

Ben-Gurion University of the Negev
The Faculty of Natural Sciences
The Department of Geological and Environmental Sciences

Modeling stone vaults response to strong ground motions: case study – Western Wall Tunnels

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

Yael Rosental

Under the Supervision of Prof. Yossef Hodara Hatzor

October 2013

Ben-Gurion University of the Negev
The Faculty of Natural Sciences
The Department of Geological and Environmental Sciences

Modeling stone vaults response to strong ground motions: case study – Western Wall Tunnels

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

Yael Rosental

Under the Supervision of Prof. Yossef Hodara Hatzor

Signature of student: _____

Date: _____

Signature of supervisor: _____

Date: _____

Signature of chairperson of the
committee for graduate studies: _____

Date: _____

October 2013

Abstract

The Temple mount in Jerusalem is Judaism's holiest place, Islam's third holiest place, and a meaningful place to Christianity as well. It is therefore a place of immense religious and political sensitivity. This study focuses on the stability of stone vaults which were discovered in the underground tunnels complex adjacent to the western wall, a retaining structure supporting the platform of the Temple mount. The western wall tunnels consist of an array of underground chambers and tunnels from different eras, passing alongside the western wall itself, under the homes of old Jerusalem's Muslim quarter. The tunnels contain structures from the second temple, the middle ages and the modern era.

A horizontal path connects these chambers and tunnels, and is considered one of Israel's most popular tourist sites. The project of uncovering the entire length of the western wall began after the Six days war under the jurisdiction of the ministry of religious affairs, and continues today under the western wall heritage foundation.

In the temple mount area in general, and in the great bridge chambers of the western wall tunnels specifically, there are many signs to structural damages caused by earth quakes.

In this specific site a local structural failure, and more so, a large scale collapse may cause, other than the harm to residents and visitors, a great political and security upheaval. Therefore, the structural integrity of the historical buildings in the area, which are mostly vaults, is of greater importance than elsewhere.

The purpose of this study is to enhance the knowledge and the understanding of the behavior of stone vaults under extreme loads and severe ground motions in order to improve the engineering and conservational stabilizing of old stone vaults, in order to minimize future earth quake damages, utilizing a two dimensional numerical discrete element model, Discontinuous Deformation Analysis (DDA).

We chose to use DDA in this study because in DDA the failure mechanism is a result of the deformation and does not need to be assumed a priori, as would be the case in the available analytical solutions for construction of stone vaults.

We focus here on three, two-dimensional arch models, representing three vaults of the great bridge. The vaults which were modeled with DDA show in the field multiple damage patterns which are assumed to have been caused by historic earthquake vibrations. The three vaults have different geometries (span and curvature radius) as well as different overburden loads. In the numerical simulations several parameters are changed, including the interface friction angle and the input acceleration time history in order to try and obtain, numerically, the observed failure pattern in the field.

The results of the simulations show a consistent and symmetrical behavior of the deformations and the stresses in the different vaults, with differences between vaults due to the different geometry. For friction angles smaller than 40° the results show that the smaller the friction angle – the greater the deformation, but the stresses remain unchanged, except for the horizontal stresses in the flat vaults. Increasing the loads causes an increase in both deformations and stresses. The flatter vaults apply a greater horizontal load on the supports, but they are sturdier than the half-circle vaults when very low friction angles are applied. Applying a severe earthquake has very little effect on the deformations and the stresses, and at the quake's end the vault settles with values resembling those caused by the same loads but without the quake, except for very small, less realistic, friction angles. The greatest change caused by the application of earthquakes happens during the quake itself, and only when ground acceleration is very high.

The results of this study and the condition of the vaults under the great bridge today, show that these vaults are massive and stable structures which are fairly resistant to earthquake loads. Having said that, it is still clear that the vaults under the great bridge, and the studied vaults in particular, have been damaged by past quakes.

It appears that the numerical models used here simulate the reality only partially, and therefore the results do not point to the physical damages seen today. The main cause of these inconsistencies are: The lack of depth in a two dimensional model, the lack of distributed loads inside a block when working with DDA, setting the supports at the base of the vault instead of at the bottom of the supporting walls, and the assumption that the vault is loaded with a uniformly distributed load.

