לצורך המחקר. חתך צד של המודל ומידותיו ניתן לראות באיור 10. אורך המודל כולו הוא 122 ס"מ בעוד שאורך הבלוק התחתון, שהוא מישור ההחלקה, הינו 150 ס"מ, 28 הסנטימטרים ה"נותרים" נועדו לאפשר לבלוק לבצע החלקה מבלי שהוא ייפול מבלוק מישור ההחלקה.

לצורך הכנת התערובת ליציקה בוצע שימוש במערבל בטון בנפח 30 ליטר (איור 11א). את הבטון שהוכן במערבלים יצקנו לתוך תבניות העץ שהוכנו מראש (איור 11ב), לאחר היציקות הונחו החוכן במערבלים יצקנו לתוך תבניות העץ העץ שהוכנו מראש (איור 11ב), לאחר היציקות הונחו התבניות לאשפרה (איור 12א). במהלך היציקות הושתלו בתוך הבטון מדי טמפרטורה (Thermocouple) לצורך מדידת הטמפרטורה בתוך הבלוקים השונים במהלך הניסוי, כמו כן

הושתלו גם חבלים לצורך הרמה והרכבת המודל במעבדה (איור 12ב). משקל ארבעת הבלוקים המרכיבים את המודל הפיזיקלי ונפחם מובאים בטבלה 2.



איור 10: מידות המודל שנבנה בסנטימטרים, α-20.14°°.

שולחן פלדה בעל זווית שיפוע של 15<sup>0</sup> הוכן מבעוד מועד (איור 13א) ועליו הונח המודל הפיזיקלי. לוח פלסטיק (HDPE) בעובי 5 מ"מ ועליו שכבת גריז משמשים כמשטח מבודד בין בסיס המודל מבטון לבין שולחן הפלדה, על מנת להפריד את ההתפשטות התרמית של הפלדה מהבטון. לאחר ההרכבה של המודל הפיזיקלי (איור 13ב) על גבי השולחן הוכנס למעבדה.



איור 11: א. מערבל הבטון במהלך העבודה להכנת התערובת ליציקה. ב. תבנית הבלוק התחתון של המודל במהלך היציקה.



איור 12: א. חבלים ומדי טמפרטורה שתולים בתוך הבטון. ב. הבלוקים בהשפרה.

משקל [Kg]	נפח [m³]	בלוק
552	0.24	sliding block
75.9	0.033	wedge block
213.9	0.093	block mass
310.5	0.135	sliding surface
1152.30	0.501	כל הבלוקים יחד

#### טבלה 2 - טבלת משקלים ונפחים.



איור 13א: איור סכמתי של השולחן השופע שעליו הונח המודל.



איור 13ב. המודל המורכב מחוץ למעבדה.

# 2.2.2 חדר אקלים מבוקר

במחקר זה נעשה שימוש בחדר אקלים מבוקר (CCR) של מכון צוקרברג לחקר המים של אוניברסיטת בן גוריון בנגב, הממוקם בקמפוס שדה בוקר. חדר זה הינו חדר גדול המאפשר שליטה בעוצמה ובמשך הזמן של הטמפרטורה. קירור החדר נעשה על ידי מזגן שמזרים אויר מחוץ לקירות החדר ובכך מקרר את החדר באופן אחיד וללא יצירת רוח. חימום החדר נעשה על ידי תנורים הממוקמים סמוך לתקרה (Kamai, Weisbrod, & Dragila, 2009). ויסות הטמפ' נעשה על ידי

מדי טמפרטורה המושתלים בתוך החדר ומחוברים למחשב שמפעיל ומכבה את המזגן/תנור מדי טמפרטורה המושתלים בתוך החדר הוא בין  $^{\circ}$  C  $^{\circ}$  ל  $^{\circ}$   $^{\circ}$  40 C  $^{\circ}$  תוך שמירה על טמפ' Ganot, Dragila, & Weisbrod, 2014; Kamai et al., ) 0.5 C  $^{\circ}$   $\pm$  קבועה בחדר בדיוק של  $\pm$   $^{\circ}$  20.5 C (2009; Nachshon, Weisbrod, & Dragila, 2008 השולחן המשופע, הוכנסה המערכת לחדר אקלים מבוקר (איור 14). טמפרטורת המטרה שנבחנה השולחן הניסוי היא טמפרטורה של  $^{\circ}$  5 בקירור וטמפרטורה של  $^{\circ}$  5 בקירור וטמפרטורה של  $^{\circ}$  5 בחימום ( $\Delta T = 30^{\circ}$ ). לאחר הרכבת המודל הפיזיקלי על גבי נספחים 2.6.1,6.2 בחימום ( $\delta T = 30^{\circ}$ ).



איור 14. המערכת כולה בCCR.

#### 2.2.3 מדידת הטמפרטורה בבלוקים

לצורך מדידת הטמפרטורה במהלך הניסוי הושתלו בתוך המודל הפיזיקלי 7 מדי טמפרטורה מסוג PP-T-24) T (PP-T-24, בטווח טמפרטורה של ℃1000 עד 18°0 – . מדי הטמפרטורה הושתלו במהלך היציקה ובכך נמנע הפרה של הבטון. מדי הטמפרטורה הושתלו לעומק של 30 ס"מ כך שהם מודדים את הטמפרטורה לאורך מרכז פנים הבלוק.

## 2.2.4 מדידת התזוזה במודל הפיזיקלי

על מנת לקבל את התזוזה של הבלוקים במודל הפיזיקלי נעשה שימוש בשתי שיטות מדידה שונות: 1) באמצעות מדי תזוזה, 2) באמצעות צילום ועיבוד תמונה.

<u>4 מדי תזוזה</u>: 8 מדי תזוזה דיגיטליים חוברו בצד החיצוני של הבלוקים השונים במודל (איור 16). 4 מתוכם מסוג Encardio Rire *VW*) *Vibrating Wire crack meter* בעלי טווח מדידה של 15 מ"מ וטווח שגיאה ליניארית של 0.09% (0.00% מ"מ). מדי התזוזה מסוג זה פועלים על של 15 מ"מ וטווח שגיאה ליניארית של 0.09% (0.09% מ"מ). מדי התזוזה מסוג זה פועלים על עקרון של מתח מיתר משתנה (איור 15א), כאשר שינוי תדר לפי המתיחות של מיתר מעיד על שינוי באורך המיתר (איור 15א). ו- 4 מדי תזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר שינוי באורך המיתר (איור 15א). ו- 4 מדי תזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 15א). ו- 4 מדי תזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 15א). מדי תזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 15א). מדי מזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 15א). מדי מזוזה נוספים שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 15א). מדגם 300 מדגם שחוברו הינם מסוג פוטנציומטר מינוי באורך המיתר (איור 100 מ"מ). מדי התזוזה מסוג זה פועלים על עקרון של מימ וטווח שגיאה ליניארית של 0.00 מ"מ). מדי התזוזה מסוג זה פועלים על עקרון של נגד משתנה, כאשר שינוי בהתנגדות החשמלית מעיד על שינוי באורך המכשיר (איור 15ב).



## .VW איור 15. עקרונות הפעולה של מדי התזוזה השונים. א. מד התזוזה מסוג ב. מד התזוזה מסוג פוטנציומטר.

חשוב לציין שישנה תגובה של מדי התזוזה עצמם לשינוי הטמפרטורה שנמדדים במהלך הניסוי, תגובה זו נלקחת בחשבון ומתוקנת ע"י תיקון טמפרטורה בקוד המכשיר מסוג VW. תיקון טמפרטורה זה נעשה לפי משוואה (17). ניתן לראות את המשוואה מודגשת בריבוע כתום בדף כיול לדוגמא של מד התזוזה VW (נספח 6.3).

$$Temperature \ Correction = -K(T_1 + T_0) \tag{17}$$

. [°C] כאשר -  $T_0$  , [°C] כאשר -  $T_0$  , [°C] כאשר -  $T_1$  - טמפרטורת ההתחלה - K : כאשר - K

מדי התזוזה מסוג פוטנציומטר חוברו בצמוד למדי התזוזה מסוג VW (איור 17) , למעט במקרה של חיישנים מספר 2 (VW 2, Potentiometer 2) אשר חוברו משני צדדי היתד. מיקומם של מדי התזוזה השונים ומדי הטמפרטורה על גבי המודל מתואר באיור 17.



איור 16: מדי התזוזה מסוג פוטנציומטר (תחתונים) ומדי התזוזה מסוג VW (עליוניים). מוצגים 16 מדידים 3,4 בהתאם למיקום באיור 17.



איור 17: מיקומי המדידים במודל ומספרם.

<u>צילום ועיבוד תמונה:</u> שיטה נוספת למדידת התזוזה במהלך הניסוי היא באמצעות צילום של אזור ההתרחשות העיקרי על פני שטח של 15.95 X 10.3 ס"מ<sup>2</sup> (איור 18ב) בעזרת מצלמה של חברת SVS של Nikon , בעלת רזולוציה של 29 mega pixel . לבלוקים השונים נקדחו באזור ההתמקדות ברגים עם דסקיות ברזל (שייבה) (איור 19א) על מנת לעגן נקודות ברורות בתמונה שמחוברות לבלוקים. נלקחו תמונות בפסיעות זמן של 15 דקות. על מנת לזהות את התזוזות שמתרחשות במודל נעשה שימוש במספר אלגוריתמים לעיבוד תמונה:

- זיהוי ראשוני של מציאת קווי מתאר בתמונה בינארית (תמונה בשחור לבן), אלגוריתם זה
   Suzuki & Abe, ) Suzuki and Abe מבוסס על מספר אלגוריתמים המתוארים על ידי
   1985).
- 2. מציאת הצורה בתוך קווי המתאר נעשה על ידי אלגוריתם: Ramer–Douglas–Peucker.
  - .3. מציאת נקודת מרכז כל צורה נעשה על ידי פונקציית Central Moment.