Since the numerical models show little earthquake induced damage, then from a structural engineering perspective it would be beneficial to try to achieve similar thresholds in the vaults as those in the models. Such changes can be achieved by stabilization and conservation techniques such as: strengthening the vertical walls which support the vaults and building external support systems to prevent wall deformations, filling the voids above the vault's stones which cause an imbalance of the loads, filling the joints between the masonry blocks with an adequate material, and by inserting anchors which can change the static scheme when needed. A continuous engineering and conservational treatment in old masonry structures can prevent physical deterioration, safety hazards, and sometimes even security issues as well as strengthening the structures' ability to withstand high loads and minimize future earth quake damages.

Table of Contents

1. Introduction.....	1
1.1 Research location.....	1
1.1.1. Geography and geomorphology.....	1
1.1.2. History and archeology.....	2
1.1.3. Seismic activity.....	5
1.1.4. Physical evidence to earth quakes in archeological sites.....	8
1.2. Case study.....	15
1.2.1. Vault 5.....	16
1.2.2. Vault 6.....	17
1.2.3. Vault 21.....	18
1.3. Study object and targets.....	19
2. Scientific background.....	20
2.1. Masonry arches.....	20
2.1.1. Classic masonry arches.....	20
2.1.2. Voussoir beams.....	23
3. Research methods.....	25
3.1. Basic concepts of DDA	25
3.1.1. DDA formulation.....	25
3.1.2. Software DDA modeling.....	27
3.2. Field methods.....	28
3.2.1. Mapping.....	28
3.3. Modeling.....	29
3.3.1. AutoCad drawing.....	29
3.3.2. 2D-DDA modeling.....	30
4. Results.....	35
4.1. Vault 5.....	35
4.1.1. Effect of changing the friction angle in a low case load.....	35
4.1.2. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a low case load.....	37
4.1.3. Effect of changing the friction angle in a high case load.....	40
4.1.4. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a high case load.....	43
4.1.5. Conclusions.....	46

4.2. Vault 6.....	47
4.2.1. Effect of changing the friction angle in a low case load.....	47
4.2.2. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a low case load.....	50
4.2.3. Effect of changing the friction angle in a high case load.....	52
4.2.4. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a high case load.....	55
4.2.5. Conclusions.....	57
4.3. Vault 21.....	59
4.3.1. Effect of changing the friction angle in a low case load.....	59
4.3.2. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a low case load.....	62
4.3.3. Effect of changing the friction angle in a high case load.....	65
4.3.4. Effect of changing the friction angle and application of earth quakes in a high case load.....	67
4.3.5. Conclusions.....	69
5. Discussion.....	70
5.1. Discussing results.....	70
5.1.1. The effect of earth quakes on deformations and stresses.....	70
5.1.2. The effect of changes in friction angles on deformations and stresses.....	71
5.1.3. The effect of vault geometry on deformations and stresses.....	71
5.1.4. The relation between case results to actual damages.....	74
5.2. Discussing the engineering and conservational aspects.....	77
5.3. Further research.....	79
6. Summary and conclusions.....	82
References.....	83

אוניברסיטת בן - גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

תגובת קמרונות אבן עתיקים לתנודות קרקע חזקות: מקרה חקר – מנהרות הכותל

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

מאת: יעל רוזנטל
בהנחיית: פרופ' יוסף חודרה חצור

אוקטובר 2013

חשון תשע"ד

אוניברסיטת בן - גוריון בנגב
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה

תגובת קמרונות אבן עתיקים לתנודות קרקע חזקות: מקרה חקר – מנהרות הכותל

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

מאת: יעל רוזנטל

בהנחיית: פרופ' יוסף חודרה חצור

תאריך: _____ חתימת הסטודנט: _____

תאריך: _____ חתימת המנחה: _____

תאריך: _____ חתימת יו"ר הועדה המחלקתית: _____

אוקטובר 2013

הר הבית הוא המקום הקדוש ביותר ליהודים, השלישי בקדושתו לאסלאם הסוני ובעל חשיבות רבה גם לעולם הנוצרי. ועל כן הוא מקום בעל רגישות דתית ופוליטית בינלאומית גבוהה מאד.

מנהרות הכותל הן מערך חללים ומחילות תת-קרקעיות מתקופות שונות לאורך תוואי הכותל המערבי, מתחת לבתי הרובע המוסלמי בעיר העתיקה בירושלים. במתחם מבנים מתקופת בית שני, מימי הביניים ומהעת החדשה. ציר הליכה אופקי מחבר את החללים והמחילות, ונחשב לאחד מאתרי התיירות הפופולריים בישראל. פרויקט חשיפת הכותל המערבי לכל אורכו החל לאחר מלחמת ששת הימים ע"י משרד הדתות ונמשך עד היום ע"י הקרן למורשת הכותל המערבי.

באזור הר הבית ובפרט בקמרונות הגשר הגדול במתחם מנהרות הכותל, ישנן עדויות פיזיות רבות לנזקים מבניים שנגרמו ככל הנראה מפעילות של רעידות אדמה.

כשל מבני נקודתי וכמובן התמוטטות בקנה מידה גדול יותר עלולים לגרום, מלבד אפשרות הפגיעה באנשים הגרים מעל מתחם מנהרות הכותל ובמבקרים הרבים המצויים בתוכו, לכאוס פוליטי ובטחוני גדול מאד. בשל כך, לעמידות המבנים ההיסטוריים באזור זה, הבנויים בעיקר ממבני קמרונות, חשיבות גדולה יותר מכל מקום אחר.

מטרת עבודה זו היא להעמיק את הידע ואת ההבנה של התנהגות קמרון אבן תחת עומסים חיצוניים ותנודות קרקע חזקות לשם שיפור יכולות הייצוב ההנדסי והשימורי של קמרונות אבן עתיקים, ובמטרה למנוע ולמזער נזקים ברעידת אדמה עתידית, על ידי הדמיות נומריות של מבני קשתות בשני מימדים. שיטות נומריות משמשות ככלי עזר לפתרון במקרים בהם לא קיים פתרון אנליטי לבעיה, או שהוא מסובך במידה שאינה מאפשרת פתרון בכלים אלו. במקרים כאלו, בעזרת מידול הבעיה ושימוש בשיטה נומרית מסוימת, ניתן למצוא פתרון מקורב לבעיה, תוך ידיעה והבנה של מגבלות השיטה.

בעבודה זו בוצעו הדמיות ספרתיות בשיטת ה-DDA (Discontinuous Deformation Analysis) אשר יתרונותיה העיקריים הם בכך שסגנון הכשל הוא חלק מתוצאות האנליזה ואינו מוכתב מראש, וניתן לחשב בה בלוקים בעלי גיאומטריות מורכבות ושונות כאבני הבנייה של הקמרונות.

נבנו שלושה מודלים של קשתות דו מימדיות המדמים שלושה קמרונות ממערכת הגשר הגדול במנהרות הכותל. בקמרונות שנבחרו כמקרי החקר נצפו מפגעים פיזיים שונים המעידים שנפגעו בעבר מרעידות אדמה. שלושת הקמרונות מייצגים גיאומטריה שונה של קשתות (מפתח ורדיוס) ומכאן שגם נושאים עומסים שונים.

במהלך ההדמיות שבוצעו על כל קמרון שונו מספר פרמטרים עיקריים: זווית החיכוך בין הבלוקים, עומסים ופעילות רעידות אדמה.

תוצאות ההדמיות מצביעות על התנהגות סימטרית ובעלת חוקיות של התזוזות והמאמצים בקמרונות השונים, עם הבדלים בין הקמרונות עקב הגיאומטריה השונה. עבור זווית חיכוך קטנות מ- 40° נמצא שככל שזווית החיכוך קטנה יותר התזוזות גדולות יותר, אך המאמצים נותרים זהים, מלבד במקרה של המאמץ האופקי בקמרונות השטוחים יותר. הגדלת העומסים על הקמרון גורמת להגדלת התזוזות והמאמצים. הקמרונות השטוחים יותר מעבירים כח אופקי גדול לסמכים, אך עמידים בזווית חיכוך קטנות מאד יחסית לקמרון חצי מעגלי.

הפעלת רעידות האדמה כמעט ולא משפיעה על התנהגות התזוזות והמאמצים בקשת, ובסוף פעילות הרעידה הקשת מתייצבת על ערכים קרובים מאד למצב התזוזות והמאמצים ללא רעידת אדמה, מלבד בזווית חיכוך נמוכות מאד ופחות מציאותיות בשטח. השינוי הגדול שנוצר כתוצאה מפעילות רעידת האדמה הוא תוך כדי פעילות הרעידה ורק עקב תאוצות קרקע מאד גדולות.