דוגמא לתמונה כפי שצולמה לפני ואחרי העיבוד ניתן לראות באיור 19.


איור 18: א. המצלמה המכוונת לדפנות המודל בתוך חדר האקלים. ב. אזור המיקוד של המצלמה (10.3 × 15.95 ס"מ²).



איור 19: תמונה של אזור המיקוד במודל, א. לפני תהליך עיבוד התמונה. ב. אחרי תהליך עיבוד התמונה.

לצורך השוואה בין תוצאות התזוזה מהשיטות השונות נעשה חישוב ועיבוד הנתונים בצורה הבאה: ניקח לדוגמא את מד תזוזה 1, מד זה מודד את התזוזה בין הבלוק המחליק (sliding block) למשטח ההחלקה (sliding surface), התזוזה הרלוונטית המקבילה שחושבה מהמצלמה למד תזוזה 1 ("מצלמה 1") היא השינוי במרחק בציר ה-X בין עיגול 5 (המקובע לבלוק המחליק )לעיגול 1 (המקובע למשטח ההחלקה) בהתאם לאיור 19ב. בדרך זו נעשה חישוב מקביל לכל מדי התזוזה (טבלה 3). הנתונים מהמצלמה מתקבלים בפיקסלים, גודל התמונה הינו 2°pixels 6576X4384 ו - 15.95X10.3 ס"מ<sup>2</sup> בהתאמה. יחס ההמרה המתקבל הוא של 1 D.024 = Pixel מ"מ. ניתן לראות באיור 19 כי ישנם מדבקות "לוח שחמט" בתמונה, לוחות אלו נועדו לשם איפוס המצלמה באופן מדויק מול אזור ההתרחשות העיקרי.

מצלמה	משוואה לחישוב מהתמונה	מד תזוזה
1	X5-X1	1
3	X5-X4	3

טבלה 3 – משוואות החישוב לצורך השוואת המצלמה למד התזוזה.

#### 2.2.5 מערך המחשוב ואיסוף הנתונים

מדי התזוזה (VW) מחוברים ל-2 מכשירי AVW200 אשר מודדים את התדר האופייני של חיישני VW ומעבירים לאוגר נתונים - CR1000 (איור 20) בנוסף למדי הטמפרטורה. מכשיר ה-CR1000 הינו מכשיר אגירת נתונים המאפשר שימוש במספר מכשירים בו זמנית, מכשיר זה מחובר למחשב. מדי התזוזה מסוג פוטנציומטר מחוברים למחשב באמצעות אוגר נתונים מסוג מחובר למחשב. מדי התזוזה מסוג פוטנציומטר מחוברים למחשב באמצעות אוגר נתונים מסוג MINILOG של חברת SIM STRUMENTI. הנתונים נקלטים בעזרת תוכנת המחשב AVB ניתן לראות איור סכמתי של החיבורים באיור 21. המחשב הראשי של מערך הניסוי ממוקם בתוך חדר האקלים המבוקר ומחובר לרשת האינטרנט המאפשרת גישה מרחוק.



איור 20: מכשירי אגירת הנתונים AVW200 ו-CR1000.



. איור 21: סכמה של מערך המחשוב בניסוי

#### 3. תוצאות

#### 3.1 בחירת התערובת המתאימה לבניית הבלוקים

בחלק זה יוצגו תוצאות מהבדיקות למציאת מקדמים תרמיים ותכונות מכניות של שלושה סוגי בטון שונים. בדיקות אלו הינם שלב מקדים לביצוע הניסוי של המודל הפיזיקלי במעבדה. בעזרת תוצאות אלו נבחרה תערובת הבטון שתרכיב את המודל הפיזיקלי שיבחן בחלק המרכזי של המחקר

#### 3.1.1 תכונות תרמיות

שלוש בדיקות למציאת מקדם ההתפשטות התרמי (α) בוצעו על שלושה דגמים שהוכנו משלוש תערובות שונות של בטון בהתאם לטבלה 1. תוצאות הבדיקות ניתן לראות באיור 22 . בהתאם למשוואה (6) , מקדם ההתפשטות התרמי הינו היחס בין העיבור הצירי והטמפרטורה. תוצאות הבדיקות למציאת מקדם ההתפשטות התרמי שחושב מהגרף באיור 22 מוצגים בטבלה 4.



איור 22: תוצאות מבדיקת מקדם התפשטות התרמי של שלוש התערובות.

Concrete mixture	Thermal expansion exefficient [10-6 oc-1]	linear regression
Concrete mixture	Thermal expansion coefficient [10 ° °C <sup>-</sup> ]	coefficient (R <sup>2</sup> )
B1	6.98	0.984
B2	4.67	0.982
B3	3.16	0.943

טבלה 4 – הערכים של מקדם ההתפשטות התרמי של שלושת סוגי הבטון שנבדקו.

טווח הערכים שהתקבלו הינו גדול יחסית, ככול הנראה עקב שוני משמעותי בין התערובות. בהתאם לטבלה 1 ניתן לראות שתערובת B1 הינה תערובת ללא אגרגט גס ועל כן ההבדל בינה לבין B2 ו- B3 הוא הגדול ביותר, בעוד שתערובות B2 ו- B3 מובדלות אחת מהשניה ביחס אגרגט גס/אגרגט דק ועל כן ההבדל ביניהם קטן. בנוסף לבדיקות למציאת מקדם ההתפשטות התרמי גס/אגרגט דק ועל כן ההבדל ביניהם קטן. בנוסף לבדיקות למציאת מקדם ההתפשטות התרמי (λ) של בוצעו שלוש בדיקות נוספות למציאת מקדם הדיפוזיה התרמית (k) והמוליכות התרמית (λ) של שלוש התערובות השונות. תוצאות מבדיקות אלו מוצגת באיור 23 על גבי גרף שמציג פרופילים שלוש התערובות השונות. תוצאות מבדיקות אלו מוצגת באיור 23 על גבי גרף שמציג פרופילים הטמפרטורה לאורך הבלוק (I) עבור 9 נקודות זמן (t) שונות. לצורך החישוב, נלקחו הפרופילים המתאימים לעקומים התיאורטיים בגרף בהתאם לאיור 8. תוצאות הערכים של מקדם הדיפוזיה התרמי התרמי התרמי התרמים התרמים התרמים התיאורטיים בגרף בהתאם לאיור 8. תוצאות בטבלה 5.

Concrete mixture	Thermal diffusivity	Thermal conductivity
	[10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /sec]	[W/m/K]
B1	9.64	1.64
B2	8.39	1.53
B3	7.82	1.42

טבלה 5 – הערכים של מקדם הדיפוזיה התרמי והמוליכות התרמית של שלושת סוגי הבטון.

בשונה מערכי מקדם ההתפשטות התרמי ניתן לראות שאין הבדל גדול בין סוגי הבטון השונים בערכים של מקדמי הדיפוזיה התרמית והמוליכות התרמית של סוגי הבטון השונים. הערכים שהתקבלו בבדיקות השונות הינם בטווח הערכים של בטון כפי שמצוין במחקרים קודמים (Howlader, Rashid, Mallick, & Haque, 2012).



איור 23 : פרופילים של הטמפרטורה המנורמלת לטמפרטורת המטרה(ציר אנכי) בזמנים שונים במקומות שונים בבלוק (ציר אופקי) בבדיקה למציאת מקדם הדיפוזיה התרמית והמוליכות התרמית (ראה פרק שיטות 2.1.1). הקוים שחורים הינם קווים שווי זמן אוניברסלים ושאליהם הושוו הקווים מתוצאות הבדיקה. המוליכות התרמית נקבעה לפי הקווים המתאימים ביותר לקוים האוניברסלים (קוים שחורים).

#### 3.1.2 תכונות מכניות

על מנת לבצע החלטה בנוגע לתערובת הנבחרת לבניית המודל הפיזיקלי שהוכנס למעבדה, בנוסף לבדיקות התרמיות בוצעו בדיקות מעבדה בכדי למצוא את התכונות המכניות של כל תערובת. 24 בתחילה בוצעו שלוש בדיקות גזירה ישירה על ממשק בטון - בטון לפי סוגי התערובות (איורים 25, מהבדיקות השונות חושבו מקדמי החיכוך הבאים של הממשק בטון-בטון לכל סוג תערובת: 25, מהבדיקות השונות חושבו מקדמי החיכוך הבאים של הממשק בטון-בטון לכל סוג תערובת: קשיחות לגזירה (Kj) , מקדם החיכוך (μ) וזווית החיכוך (Φ) . ערכי הקשיחויות גזירה ומקדמי החיכוך שנמצאו מוצגות בטבלה 6. הקשיחות לגזירה (Kj) של החומר משתנה עם המאמץ הנורמלי הסועל עליו. לצורך מציאת הערך המתאים למאמץ הנורמלי שפועל על הממשק בטון – בטון במחקר שלנו (MPa 0.013), חושבה הקשיחות לגזירה בעזרת רגרסיה ליניארית של תוצאות הקשיחות לגזירה מול המאמץ הנורמלי.



איור 24: תוצאות בדיקת גזירה ישירה תחת מאמצים נורמליים שונים לחישוב הקשיחות לגזירה עבור דוגמאות משלוש התערובות.