מתוצאות המחקר וממצב קמרונות הגשר הגדול כיום ניתן להתרשם כי בהחלט מדובר במבנה יציב ומאסיבי בעל יכולת עמידה גבוהה לרעידות אדמה. יחד עם זאת ברור כי קמרונות הגשר במנהרות הכותל ובפרט הקמרונות שנחקרו במחקר זה נפגעו בעבר ברעידת אדמה.

נראה כי המודלים שנבנו מדמים חלקית את המציאות בשטח ולכן התוצאות אינן מצביעות על גורמים למפגעים הפיזיים הנצפים כיום. הגורמים העיקריים לחוסר ההתאמה של המודלים עם המציאות הם: העדר מימד העומק במודל דו מימדי, העדר פירוס מאמצים בבלוקים בשיטת DDA, קביעת הסמכים בעקבי הקמרון ולא בתחתית הקירות עליהם נסמכים הקמרונות, והנחה כי על הקמרון פועל עומס מפורס שווה.

אם בהדמיות שבוצעו לפעילות רעידת אדמה אין כמעט השפעה על יציבות המבנה, אזי מבחינה הנדסית - שימורית כדאי להביא את הקמרונות לתנאי הסף הקיימים במודלים. שינויים כאלו ניתן לבצע באמצעות עבודת ייצוב ושימור כגון: חיזוק הקירות האנכיים המשמשים כסמכים לקמרונות ובניית מערכות תמיכה חיצוניות למניעת דפורמציות בקירות, מילוי החללים הנוצרים מעל אבני הקמרון היוצרים חוסר בשיווי משקל של העומסים, מילוי חומר מליטה מתאים בכל שטח המגע בין אבני הבנייה והחדרת עוגנים לשינוי הסכמה הסטטית אם יש צורך בכך. טיפול הנדסי שימורי שוטף במבני אבן עתיקים מונע הידרדרות פיזית, סכנות בטיחותיות ולעיתים אף בטחוניות, מגדיל את חוזק המבנים ומסוגלותם לשאת עומסים גבוהים, וכמובן שימזער נזקים ברעידות אדמה עתידיות.

תודות

ברצוני להודות לכל האנשים שעזרו לי בהכנת עבודה זו ושתמכו בי לכל אורך הדרך :

לפרופ' יוסי חצור, על ההנחיה המעולה, התמיכה, הדחיפה, העידוד והאמונה לאורך כל התקופה.

לרבקה עיני על הדאגה וההכוונה בנבכי הבירוקרטיה.

לגוני יגודה בירן על העזרה המקצועית, ושיחות הקפה המרעננות והמרגיעות.

ליובל טל, על בניית הכלים שכל כך הקלו על העבודה.

להדר אלישיב, על ההרגעה האקדמית בכל עת.

לרשות העתיקות, על הושטת העזרה של כל מייצגיה בשטח.

לאלכסנדר און ז"ל מרשות העתיקות, על שעות של דיונים, הסברים ארכיאולוגים, ובעיקר על שהספקתי לשהות במחיצתו.

לשלומית וקסלר בדולח מרשות העתיקות, על ההסברים הארכיאולוגים המלומדים שתמיד ניתן בסבלנות רבה.

לחיים ברבה מרשות העתיקות, על העזרה הארכיאולוגית והכנסת האורחים הנפלאה.

לאבי סולומון מרשות העתיקות, על הימצאותו בשטח והנכונות לעזרה בכל עת.

לאריק דגני, מחברת "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ", על החומר המקצועי והשיחות המעניינות.

לקרן למורשת הכותל המערבי, על האפשרות להשתמש בכל הידע הקיים ברשותה, ועל היכולת להסתובב בכל המקומות הנפלאים, המעניינים והרגישים, המצויים באחריותה.

לעמיתיי וחבריי לעבודה במשרד "עופר כהן – שימור מבנים והנדסה" :

לעופר כהן, הבוס היקר. על שהפך אותי למהנדסת שימור, מלווה ומלמד אותי לאורך כל שנותיי המקצועיות, על שאיפשר את קיום הלימודים לצד העבודה, ובמיוחד על הגב הרחב שתמיד נמצא שם.

לאיל כהן, על החברות הנפלאה ושעות העזרה הרבות.

לדוד אלי, על הדחיפה קדימה.

לאחיותיי האהובות, על התמיכה האינסופית והחיבוק התמידי.

לאסנת, אחותי הגדולה, על האמונה, ההכוונה, ההעזה בהכנסת הראש לתוך העבודה למרות חוסר ההבנה בתחום, ועל הושטת העזרה התמידית בכל התחומים.

לאבא ואמא היקרים, על ההתעניינות המתמדת, הדאגה והאהבה הגדולה.

תוכן עניינים

1	מבוא	1
1	אזור המחקר	1.1.
1	גיאוגרפיה וגיאומורפולוגיה	1.1.1.
2	היסטוריה וארכיאולוגיה	1.1.2.
5	פעילות סייסמית	1.1.3.
8	עדויות פיזיות לרעידות אדמה באתרים ארכיאולוגיים	1.1.4.
15	מקרה החקר	1.2.
16	קמרון 5	1.2.1.
17	קמרון 6	1.2.2.
18	קמרון 21	1.2.3.
19	מטרת המחקר ויעדיו	1.3.
20	רקע מדעי	2.
20	קשתות אבן	2.1.
20	קשתות אבן קלאסיות	2.1.1.
23	קשתות אבן שטוחות - מודל ה- Voussoir	2.1.2.
25	שיטות המחקר	3.
25	שיטת ה-DDA	3.1.
25	משוואות ה-DDA	3.1.1.
27	הפעלת התכנה	3.1.2.
28	שיטות שדה	3.2.
28	מיפוי	3.2.1.
29	מידול	3.3.
29	שרטוט באמצעות AutoCad	3.3.1.
30	מידול באמצעות 2D-DDA	3.3.2.
35	תוצאות	4.
35	קמרון 5	4.1.
35	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך	4.1.1.
37	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך	4.1.2.
40	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה	4.1.3.
43	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה	4.1.4.
46	מסקנות	4.1.5.

47.....	קמרון 6	4.2.
47.....	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך	4.2.1.
50.....	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך	4.2.2.
52.....	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה	4.2.3.
55.....	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה	4.2.4.
57.....	מסקנות	4.2.5.
59.....	קמרון 21	4.3.
59.....	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך	4.3.1.
62.....	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך	4.3.2.
65.....	השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה	4.3.3.
67.....	השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה	4.3.4.
69.....	מסקנות	4.3.5.
70.....	דיון	5.
70.....	דיון בתוצאות	5.1.
70.....	השפעת רעידות האדמה על ערכי התזוזות והמאמצים	5.1.1.
71.....	השפעת שינוי זווית החיכוך על ערכי התזוזות והמאמצים	5.1.2.
71.....	השפעת גיאומטריית הקמרון על ערכי התזוזות והמאמצים	5.1.3.
74.....	הקשר בין התוצאות למפגעים הפיזיים הנראים בשטח	5.1.4.
77.....	דיון בהיבט הנדסי - שימורי	5.2.
79.....	המשך עבודה	5.3.
82.....	סיכום ומסקנות	6.
83.....	מקורות ספרותיים	