איור 25: תוצאות בדיקת גזירה ישירה במרחב קולומב-מוהר לחישוב זווית החיכוך ומקדם החיכוך של תערובת B1 (משולש כחול),תערובת B2 (מעוין תכלת) ותערובת B3 (ריבוע כתום).

Concrete	Shear stiffness	Coefficient	Friction	D <sup>2</sup>	
mixture	[MPa/mm]	of friction [-]	angle [deg]	K-	
B1	0.03	0.54	28.37	0.99	
B2	7.48	0.81	38.84	0.99	
B3	3.01	0.45	24.36	0.95	

טבלה 6 – ערכי קשיחות הגזירה ומקדמי החיכוך לפי סוג התערובת.

תערובת B1 הינה בעלת ערך הקשיחות לגזירה הנמוך ביותר בעוד שתערובת B2 הינה בעלת ערך זווית החיכוך הגבוהה ביותר. כבר פה נראה שתערובת B3 הינה המתאימה ביותר, תערובת זו הינה בעלת ערך ממוצע של הקשיחות לגזירה ובעלת הערך הנמוך ביותר של זווית החיכוך אך ערך זה הינו בטווח ערכים המתאימים לבטון.

בנוסף לבדיקות התרמיות בוצעו בדיקות מכניות על שלוש התערובות השונות. בבדיקות אלו, בנוסף לבדיקות של מקדמי החיכוך בוצעו בדיקות למציאת מקדמי החוזק והאלסטיות של החומר: חוזק הלחיצה החד צירי (σ<sub>c</sub>), מודול האלסטיות (E) ויחס פואסון (v). בדיקה זו בוצעה באמצעות מכבש לחיצה טריאקסיאלי (פירוט ניתן למצוא בפרק השיטות 2.1.2) על כל אחת מהתערובות השונות (איור 26). מתוצאות אלו חושב חוזק הלחיצה החד צירי (σ<sub>c</sub>), מודול האלסטיות (E) ויחס פואסון (v) של מדגמי הבטון של שלוש התערובות והינם מוצגים בטבלה 7.

Concrete mixture	Uniaxial compressive strength [Mpa]	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]
B1	45.83	15.49	0.19
B2	53.55	21.64	0.25
B3	61.85	24.49	0.25

טבלה 7 – ערכי מקדמי החוזק לפי סוג התערובת.

מהבדיקה הטריאקסיאלית מתקבל שתערובת B3 הינה בעלת חוזק הלחיצה החד צירי (σ<sub>c</sub>) המרבי מבין שלוש התערובות. כמו כן, תערובת זה הינה בעלת מודול האלסטיות הגבוה ביותר, על כן ניתן לומר שתערובת B3 הינה התערבות החזקה והקשיחה ביותר.



איור 26: תוצאות מהבדיקה הטריאקסיאלית לפי סוג התערובת.

3.1.3 סיכום התוצאות של שלב בחירת התערובות

לצורך השוואה של הפרמטרים שנבחנו בשלוש התערובות רוכזו כלל התוצאות מהבדיקות השונות בטבלה 8. טווח ערכי חוזק הלחיצה החד צירי (σ<sub>c</sub>) שמתקבל עבור התערובות השונות משתנה בין 45.83 ועד 61.85 בין 14 ל - 83 בהתאמה. בעוד שטווח הערכים המתקבל עבור יחס

פואסון (v) לא משתנה עבור תערובות B2 ו - B3 בעוד שעבור תערובת B1 יחס פואסון הינו הקטן ביותר (ראה טבלה 8,חלק עליון). בעוד שתערובת B3 הינה החזקה ביותר, בתחום ההתנגדות בגזירה הינה התערובת הבינונית, תערובת B2 הינה החזקה ביותר בתחום זה (טבלה 8, חלק אמצעי). כאמור, לא רק מקדמים של חוזק, אלסטיות וגזירה משפיעות על הבחירה של התערובת אלא גם מקדמים תרמיים. אי לכך, נעשו בדיקות למציאת מקדמים אלו ומהתוצאות ניתן לראות שלתערובת B3 ישנו את מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי (α) הקטן ביותר (טבלה 8, חלק תחתון).

	Parameter	Symbol	Units	B1	B2	B3
Strength	Uniaxial compressive strength	σ <sub>c</sub>	[MPa]	45.83	53.55	61.85
Electicity	Elastic modulus	Е	[GPa]	15.49	21.64	24.49
	Poisson's ratio	v	[-]	0.19	0.25	0.25
Shoar	Shear stiffness	Kj	[MPa/mm]	0.03	7.48	3.01
resistance	Coefficient of friction	μ	[-]	0.54	0.81	0.45
1631310106	Friction angle	Φ	[deg]	29.71	38.84	24.36
Thermal	Thermal expansion coefficient	α	$10^{-6}  {}^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$	6.98	4.67	3.16
parameters	Thermal diffusivity	k	[10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /sec]	9.64	8.39	7.82
	Thermal conductivity	λ	[W/m/K]	1.64	1.53	1.42

טבלה 8- סיכום תוצאות הבדיקות המכניות והתרמיות לפי סוגי התערובות.

לסיכום, ניתן לומר שתערובת B3 הינה בעלת הערכים הגבוהים ביותר בפרמטרי החוזק והאלסטיות (ראה טבלה 8, חלק עליון)) ועם זאת בפרמטרים התרמיים ובפרמטרי החיכוך הינה בעלת הערכים הנמוכים ביותר (ראה טבלה 8, חלק אמצעי ותחתון). מתוצאות חישוב המודל האנליטי של הערכים הנמוכים ביותר (ראה טבלה 8, חלק אמצעי ותחתון). מתוצאות חישוב המודל האנליטי של 10 מחזר (טבלה 9) ניתן עבור כל אחת מהתערובות השונות (טבלה 9) ניתן לראות שעבור תערובת B3 מתקבלת התזוזה הגבוהה ביותר של 0.27 מ"מ למחזור חימום-קירור. לראות שעבור תערובת זו והעובדה שתערובת B3 הינה התערובת של 20.0 מ"מ למחזור חימום-קירור. בהתאם לתוצאה זו והעובדה שתערובת B3 הינה התערובת בעלת הערכים הגבוהים ביותר הימום-קירור. המום-קירור. בפרמטרי החוזק והאלסטיות, התערובת שנבחרה להרכיב את המודל הפיזיקלי שנבחן במעבדה הינה תערובת <u>B3</u>.

Concrete mixture	Displacement per cycle [mm]				
B1	0.11				
B2	0.13				
B3	0.27				

טבלה 9 – תוצאות חישוב המודל האנליטי לפי סוגי התערובות

#### 3.2 תוצאות הניסוי של המודל הפיזיקלי בחדר אקלים מבוקר

לאחר בחירת התערובת הרצויה, הוכן המודל הפיזיקלי אשר הוכנס לחדר אקלים מבוקר (CCR). מהלך הכנת המודל הפיזיקלי מתואר בהרחבה בפרק השיטות 2.2.1 . כפי שצוין, במהלך היציקה הושתלו 7 מדי טמפרטורה לאורך המודל (הרחבה על מדי הטמפרטורה בפרק השיטות 2.2.3). טווח הטמפרטורה שנבדק בניסוי הינו 30<sup>0</sup> מעלות. בתחילה נבדק משך זמן המחזור של הטמפרטורה הדרוש על מנת להגיע לטמפרטורה המטרה בצורה אחידה לאורך כל המודל הפיזיקלי וזאת על מנת שנוכל לנטרל את השפעת הפרמטר של עומק החדירה (Sd) (משוואה 3) של הטמפרטורה בבלוק בחישוב של המודל האנליטי. מהלך הניסוי הינו כך, החדר חומם לטמפרטורת המטרה החמה (35<sup>0</sup>) וכאשר הבלוק התחמם והתייצב על טמפרטורת המטרה החמה (35<sup>0</sup>) בצורה אחידה הוחלפה הטמפרטורה בחדר לטמפרטורת המטרה הקרה (5<sup>0</sup>), כאשר הבלוק התקרר בצורה שווה הוחלפה הטמפרטורה בחדר לטמפרטורת המטרה החמה (35<sup>0</sup>). מהלך זה חזר על עצמו מספר פעמים. ניתן לומר, שחימום החדר מייצג את עונת הקיץ בעוד שקירור החדר מייצג את עונת החורף, בהתאם לכך מחזור חימום-קירור מייצג שנה אחת. במהלך הניסוי הטמפרטורה בבלוקים השונים התייצבה סביב ערך אחיד וברגע שהתייצבה הוחלפה הטמפרטורה בחדר לטמפרטורת המטרה השנייה (איור 27), ניתן לראות שהחדר התחמם והתקרר בצורה מהירה בהרבה מהבלוקים, זאת בהתאם לציפיות שלנו שלבלוקים לוקח זמן ,לפי מקדם ההתפשטות, להתייצב על טמפרטורת החדר. ניתן לראות שיש הבדל בין טמפרטורת החדר לטמפרטורת הבלוק, הבדל זה נובע מכך שהתנורים שבעזרתם מחממים את החדר ממוקמים מעל המודל הפיזיקלי בעוד שהטמפרטורה של החדר נמדדת לפי האוגר נתונים (CR1000) אשר ממוקם ליד המודל הפיזיקלי בתחתית החדר.