רשימת תרשימים

- תרשים 1.1 : מפת העיר העתיקה – התשתית הטופוגרפית : רכסים ונחלים 1
- תרשים 1.2 : חתך המראה את השפעת הטופוגרפיה על התפשטות העיר 2
- תרשים 1.3 : תצלום אוויר של אזור הר הבית 4
- תרשים 1.4 : שחזור הגשר הגדול בתקופת אליה קפיטולינה 5
- תרשים 1.5 : תפוצת רעידות אדמה ממגניטודה 4 ומעלה באזור תת הלוח סיני במאה השנים האחרונות 7
- תרשים 1.6 : תצלום אוויר של אזור הר הבית 8
- תרשים 1.7 : הקמרון המערבי ביותר במערכת הקמרונות של הגשר הגדול. סדקים באבני הבנייה ובניהן, אבנים מרוסקות ומעוכות, דפורמציות קשות. 9
- תרשים 1.8 : תוכנית של הקומה התחתונה של הגשר הגדול בחלק המזרחי (ללא קני"מ) 9
- תרשים 1.9 : סדקים בקמרון בחדר 22 10
- תרשים 1.10 : סדקים בקמרון ושבר באבן המשקוף בחדר 23 10
- תרשים 1.11 : שבר באבן המשקוף במעבר בין חדר 23 לחדר 34 10
- תרשים 1.12 : הסדיקה במשקוף ובמקווה בחדר 24 10
- תרשים 1.13 : סדיקה ותזוזה במקווה ברצפת חדר 24 10
- תרשים 1.14 : תמונת פנורמה של אזור רחבת הכותל, מעלה המוגרבים ומרכז דוידסון במבט ממערב.. 11
- תרשים 1.15 : דפורמציות קשות, מעיכה וסדקים בקשת אבן 11
- תרשים 1.16 : קיר נטוי 11
- תרשים 1.17 : דפורמציות קשות, מעיכה וסדקים בקשת אבן 11
- תרשים 1.18 : דפורמציה בקשת 12
- תרשים 1.19 : קירות נטויים 12
- תרשים 1.20 : סדקי פתיחה בקשת 12
- תרשים 1.21 : אורוות שלמה, מבט כללי 13
- תרשים 1.22 : אורוות שלמה, מבט לדרום 13
- תרשים 1.23 : חתך באורוות שלמה דרך הכותל המזרחי עם הלבשת הנטייה מהסריקה לפני רעידת האדמה 14
- תרשים 1.24 : מבט מכיוון דרום מזרח, לפני רעידת האדמה 14
- תרשים 1.25 : תוצאות ההשוואה בין המדידות 14
- תרשים 1.26 : סריקת לייזר תלת מיימדית של האזור הדרומי בכותל המזרחי 14
- תרשים 1.27 : חתך השוואתי 14
- תרשים 1.28 : תוכנית הגשר הגדול (ללא קני"מ) 15
- תרשים 1.29 : חתך סכמטי של הגשר הגדול (ללא קני"מ) 15
- תרשים 1.30 : קמרון 5, מבט כללי מצפון 16
- תרשים 1.31 : קמרון 5 מיד לאחר חשיפתו, מבט כללי מצפון מערב 16
- תרשים 1.32 : קמרון 5, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה 16
- תרשים 1.33 : קמרון 5, אבנים מרוסקות בעקב הקמרון 16
- תרשים 1.34 : קמרון 6, סדקים בקמרון הנובעים מ"פתיחה" בכיוון צפון-דרום 17
- תרשים 1.35 : קמרון 6, מבט כללי מדרום 17
- תרשים 1.36 : קמרון 6, סדקים באבני הבנייה בכיוון מזרח-מערב 17
- תרשים 1.37 : קמרון 21, מבט כללי מצפון מערב 18

18	תרשים 1.38 : קמרון 21, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה
18	תרשים 1.39 : קמרון 21, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה
18	תרשים 1.40 : קמרון 21, חוסר באבני בנייה ואבנים מרוסקות בעקב הקמרון
18	תרשים 1.41 : קמרון 21, דפורמציה של אבנים בודדות
20	תרשים 2.1 : האנלוגיה של הוק בין קשת לשרשרת תלויה
22	תרשים 2.2 : קו הלחיצה
23	תרשים 2.3 : קשת חצי מעגלית
	תרשים 2.4 : דיאגרמה של קורת Voussoir הכוללת נתונים גאומטריים, כוחות ומאמצים המתפתחים בקורה
24	תרשים 3.1 : דוגמא לחומרי גלם שהופקו ע"י חברת "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ" בחדר 21... 28
29	תרשים 3.2 : שרטוט אוטוקד של חתכים במרכז הקמרונות (במבט לצפון)
30	תרשים 3.3 : שרטוט אוטוקד של החתכים הבנויים מבלוקי אבן (ללא קנ"מ)
	תרשים 3.4 : תאוצות רעידות האדמה בכיוון מזרח-מערב ובכיוון האנכי. 1. נואיבה 1995 (רעידה חלשה). 2. רעידה סינטטית (רעידה חזקה)
33	תרשים 3.5 : שרטוט המודלים של שלושת הקמרונות
34	תרשים 4.1 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך
35	תרשים 4.2 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך
36	תרשים 4.3 : גרף המאמץ האופקי כנגד זווית החיכוך
36	תרשים 4.4 : גרף המאמץ האנכי כנגד זווית החיכוך
37	תרשים 4.5 : גרף מאמץ הגזירה כנגד זווית החיכוך
37	תרשים 4.6 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5
38	תרשים 4.7 : תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט
38	תרשים 4.8 : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2
39	תרשים 4.9 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2
40	תרשים 4.10 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך
41	תרשים 4.11 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך
42	תרשים 4.12 : : גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה
42	תרשים 4.13 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5
43	תרשים 4.14 : תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט
44	תרשים 4.15 : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2
45	תרשים 4.16 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2
45	תרשים 4.17 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך
47	תרשים 4.18 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך
48	תרשים 4.19 : גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך
49	תרשים 4.20 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7
50	תרשים 4.21 : תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט
51	תרשים 4.22 : : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2
51	תרשים 4.23 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 6

תרשים 4.24 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך.	53
תרשים 4.25 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך.	53
תרשים 4.26 : גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה.	54
תרשים 4.27 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7.	55
תרשים 4.28 : תזוזות הבלוקים בשינוי זווית חיכוך.	56
תרשים 4.29 : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2.	56
תרשים 4.30 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2.	57
תרשים 4.31 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך.	59
תרשים 4.32 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך.	60
תרשים 4.33 : גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה.	61
תרשים 4.34 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10.	62
תרשים 4.35 : תזוזות הבלוקים בזווית חיכוך הקטנה ביותר בה הוא עומד, ללא רעידת אדמה ועם רעידת אדמה חזקה.	63
תרשים 4.36 : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2.	64
תרשים 4.37 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2.	64
תרשים 4.38 : גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך.	65
תרשים 4.39 : גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית החיכוך.	66
תרשים 4.40 : גרף המאמץ האופקי כנגד זווית החיכוך.	66
תרשים 4.41 : גרף המאמץ האנכי כנגד זווית החיכוך.	66
תרשים 4.42 : גרף מאמץ הגזירה כנגד זווית החיכוך.	67
תרשים 4.43 : 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10.	68
תרשים 4.44 : גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2.	68
תרשים 4.45 : גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2.	69
תרשים 5.1 : גרף מאמצים אופקיים בבלוק המפתח (האמצעי) בזווית חיכוך של 40° בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידות האדמה.	70
תרשים 5.2 : גרף תזוזות אנכיות בבלוק המפתח (האמצעי) בזווית חיכוך של 40° בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידות האדמה.	70
תרשים 5.3 : גרף מאמצים אופקיים בבלוק המפתח (האמצעי) כנגד זווית החיכוך בשני מצבי העמיסה.	71
תרשים 5.4 : גרף תזוזות אנכיות בבלוק המפתח (האמצעי) כנגד זווית החיכוך בשני מצבי העמיסה.	71
תרשים 5.5 : זווית קו המפגש בין הבלוקים הקיצוניים בקמרונות השונים.	72
תרשים 5.6 : השוואה בין התזוזות והמאמצים המתפתחים בכל קמרון במצבי העמיסה השונים.	73
תרשים 5.7 : דפורמציות גדולות (עד 20 ס"מ) בקירות הנושאים את קמרון 5.	75
תרשים 5.8 : כח אופקי (טון) מקסימלי הפועל על הסמכים בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידת האדמה ובשתי זוויות חיכוך שונות: $\theta=10/12^{\circ}$, $\theta=30^{\circ}$.	76
תרשים 5.9 : סדיקה של אבני הבנייה בקמרון 5 כתוצאה מריכוזי מאמצים או מאמצי גזירה.	77
תרשים 5.10 : מודל של קמרונות 5 ו-6 כפי שנבנה ב- 2D-DDA.	79

תרשים 5.11 : דוגמא לתוצאות הדמיה ב- NMM של התייצבות תקרת סלע מיד לאחר הוצאת חלק ממסת הסלע ויצירת חלל.....80