כאמור, מהלך הניסוי הינו מחזורי חימום – קירור של החדר והגעת הבלוקים השונים לטמפרטורת החדר. בנוסף למדי הטמפרטורה שהושתלו במהלך היציקה, חוברו מדי תזוזה במספר מקומות במודל הפיזיקלי לאחר הכנסתו ל - CCR (ניתן לראות הרחבה בנושא מדי התזוזה בפרק השיטות 2.2.4). במהלך הניסוי נמדדו התזוזות על ידי שני סוגי חיישני תזוזה שונים. VW ( Vibrating) (2.2.4) (Wire) ופוטנציומטר (Potentiometer). בהתאם למיקום מדי התזוזה השונים (איור 17) ניתן לראות שחיישני VW והפוטנציומטר מספר 1 ממוקמים בקדמת המודל והינם מודדים את התזוזה של הבלוק המחליק (sliding surface) ביחס למשטח ההחלקה (sliding surface). כאמור בפרק השיטות 2.2.4, במהלך כל הניסוי צולם חלק ההתרחשות העיקרי (איור 18).בעזרת תמונות אלו חושבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה. הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה. הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה. הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה. הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה. הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו המרחקים המתאימים המקבילים למדידות של מדי התזוזה המזוזה הכינוי "מצלמה 1" הינו החשבו החישוב שנעשה מהתוצאות של עיבוד התמונה ושהמדידה שלו מקבילה לחיישן תזוזה 1. בהתייחס לאיור 19ב חושב המרחק מתוצאות עיבוד התמונה (פירוט ניתן לראות בפרק 2.2.4). מתוצאות המדידה של מדי התזוזה מספר 1 ניתן לראות את התזוזה המצטברת של הבלוק המחליק ביחס למשטח ההחלקה לאחר שלושה מחזורי חימום-קירור (איור 29) שהינם קורלטיביים למהלך של 3 שנים.



איור 27 : התפלגות הטמפרטורה לאורך המודל הפיזיקלי במהלך הניסוי. מיקום הטרמוקפלים לפי איור 17.



איור 28 : תוצאות המדידה ממדי התזוזה 1 ומצלמה 1– התקדמות הבלוק המחליק במורד משטח מיוצג בקו ורוד. ההחלקה, מצלמה מיוצג בקו כחול, פוטנציומטר מיוצג בקו שחור ו-WW מיוצג בקו ורוד.

ניתן לראות שישנה תגובה מהירה של החיישנים בכל שינוי של הטמפרטורה בחדר, תגובה זאת איננה מעידה על תזוזה של הבלוקים במודל אלא ככול הנראה ,כמו שנאמר בפרק השיטות (2.2.4), תגובה ישירה של מערכת המדידה לשינוי בטמפרטורה. חשוב להזכיר שבחישוב של התזוזה ע"י מדי התזוזה מסוג VW נעשה תיקון לתגובה של המכשיר עצמו בעוד שבמדי התזוזה מסוג פוטנציומטר לא נעשה תיקון טמפרטורה למדידה. תיקון זה עלול להוות סיבה לשוני במשרעת המתקבלת ממדי התזוזה השונים והשוני ב"רעש". עם זאת, התזוזה המצטברת בסופו של כל מחזור כמעט זהה בין שני מדי התזוזה השונים והמצלמה. שימוש בשלוש מדידות בלתי תלויות אחת בשניה וקבלת טווח ערכים זהה מצביע על נכונות המדידה של התזוזה המצטברת בסוף כל מחזור. בעקבות התגובה של המכשירים לטמפרטורה וטווח המדידה של המכשירים נתייחס במחקר זה לתזוזה המצטברת על פי מחזורים ולא בתוך המחזורים עצמם. התזוזה המצטברת לאחר 3 מחזורי חימום- קירור המתקבלת ממדי התזוזה 1 הינה של 0.055 - 0.07 מילימטר (VW ופוטנציומטר בהתאמה). בנוסף למדי התזוזה 1 שמדדו את התזוזה של הבלוק המחליק במורד משטח ההחלקה ,על מנת למדוד את הפתיחה והסגירה של הסדק שבתוכו מונחת היתד, חוברו מדי תזוזה נוספים, אחד מכל סוג (VW ופוטנציומטר) בין הבלוק המחליק (sliding block) לבלוק הרציף (Block Mass) (איור 17) המודדים את ההתנהגות של הסדק במהלך הניסוי. סדק זה הינו המקום שבו מונחת היתד (Wedge). בהתאם למודל אנו מצפים שכמות הפתיחה של הסדק תהיה קורלטיבית לכמות התזוזה המצטברת של הבלוק המחליק. כפי שצוין, בנוסף למדי התזוזה ישנה תזוזה שמתקבלת ממצלמה 3, פירוט של החישוב מתוצאות עיבוד התמונה ניתן לראות בפרק

40

2.2.4. מתוצאות מדי התזוזה והמצלמה ניתן לראות שפתיחת הסדק המצטברת לאחר 3 מחזורי חימום- קירור הינה של 0.055 - 0.07 מילימטר (VW ופוטנציומטר בהתאמה). תוצאות אלו מתאימות לתוצאות תזוזת הבלוק המחליק (sliding block) ממדי תזוזה ומצלמה מספר 1 וזאת בהתאם לציפיות(איור 30).



איור 29 : תוצאות המדידה של מדי תזוזה 3 ומצלמה 3 - התנהגות הסדק במהלך הניסוי , מצלמה מיוצגת בקו כחול, פוטנציומטר מיוצג בקו שחור ו-VW מיוצג בקו ורוד.



איור 30 : השוואת תוצאות המדידה בין מד תזוזה 1 (קו מקווקו) למד תזוזה 3 (קו רציף) לפי סוג החיישן. פוטנציומטר מיוצג בקווים שחורים בעוד VW מיוצג בקווים ורודים.

לאחר שמצאנו את התזוזה המצטברת בשלושה מחזורי חימום קירור של הבלוק המחליק, נמדדה בנוסף ירידת היתד ביחס למשטח ההחלקה על ידי מדי תזוזה מספר 2 (איור 31). כאמור קודם לכן בפרק השיטות 2.2.4, מד התזוזה מסוג VV חובר מצד אחד של היתד בעוד מד התזוזה מסוג VV חובר נצד אחד של היתד בעוד מד התזוזה מסוג WV חובר נצריומטר חובר בצדו השני של היתד. בנוסף, עקב אילוצי מקום במודל, מד התזוזה מסוג WV פוטנציומטר חובר בצדו השני של היתד. בנוסף, עקב אילוצי מקום במודל, מד התזוזה מסוג WV הובר כך שהוא מודד את מרחק היתד (Silding surface) בעוד משטח ההחלקה (Silding surface) בעוד משמד התזוזה מסוג פוטנציומטר חובר כך שהוא מודד את מרחק היתד (Wedge) ביחס לבלוק שמד התזוזה מסוג פוטנציומטר חובר כך שהוא מודד את מרחק היתד (Block Mass) בעוד מעד התזוזה מסוג פוטנציומטר חובר כך שהוא מודד את מרחק היתד (Block Mass) ביחס לבלוק הרציף (Silding surface). עם כל זאת היות והבלוק הרציף ומשטח ההחלקה מחוברים ומקובעים יחד, העדין להחשיב אותם כאחד ולכן ניתן להניח ששני החיישנים מודדים את אותו רכיב תזוזה. בגרף בייתן להחשיב אותם כאחד ולכן ניתן להניח ששני החיישנים מודדים את אותו רכיב תזוזה 2 ניתן להסביר בייתן להחשיב אותם כאחד ולכן ניתן להניח שני החיישנים מודדים את אותו רכיב תזוזה 2 ניתן להסביר באיור 31 ניתן לראות שמדי התזוזה מראים תזוזה דומה אך במגמות הפוכות, ממד התזוזה 2 על ידי התחשבות במיקום החיישנים במרחב. כנאמר קודם לכן, מיקום החיישנים הינו משני צדי על ידי התחשבות במיקום החיישנים במרחב. כנאמר קודם לכן, מיקום החיישנים הינו משני צדי געשה חישוב מתמטי פשוט שווצאותיו הם כך שתזוזת היתד מטה הינה מחצית הפרש המדידה היתד ולכן ההסבר הפשוט הוא שהיתד מבצעת רוטציה. בכדי למצוא את ירידת היתד ללא הרוטציה נעשה חישוב מתמטי פשוט שתוצאותיו הם כך שתזוזת היתד מטה הינה מחצית היתד מנה ביתום – קירור ניתה ללא מרוטציה היתד ולכן החישנים (איור 32), התזוזה האנכית המצטברת של היתד בשלושה מחזורי חימום – קירור בינה הינה מסצית מילימטר.



איור 31 : תוצאות המדידה מחיישנים מספר 2. WW מיוצג בקו ורוד ומראה עליה של היתד בעוד הפוטנציומטר מיוצג בקו שחור ומראה ירידה של היתד.



VW 2 איור 32 : תוצאות התזוזה האנכית של היתד לאחר החישוב מהפרש המדידה בין לפוטנציומטר 2.

3.3 תוצאות התזוזה מהניסוי של המודל הפיזיקלי ללא יתד

בנוסף לניסוי של המודל הפיזיקלי בשלמותו נעשה ניסוי של המודל הפיזיקלי ללא היתד. תרשים של המערכת ללא היתד ניתן לראות באיור 33. ניסוי זה נעשה על מנת שנוכל לוודא שבעקבות היתד קיימת תזוזה של הבלוק המחליק במודל. הניסוי נעשה באותם תנאים בדיוק כמו של הניסוי הקודם (איור 36), מאיור 34 ניתן לראות שהתנהגות הטמפרטורה, הן בחדר והן בבלוקים השונה לא השתנתה לעומת הניסוי עם היתד.



איור 33 : מערך המודל ללא היתד, מספרי החיישנים ומיקומם במודל.



איור 34 : התפלגות הטמפרטורה לאורך המודל הפיזיקלי ללא היתד במהלך הניסוי. מיקום הטרמוקפלים לפי איור 33.

כאמור, מיקום מדי התזוזה נשאר כמו במערך הניסוי הקודם ולכן תוצאות ממד התזוזה 1 (איור 35), שמודד את התזוזה של הבלוק המחליק (sliding block) ביחס למשטח ההחלקה (surface) (surface), מראות שהבלוק אומנם מתקדם במורד משטח ההחלקה אך כמות התזוזה הינה קטנה בהרבה מכמות התזוזה שנמדדה בניסוי עם היתד. מהתוצאות מתקבל שהתזוזה המצטברת של הבלוק המחליק (sliding block) ביחס למשטח ההחלקה (sliding surface) לאחר 3.5 מחזורי חימום-קירור הינה כ-0.027 מילימטר.

בנוסף למדי תזוזה 1, נמדדה התנהגות הסדק במהלך הניסוי על ידי פוטנציומטר 3 (איור 36). מד זה מודד את התזוזה של הבלוק המחליק (sliding block) ביחס לבלוק הרציף (Block Mass). כמות פתיחת הסדק המצטברת לאחר 3.5 מחזורי חימום קירור הינה כ-0.033 מילימטר. גם כאן, כמו במקרה עם היתד, ניתן לראות שישנה התאמה טובה בין כמות התזוזה המצטברת של הבלוק כמות במקרה עם היתד, ניתן לראות שישנה התאמה טובה בין כמות התזוזה המצטברת של הבלוק במורד משטח ההחלקה לבין כמות הפתיחה של הסדק. גם בניסוי ללא היתד הבלוק מחליק אך כמות התזוזה של הבלוק בניסוי זה קטנה בהרבה מכמות התזוזה של הבלוק בניסוי עם היתד. בטבלה 10 ניתן לראות השוואה בין תוצאות התזוזה של המודל עם היתד לעומת המודל ללא היתד למחזור חימום-קירור אחד, ניתן לראות שבמקרה של המודל עם היתד התזוזה תהיה גדולה פי 3 מאשר במקרה של המודל ללא היתד ( 2.714  $= \frac{0.019}{0.0077} = \frac{0.019}{0.0077}$ .

0.04 35 0.03 0.02 Displacment [mm] **Femperature** [C] www 0.01 www. 0 -0.01 10 -0.02 -0.03 L 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 1 2 3 5 6 10 Time [day] Potentiometer 1 — Troom

חדשה לנו. כמו שנאמר כבר בפרק המבוא, Gunzburger מראה שגם ללא יתד קיימת תזוזה של בלוק במדרון עקב שינויי טמפרטורה. (Gunzburger et al., 2005).





איור 36 : תוצאות המדידה מפוטנציומטר 3 – ניסוי ללא יתד.

	with wedge	without wedge
Displacement per cycle [mm/cycle]	0.018-0.02	0.0077-0.0094

טבלה 10 -השוואה בין תוצאות התזוזה מהניסויים השונים.

#### 4. דיון

במחקר זה נבחנה השפעת שינוי הטמפרטורה על מודל פיזיקלי של מערכת של בלוק בדיד המונח על משטח ומופרד ממסת ההר באמצעות סדק עם יתד בתוכו (איור 4). על מנת לבחון את תזוזת הבלוק במורד משטח ההחלקה כתגובה לשינויי הטמפרטורה הוכנס המודל הפיזיקלי לחדר אקלים מבוקר (CCR). המודל שהוכן לצורך המחקר נבנה מבטון. לצורך בחירת התערובת המתאימה לבניית המודל נמדדו הפרמטרים התרמיים והמכניים של שלוש תערובות שונות (טבלה 1). לבניית המודל נמדדו הפרמטרים התרמיים והמכניים של שלוש תערובות שונות (טבלה 1). הפרמטרים התרמיים והמכאניים הוזנו לתוך המודל האנליטי שהוצע על ידי Basten and Santamarina. לאחר בחינת תוצאות הבדיקות השונות (טבלאות 8-9) נבחרה התערובת B3 להרכיב את המודל הפיזיקלי.

#### 4.1 המודל הפיזיקלי בחדר אקלים מבוקר

על מנת למדוד את הטמפרטורה במהלך הניסוי בתוך הבלוקים הושתלו מדי טמפרטורה במהלך יציקת המודל. בנוסף למדי הטמפרטורה חוברו מדי תזוזה במספר מקומות לאורך המודל (איור (17) כמו כן נעשה שימוש במצלמה אשר צילמה את אזור ההתרחשות העיקרי (איור 18) לצורך קבלת תוצאות תזוזה נוספות ולצורך אימות התוצאות ממדי התזוזה. מהלך הניסוי שבוצע הוא מחזורי חימום-קירור בזמני מחזור מספיק ארוכים, כאלה שהבלוק כולו מגיע לטמפרטורת המטרה. בעזרת זמני המחזור הארוכים ניתן לנטרל את השפעת עומק החדירה (Sd) במשוואות של המודל האנליטי של Santamarina במוני מחזור מספיק ארוכים, כאלה שהבלוק כולו מגיע לטמפרטורת המטרה. האנליטי של Pasten and Santamarina בזמני מחזור אלו. מחזורי החימום-קירור מבוצעים באופן הבא: החדר חומם לטמפרטורה של 35<sup>0</sup> מעלות , לאחר שכל המודל התחמם בצורה שווה קורר החדר לטמפרטורה של <sup>5</sup>0 מעלות, לאחר שכל המודל התקרר בצורה שווה חומם החדר שוב ל<sup>3</sup>50 מעלות, אם כן טווח הטמפרטורה שנבדק הוא 30<sup>0</sup> מעלות. מהלך הניסוי הינו מספר מחזורי חימום-קירור כאלו. קיים הבדל בין טמפרטורת החדר לטמפרטורת הניסוי הינו מספר מחזורי חימום-קירור כאלו. קיים הבדל בין טמפרטורת החדר לטמפרטורת הבלוק (בשיא הטמפרטורה הבלוקים חמים יותר מהחדר), הבדל זה נובע מכך שהתנורים שבעזרתם מחממים את החדר ממוקמים מעל המודל הפיזיקלי בעוד שהטמפרטורה של החדר נמדדת לפי האוגר נתונים (CR1000) אשר ממוקם ליד המודל הפיזיקלי בתחתית החדר.

ככל הנראה השינוי בטמפרטורה משפיע על שינויים ברכיבים של מערכת המדידה, הן רכיבי החיבור של החיישנים לבטון והן ברכיבים פנימיים של החיישנים. בעוד שבמדי התזוזה מסוג WW מתבצע תיקון טמפרטורה לתופעה זו בעת החישוב של התזוזה בקוד המכשיר, במדי התזוזה מסוג פוטנציומטר לא מתבצע תיקון זה. בנוסף, טווח המדידה בתוך מחזורי הטמפרטורה הוא מתחת ליכולת הדיוק של השיטה. גם השיטה של צילום המודל ועיבוד התמונה "סובלת" מהשינויים בטמפרטורה שככל הנראה משפיעים על שינויים במרחק מהמצלמה לאובייקט מסיבות שונות

(השפעה על החצובה, העדשה, או התקרבות והתרחקות של המודל בכיוון הניצב לתמונה). סיבות אלו יכולות להוות הגורם להבדל בין התוצאות בשיטות המדידה השונות. יחד עם זאת, כמות התזוזה המצטברת בסוף כל מחזור כן מתכנסת לאותו טווח תזוזה בין שלוש שיטות המדידה הבלתי תלויות ועל כן ישנה אמינות בתוצאות. כמות התזוזה המצטברת של הבלוק המחליק במורד המדרון המתקבלת ממדי התזוזה השונים (פוטנציומטר 1 ו-WV 1) ומעיבוד התמונה (מצלמה 1) עבור שלושה מחזורי חימום-קירור היא של כ-0.55-0.07 מילימטר (איור 28). כמות החלקה זו שווה לכמות הפתיחה של הסדק המתקבל ממדי תזוזה 3 וממצלמה 3 (איורים 30,29). בעקבות אי-תלות של שיטות מדידת התזוזה של הבלוק אחד בשני וקבלת אותה כמות התזוזה ניתן לומר שהתוצאות אמינות.

בנוסף לניסוי של המודל עם היתד (פרק 3.2), בוצע ניסוי ללא יתד (פרק 3.2) על מנת לבחון את חשיבות היתד במערכת. מתוצאות אלו, ניתן לראות שללא היתד, הבלוק המחליק אמנם מתקדם במורד משטח ההחלקה אך כמות ההחלקה קטנה בהרבה מכמות ההחלקה במודל הפיזיקלי עם היתד (טבלה 10). כמות ההחלקה במודל עם היתד גדולה פי 3 מכמות ההחלקה ללא היתד, ניתן להסביר את ההחלקה למרות אי הימצאות היתד בכך שנבין את אפקט הטמפרטורה על בלוק המונח על משטח נטוי. בתחילה הבלוק במצב של שיווי משקל סטטי ולכן אין תזוזה, בעקבות שינויי המונח על משטח נטוי. בתחילה הבלוק במצב של שיווי משקל סטטי ולכן אין תזוזה, בעקבות שינויי הבלוק (שאר הפאות הם פאות חופשיות ולכן לא מתפתחים מאמצים). בשילוב עם נטיית המשטח, הבלוק (שאר הפאות הם פאות חופשיות ולכן לא מתפתחים מאמצים). בשילוב עם נטיית המשטח, הבלוק (שאר הפאות הם פאות חופשיות ולכן לא מתפתחים מאמצים). בשילוב עם נטיית המשטח, הבלוק נשאר המגברים על מקדם החיכוך ומאפשרים לבלוק לזוז בכיוון המדרון. כמובן שכמות והגרביטציה אשר מתגברים על מקדם החיכוך ומאפשרים לבלוק לזוז בכיוון המדרון. כמובן שכמות התזוזה קטנה משמעותית מהמודל הפיזיקלי עם היתד, זאת ניתן להסביר על ידי כך שהמודל הפיזיקלי עם היתד מביא בחשבון התפתחות מאמצים בפאה נוספת, הפאה שבאה במגע עם היתד, על כן התזוזה המתקבלת מהמודל עם היתד גדולה מהתזוזה המתקבלת מהמודל ללא היתד.

Yoshinaka & Yamabe, 1986) בעזרת השוואה בין הקשיחויות לגזירה תחת המאמצים הנורמליים הגבוהים המתקבלים ממכבש הגזירה לסלעים והקשיחויות לגזירה תחת המאמצים הנורמליים הנמוכים המתקבלים ממכשיר הגזירה לקרקעות (איור 38). הגרף באיור 38 הינו חצי-לוגריתמי. במאמצים נורמליים נמוכים אנו מקבלים קשיחות גזירה נמוכה יותר מאשר במאמצים לוגריתמי. במאמצים נורמליים נמוכים אנו מקבלים קשיחות גזירה נמוכה יותר מאשר במאמצים נורמליים גבוהים. הקשיחות לגזירה שקיבלנו מהבדיקה במאמצים נורמליים נמוכים לאחר הצבת נורמליים גבוהים. הקשיחות לגזירה שקיבלנו מהבדיקה במאמצים נורמליים נמוכים לאחר הצבת המאמץ הנורמלי שקיים אצלנו במשוואת הקו (טבלה 11) היא [*MPa/mm*] 0.055. בנוסף ניתן לראות שהקשר בין המאמצים הנורמליים לבין הקשיחות לגזירה של ממשק בטון – בטון אינו לראות שהקשר בין המאמצים הנורמליים לבין הקשיחות לגזירה של ממשק בטון – נחוקר ליניארי ואולי אפילו קשר Bi- Linear, נושא זה אינו נבדק במחקר זה ויש צורך להעמיק בו במחקר



איור 37: תוצאות הבדיקה במכשירי הגזירה השונים של ממשק בטון-בטון במאמצים גבוהים ( קו כחול- ציר אנכי שמאלי) ומאמצים נמוכים (קו כתום –ציר אנכי ימני) .



#### איור 38: השוואת תוצאות קשיחות לגזירה כפונקציה של המאמץ הנורמלי בממשק בטון-בטון במאמצים גבוהים ומאמצים נמוכים בגרף חצי לוגריתמי.

				ו עוכין ס	1111770	
σn [MPa]	0.007	0.014	0.022	0.057	0.072	0.287
Kj [Mpa/mm]	0.065	0.143	0.351	0.400	0.481	1.151
Trendline	ndline Kj = $4.2419 \sigma n$ R <sup>2</sup> = $0.81$				R <sup>2</sup> =0.81	

שיחויות לגזירה במאמצים נורמליים נמוכים.	טבלה 11 -ערכי ק <i>ו</i>
-----------------------------------------	--------------------------

שאר התכונות המכניות והתרמיות שמובאות בחשבון במשוואות של המודל האנליטי של Pasten מתוצאות הבדיקות של התכונות הרלוונטיות על תערובת B3 (טבלה and Santamarina 8). מהשוואה בין תוצאות המודלים, הפיזיקלי והאנליטי (טבלה 12) עבור מחזור חימום-קירור אחד, ניתן לראות שישנה התאמה בין תוצאות המודל האנליטי למודל הפיזיקלי.

טבלה 12 - השוואת התזוזה במחזור חימום-קירור אחד המתקבל מהמודל האנליטי לתוצאות שנמדדו במעבדה.

Type of model	Displacement per cycle [mm]
Analytical model	0.0635
Physical model	0.018-0.02

#### ההבדל הקטן בתוצאות בין המודל האנליטי למודל הפיזיקלי יכול להיגרם ממספר סיבות:

- המודל האנליטי של Pasten and Santamarina הינו מודל מופשט של בעיה תלת ממדית במודל חד-ממדי, דבר זה יכול לגרום לאי דיוק בתוצאות האנליטיות לעומת התוצאות מהמעבדה.
- ערכי התכונות האלסטיות והתרמיות הן אלו שקובעות את התוצאה של התזוזה מהמודל האנליטי, מהסתכלות על המשוואות ניתן לומר שהפרמטרים המשפיעים ביותר על המודל האנליטי הינם הקשיחות לגזירה –Kj ומקדם ההתפשטות התרמי – α. על מנת לבחון איזה מהפרמטרים הוא הדומיננטי ביותר, נחשב את התזוזה הצפויה מהמודל האנליטי כאשר אותו פרמטר משתנה בעוד שאר הפרמטרים במשוואות של המודל נשארים קבועים על הערך שנמדד מהבדיקות השונות (איור 39). ניתן לראות מהגרף באיור 39 שהשינוי בתזוזה הצפויה מהמודל האנליטי עם השתנות מקדם ההתפשטות התרמי הינה מהירה (שיפוע גבוה) בעוד שהשינוי בתזוזה הצפויה מהמודל האנליטי עם השתנות הקשיחות לגזירה הינה איטית (שיפוע נמוך). מאיור 39 ניתן לומר שמקדם ההתפשטות התרמי הינו הפרמטר הדומיננטי ביותר במשוואות של המודל האנליטי עם השתנות הקשיחות



איור 39 : התזוזה הצפויה מהמודל האנליטי עם השתנות מקדם ההתפשטות התרמי (קו אדום וצירים אדומים) והקשיחות לגזירה (קו שחור וצירים שחורים). כאשר אותו פרמטר משתנה ושאר הפרמטרים במשוואות המודל נשארים קבועים על הערך שנמדד מהבדיקות השונות.

עם זאת, שני פרמטרים אלו הינם הנעלמים הגדולים במקרה שלנו, ועל כן נבצעה השוואה בניהם במודל האנליטי ( איור 40).



איור 40 : התזוזה הצפויה מהמודל האנליטי כפונקציה של מקדם ההתפשטות התרמי (ציר אופקי) והקשיחות לגזירה (ציר אנכי).

קו מקווקו נקודות ( \*\*\*\*\* ) מציין את התזוזה שהתקבלה מהמודל הפיזיקלי.

ניתן לראות שלבחירת הפרמטרים ישנה השפעה גדולה על תוצאות המודל האנליטי, כאשר הפרמטר המשפיע ביותר הינו מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ). עם זאת, מהגרף באיור הפרמטר המשפיע ביותר הינו מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ). עם זאת, מהגרף באיור 40 ניתן לומר שבהנחה שערך הקשיחות לגזירה (Kj) שמדדנו הוא הערך הנכון ([KPa/mm] 55], ניתן לראות שערך מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ) שאנו אמורים לקבל עבור התזוזה ניתן לראות שערך מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ) שמדדנו הוא הערך הנכון (המוזה 40 ניתן לומר שבהנחה שערך המטרך הקשיחות לגזירה ( $\alpha$ ) שמדדנו הוא הערך הנכון (התזוזה 65 ניתן לומר שבהנחה שערך המסות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ) שאנו אמורים לקבל עבור התזוזה המתקבלת מהמודל הפיזיקלי הוא [ $^{-2}$ °C ( $^{-1}$ ] 1. בעוד שערך מקדם ההתפשטות התרמי הליניארי ( $\alpha$ ) שקיבלנו הוא ( $\alpha$ )

#### 5. סיכום ומסקנות

במחקר זה נבחנה השפעת שינוי הטמפרטורה על מודל פיזיקלי של מערכת של בלוק בדיד המונח על משטח ומופרד ממסת ההר באמצעות סדק עם יתד בתוכו (איור 4), על מנת לבחון את תזוזת הבלוק במורד משטח ההחלקה כתגובה לשינויי הטמפרטורה הוכנס המודל הפיזיקלי לחדר אקלים מבוקר (CCR). המודל שהוכן לצורך המחקר נבנה מבטון לאחר בחינת שלוש תערובות שונות ובחירת התערובות המתאימה ביותר. טווח הטמפרטורה שנבדק במחקר זה הינו של כ 30° [C°] (C<sup>2</sup> – <sup>3</sup>5), טווח טמפרטורה זה מייצג שינוי עונתי של הטמפרטורה בדרום הארץ ובמדבר יהודה (נספחים 1.6, 2.2). זמן המחזור של הטמפרטורה הינו ארוך מספיק בכדי לחמם/לקרר את הבלוקים עד לטמפרטורת המטרה. תוצאות התזוזה המתקבלת היא שהבלוק הבדיד מחליק כ-הבלוקים עד לטמפרטורת המטרה. תוצאות התזוזה המתקבלת היא שהבלוק הבדיד שווה לכמות הפתיחה של הסדק ועל כן ניתן לאשר את נכונות תוצאה זאת. תוצאה זאת מתקפת את המודל הפתיחה של הסדק ועל כן ניתן לאשר את נכונות שינויי טמפרטורה.

בנוסף לניסוי של המודל עם היתד, בוצע ניסוי של המודל אך הפעם ללא יתד, הניסוי בוצע באותם התנאים של הניסוי עם היתד. תוצאות הניסוי מראות שבעקבות שינויי הטמפרטורה בחדר קיימת תזוזה של הבלוק הבדיד גם ללא היתד (0.0077-0.0094 [מ"מ/מחזור]), אך תזוזה זאת הינה כשליש מהתזוזה המתקבלת מהניסוי עם היתד(0.018-0.02 [מ"מ/מחזור]). על סמך תוצאות אלו ניתן לומר שישנה חשיבות רבה לקיום היתד במערכת.

לאחר קבלת הנתונים מהמודל הפיזיקלי, נעשה חישוב של המודל האנליטי של Pasten and לאחר קבלת הנתונים מהמודל האנליטי של Asntamarina בהתאם למקרה שלנו. הפרמטרים התרמיים והמכאניים של הבטון נמדדו והוזנו Pasten and Santamarina. התזוזה המתקבלת מהמודל לתוך המודל האנליטי שהוצע על ידי Pasten and Santamarina. התזוזה המתקבלת מהמודל האנליטי עם ההתאמות הרלוונטיות למקרה שלנו היא טווח תזוזה של 0.0635 מ"מ/מחזור. עם זאת בדיקת הרגישות של הפרמטרים השונים ומידת השפעתם על המודל האנליטי, מראים שלבחירת הפרמטרים ישנה השפעה על תוצאות המודל האנליטי, כאשר הפרמטר המשפיע שלבחירת הפרמטרים ישנה השפעה גדולה על תוצאות המודל האנליטי, כאשר הפרמטר המשפיע ביותר הינו מקדם ההתפשטות הרמי לניצירי (מ). שילוב של ערכים של מקדם התפשטות תרמי לינארי וקשיחות הגזירה של משטח ההחלקה, מביאים להתאמה בתוצאות בין המודל האנליטי לינארי ולינארי וקשיחות הגזירה במאמצים שונים, יש צורך לבצע מחקר מעמיק בנושא.

52

## 6. נספחים

## 6.1 הטמפרטורה שנמדדה לאורך השנים 1949-2011 בסדום

<u>סדום</u>	גובה: 388- מטר ע				ערכי טמפרטורה רב שנתיים (מעלות צלזיוס)					אזור: ים המלח והערבה איזור: ים המלח איזור			
חודש	ינואר	פברואר	מרץ	אפריל	מאי	יוני	יולי	אוגוסט	ספטמבר	אוקטובר	נובמבר	тצמבר	
מקסימום יומי ממוצע	20.9	22.3	25.8	30.1	34.9	38.3	40.7	39.8	37.0	32.8	27.1	22.2	
מינימום יומי ממוצע	13.4	14.9	17.8	21.4	25.4	28.4	30.5	30.7	28.9	25.7	20.0	14.9	
ממוצע יומי	17.1	18.6	21.8	25.8	30.1	33.3	35.6	35.3	33.0	29.3	23.5	18.6	
תנודה יומית ממוצעת	7.5	7.4	8.0	8.7	9.5	9.9	10.2	9.1	8.1	7.1	7.1	7.3	
מקסימום חודשי ממוצע	24.9	27.2	31.9	37.7	41.5	43.0	44.5	43.0	41.5	37.6	31.9	26.3	
מינימום חודשי ממוצע	9.8	10.9	13.6	16.8	21.0	25.2	28.4	28.8	26.2	21.3	15.3	11.1	
מקסימום מוחלט	29.0	32.2	40.5	42.5	45.1	46.4	47.1	46.0	43.8	43.6	36.0	30.5	
תאריך מקסימום	18/1/1959	16/2/2010	30/3/1958	18/4/1993	31/5/1961	28/6/1995	5/7/1998	20/8/2010	6/9/1996	1/10/1943	2/11/1966	3/12/1977	
מינימום מוחלט	3.0	4.0	6.4	8.5	11.5	17.0	21.5	20.0	19.5	15.0	6.4	5.2	
תאריך מינימום	24/1/1957	3/2/1957 4/2/1957	1/3/1945	12/4/1956	7/5/1956	9/6/1961	1/7/1954	26/8/1961	28/9/1956	30/10/1956	26/11/1958	26/12/1972	

תקופת הבדיקה לערכים הקיצוניים המוחלטים 1948-1943; 2011-1954 \*ראו הרחבה בנספח



נספח 6.1 : טמפרטורה שנמדדה לאורך השנים 1949-2011 בסדום.

<u>סדום</u>	גובה: 388-	מטר	ערכי טמפרטורה רב שנתיים (מעלות צלזיוס)				אזור: ים המלח והערבה				NIGU MY BR	
חודש	ינואר	פברואר	מרץ	אפריל	מאי	יוני	יולי	אוגוסט	ספטמבר	אוקטובר	נובמבר	דצמבר
מקסימום יומי ממוצע	20.9	22.3	25.8	30.1	34.9	38.3	40.7	39.8	37.0	32.8	27.1	22.2
מינימום יומי ממוצע	13.4	14.9	17.8	21.4	25.4	28.4	30.5	30.7	28.9	25.7	20.0	14.9
ממוצע יומי	17.1	18.6	21.8	25.8	30.1	33.3	35.6	35.3	33.0	29.3	23.5	18.6
תנודה יומית ממוצעת	7.5	7.4	8.0	8.7	9.5	9.9	10.2	9.1	8.1	7.1	7.1	7.3
מקסימום חודשי ממוצע	24.9	27.2	31.9	37.7	41.5	43.0	44.5	43.0	41.5	37.6	31.9	26.3
מינימום חודשי ממוצע	9.8	10.9	13.6	16.8	21.0	25.2	28.4	28.8	26.2	21.3	15.3	11.1
מקסימום מוחלט	29.0	32.2	40.5	42.5	45.1	46.4	47.1	46.0	43.8	43.6	36.0	30.5
תאריך מקסימום	18/1/1959	16/2/2010	30/3/1958	18/4/1993	31/5/1961	28/6/1995	5/7/1998	20/8/2010	6/9/1996	1/10/1943	2/11/1966	3/12/1977
מינימום מוחלט	3.0	4.0	6.4	8.5	11.5	17.0	21.5	20.0	19.5	15.0	6.4	5.2
תאריך מינימום	24/1/1957	3/2/1957	1/3/1945	12/4/1956	7/5/1956	9/6/1961	1/7/1954	26/8/1961	28/9/1956	30/10/1956	26/11/1958	26/12/1972

תקופת הבדיקה לערכים הקיצוניים המוחלטים 1948-1948; 2011-1954

ראו הרחבה בנספח\*



נספח 6.2 : טמפרטורה שנמדדה לאורך השנים 1949-2011 באילת.

### VW דף כיול למד התזוזה מסוג

Encardio-rite Electronics Pvt. Ltd. A-7 Industrial Estate, Talkatora Road, Lucknow, UP-226011 India



Industrial Estate, Talkatora Road, Lucknow, UP-22601 E-mail: <u>ac@encardio.com</u>; Website: <u>www.encardio.com</u> Tel. +91 (522) 2661039/40/41/42 Fax +91 (522) 2662403

#### TEST CERTIFICATE

Customer	:	Geotope, Israel						
P.O.no.	:	Email dated June 27, 2014						
Instrument	:	V.W. Crack N	Aeter					
Serial number	:	094168			Date :	27.06.2014		
Range	:	15 mm			Temperature :	34°C		
Cable Length	:	2 meter						
Input	·	Observed v	alue	Average	End Point	Poly		
Displacement	Up1	Down	Up2		Fit	Fit		
(mm)	(Digit)	(Digit)	(Digit)	(Digit)	(mm)	(mm)		
	00447	2060.0	3860.0	3852 8	0.00	0.00		
0.00	3844.7	3000.9	4621 4	4634.0	3.00	2.99		
3.00	4636.7	4045.1	4031.4	4004.0 5404.7	6.03	6.01		
6.00	5431.2	5432.4	5410.3	0424.7	0.00	9.01		
9.00	6205.4	6212.3	6203.3	6204.4	9.02	11 00		
12.00	6984.2	6992.9	6981.8	6983.0	12.01	11.99		
15.00	7763.8	7763.8	7763.5	7763.6	15.00	15.00		
			· ~	Error (%FS)	0.19	0.09		
Digit		f ² /1000		-				
Linear gage factor (G)		3.8355E-03	mm/digit					
Thermal factor(K)		-0.003	mm/ deg C	;				
Polynomial constants			· ·					
Polynomial constants	A	= 5.7492E-09	B	= 3.7680E-03	C=	-1.4598E+01		
Displacement "D" is cale	culated wit	h the following	equation:					
Linear								
Polynomial : $D(mm) = A(R1)^2 + B(R1) + C \cdot K(T1-T0) - D0$								
R1 = current reading & R0 is initial reading in digit.								
	D0 = Initial reading in mm							

Zero reference (initial position) in the field must be established by recording the initial reading R0 (digit) along with temperature T0 (°C) just after installation.

Note : Zero displacement reading given in above calibration chart is taken at around 3 mm from mechanical zero, i.e. slider fully in .

Pin configration/wiring code:

signal

Red & black-Checked by

Green & white:

thermistor

Tested by

נספח 6.3 : דף כיול למד התזוזה מסוג VW, תיקון הטמפרטורה מודגש בריבוע כתום.

## 7. ספרות

- Bakun-Mazor, D., Hatzor, Y. H., Glaser, S. D., & Carlos Santamarina, J. (2013). Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 61, 196–211. http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.03.005
- Bandis, S. C. (1983). Fundamentals of Rock Joint Deformation, 20(6), 249–268.
- Collins, B. D., & Stock, G. M. (2016). exfoliation fractures, 9(March). http://doi.org/10.1038/NGEO2686
- Croll, J. G. A. (2015). The role of thermal ratcheting in pavement failures, (January). http://doi.org/10.1680/tran.2009.162.3.127
- Ganot, Y., Dragila, M. I., & Weisbrod, N. (2014). Impact of thermal convection on CO2 flux across the earth-atmosphere boundary in highpermeability soils. Agricultural and Forest Meteorology, 184, 12–24. http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.001
- Gischig, V. S., Moore, J. R., Evans, K. F., Amann, F., & Loew, S. (2011). Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116(4), 1–18. http://doi.org/10.1029/2011JF002006
- Goodman, R. (1989). An Introduction to Rock Mechanics.
- Greif, V., Simkova Lvana, & Vlcko, J. (2014). Physical Model of the Mechanism for Thermal Wedging Failure in Rocks. WORLD LANDSLIDE FORUM 3, 2, 45–50. http://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8
- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., & Guglielmi, Y. (2005). Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42(3), 331–349. http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.11.003
- H.S.Carslaw & J.C.Jaeger. (n.d.). Conduction of Heat in Solids (2d ed.). 1959.

- Hatzor, Y. H. (2003). Keyblock Stability in Seismically Active Rock Slopes—Snake Path Cliff, Masada. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(8), 697–710. http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(697)
- Howlader, M. K., Rashid, M. H., Mallick, D., & Haque, T. (2012). Effects of Aggregate Types on Thermal Properties of Concrete, 7(7), 900–907.
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, 36(7), 1897. http://doi.org/10.1029/2000WR900090
- Kamai, T., Weisbrod, N., & Dragila, M. I. (2009). Impact of ambient temperature on evaporation from surface-exposed fractures. Water Resources Research, 45(2), 1–11. http://doi.org/10.1029/2008WR007354
- Khan, M. (2002). Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. Building and Environment, 37(6), 607–614. http://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00061-0
- Matsuoka, N. (2008). Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994–2006) observations. Geomorphology, 99(1–4), 353–368. http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.11.013
- Nachshon, U., Weisbrod, N., & Dragila, M. I. (2008). Quantifying Air Convection through Surface-Exposed Fractures: A Laboratory Study. Vadose Zone Journal, 7(3), 948. http://doi.org/10.2136/vzj2007.0165
- Obert, L., Brady, B. T., & Schmechel, F. W. (1976). The effect of normal stiffness on the shear resistance of rock. Rock Mechanics Felsmechanik Mcanique Des Roches, 8(2), 57–72. http://doi.org/10.1007/BF01239760
- Pasten, C. (2013). geomaterials subjected to repetitive loading: implications on energy systems geomaterials subjected to repetitive loading, (May).
- Pasten, C., & Douglas, C. (2015). Physical and numerical modelling of the thermally induced wedging mechanism. http://doi.org/10.1680/geolett.15.00072

- Pasten, C., & Santamarina, J. C. (2014a). Experimental and numerical modeling of thermally-induced ratcheting displacement of geomembranes on slopes Experimental and numerical modeling of thermally-induced ratcheting displacement of geomembranes on slopes, (December). http://doi.org/10.1680/gein.14.00021
- Pasten, C., & Santamarina, J. C. (2014b). Thermally Induced Long-Term Displacement of Thermoactive Piles Thermally Induced Long-Term Displacement of Thermoactive Piles, (January). http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001092
- Suzuki, S., & Abe, K. (1985). Topological structural analysis of digital binary image by border following. Cvgip, 30, 32–46.
- Greif V, Sassa, K., & Fukuoka, H. (2006). Failure mechanism in an extremely slow rock slide at Bitchu-Matsuyama castle site (Japan), (May 2005), 22–38. http://doi.org/10.1007/s10346-005-0013-0
- Vlcko, J., & Greif, V. (2009). Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia heritage sites in Slovakia, (January 2017). http://doi.org/10.1007/s00254-008-1672-7
- Yagoda-Biran, G., Hatzor, Y. H., Amit, R., & Katz, O. (2010). Constraining regional paleo peak ground acceleration from back analysis of prehistoric landslides: Example from Sea of Galilee, Dead Sea transform.
  Tectonophysics, 490(1–2), 81–92.
  http://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.029
- Yoshinaka, R., & Yamabe, T. (1986). 3. Joint stiffness and the deformation behaviour of discontinuous rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 23(1), 19–28. http://doi.org/10.1016/0148-9062(86)91663-3

## Table of Contents:

1. Introduction	1
1.1 Analitycal Model of Pasten and Santamarina	5
1.2 Physical Model	9
1.3 Research Goals	11
1.4 Importance of Research	12
2. Research Methods	13
2.1 Concrete Mixture Selection for Physical Model	13
2.1.1 Thermal Properties	14
2.1.2 Mechanical Properties	16
2.2 Physical Model	19
2.2.1 Building Process of the Physical Model	19
2.2.2 Climate Control Room	22
2.2.3 Temperature Measurement	23
2.2.4 Displacement Measuring	24
2.2.5 Computer System and Data Collection	28
3. Results	30
3.1 Concrete Mixture Selection for Physical Model	30
3.1.1 Thermal Properties	30
3.1.2 Mechanical Properties	33
3.1.3 Results Summary of Concrete Mixtures Tests	36
3.2 Experimental Results of the Physical Model in Climate-Control Room.	38
3.3 Experimental Results of the Physical Model without Wedge	43
4. Discussion	46
4.1 Physical Model in Climate-Control Room	46
4.2 Analitycal Model of Pasten and Santamarina	47
5. Summary and Conclusion	52

6. Appendix	.53
6.1 Temperature Measured over the Years 1949-2011 in Sodom	.53
6.2 Temperature Measured over the Years 1949-2011 in Eilat	.54
6.3 VW crake meter test certificate	.55
7. References	56

# Experimental study of thermally induced wedging – ratcheting mechanism in rock slopes

## By Aviran Feldhiem

Department of Geological and Environmental Sciences Ben-Gurion University of the Negev, 2017

## Abstract

Various environmentally controlled mechanisms have been suggested to explain rock slope failures, including seismically driven vibrations, pore pressure buildup in rock joints, and freezing and thawing of water in joints. We investigate here a new model for thermally-induced block displacement in discontinuous rock slopes. The suggested mechanism consists of a discrete block, separated from the rock mass by a tension crack, and resting on an inclined plane. The tension crack is filled with a wedge block, or with rock fragments. According to the suggested mechanism, plastic displacement of the sliding block is driven by heating and cooling cycles. In the cooling cycle the rock block shrinks and the wedge is pushed further into the crack; in the heating stage, the block expands and due to the reaction from the wedge is driven to slide downwards along the inclined plane. Deep understanding of this new geomorphological failure mechanism will enable us to estimate the rate of erosion in rock slopes that are prone to this type of failure mode.

An analytical expression describing the amount of plastic displacement per single heating and cooling cycle has been proposed by Pasten and Santamarina in 2013. The applicability of the analytical model has been examined in the lab using very small scale tests of several centimeters length. In this study we test the applicability of the analytical model using a physical model constructed at the field scale with a block length of 1.5 meter. The physical model is situated in a Climate-Controlled Room (CCR) where the block temperature and displacement are continuously monitored during cycles of changing temperature.

In order to select the optimal concrete mixture for the model, the mechanical and thermo-physical properties of three concrete mixture were determined in a lab including shear stiffness of the sliding plane (*Kj*), friction coefficient of the sliding plane ( $\mu$ ), uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ), linear thermal expansion coefficient ( $\alpha$ ), thermal conductivity ( $\lambda$ ) and thermal diffusivity (k) of the block material. After all the concrete mixtures were tested, the most effective mixture for our experiment was found and the physical model was built from this mixture. During casting thermocouples were embedded inside the physical model. A series of digital displacement sensors (Vibrating Wire (VW) and Potentiometer) that were mounted on the physical model and a high resolution camera that was positioned near the physical model measured the obtained block displacements continuously. The temperature change that was examined was 30° [°C] (5° -35°), representing the seasonal change of temperature in Southern Israel and in the Judean Desert.

The results of the physical model show that the displacement of the sliding block is between 0.018 to 0.02 mm per one heating-cooling cycle, which is equal to the amount of opening observed in the tension crack. Another experiment without the wedge was performed under the same conditions to assess the relative significance of the wedge. The results show a sliding block displacement of 0.0077 mm / cycle when no wedge block in the tension crack is involved, a third of the total plastic displacement obtained with the wedge.

The validity of the analytical model suggested by Pasten and Santamarina was examined in light of our experimental results. The experimental results basically validate the analytical expression, but a very high sensitivity of the results to the linear thermal expansion coefficient ( $\alpha$ ) is observed. Other factors that affect the discrepancies between the analytical and physical models are the one dimensional assumption in the analytical model which is completely relaxed here, and the differences in the geometry of the intruding wedge.

Ш
## Ben Gurion University of the Negev

Faculty of Natural Sciences

Department of Geological and Environmental Sciences

# Experimental study of thermally induced wedging – ratcheting mechanism in rock slopes

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the M.Sc. Degree in the Faculty of Natural Sciences

### **By Aviran Feldhiem**

Under supervision of Prof. Yossef. H. Hatzor and Dr. Dagan Bakun-Mazor:

1/3/2017

### Ben Gurion University of the Negev

Faculty of Natural Sciences

Department of Geological and Environmental Sciences

# Experimental study of thermally induced wedging – ratcheting mechanism in rock slopes

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the M.Sc. Degree in the Faculty of Natural Sciences

### **By Aviran Feldhiem**

Under supervision of Prof. Yossef. H. Hatzor and Dr. Dagan Bakun-Mazor:

Author	avitan	, Date	·
Supervisor _		, Date	
Supervisor _		, Date	
Chairman of graduate studies			
committee _		, Date	

1/3/2017