תרשים 5.12 : דוגמא לנסיון ראשוני של הדמיה ב- NMM של קמרון 5.....80

רשימת טבלאות

טבלה מס' 1 : רשימת רעידות אדמה היסטוריות שגרמו לנזק או הורגשו בירושלים עפ"י Ben-) (Menahem, 19916

טבלה מס' 2 : הפרמטרים הפיזיקליים והנומריים שהוכנסו לתוכנה לשם ביצוע ההדמיות31

טבלה מס' 3 : העומסים החיצוניים הפועלים על בלוקי האבן במודלים של הקשתות32

1. מבוא

1.1. אזור המחקר

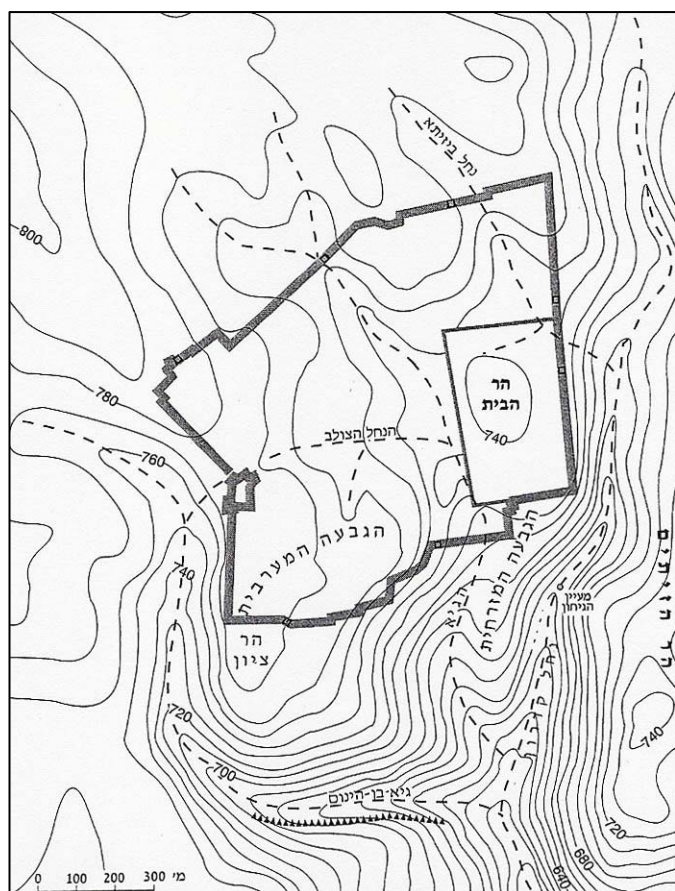
1.1.1. גיאוגרפיה וגיאומורפולוגיה

אזור המחקר נמצא באגן העיר העתיקה של ירושלים ושייך מבחינה גיאולוגית להרי יהודה. הסלעים הבונים את הרי יהודה שייכים לחבורת יהודה – רובם סלעי משקע ימיים: גיר, דולומיט וקירטון מגיל קרטיקון תחתון עד קרטיקון עליון ופליאוקן (בן-יוסף, 1980). ירושלים ממוקמת סמוך לגבול בין שתי חבורות סלעים – חבורת הר הצופים הקרטונית, בת גיל סנון ואאוקן ממזרח לעיר, ממדרונות הר הצופים והר הזיתים ומזרחה. וחבורת יהודה, הבנויה בעיקר גיר קשה ודולומיט מגיל קנומן וטורון, מקו זה ומערבה. כל אחת משתי חבורות אלה כוללת מספר תצורות, ולכל תצורה מאפיינים משלה, הניכרים בהופעתה בנוף ובשימושה על ידי האדם.

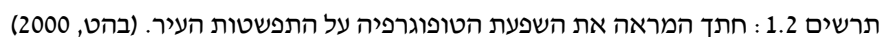
כפי שניתן לראות בתרשים 1.1, אגן העיר העתיקה בירושלים תחום בין שני נחלים המתנקזים מצפון לדרום: נחל קדרון במזרח, וגיא בן הינום במערב ובדרום. במרכז האגן עובר יובל נוסף של הקדרון, שכונה בלשון המקרא בשם 'הגיא' ובלשונו של יוסף בן מתתיהו 'טירופיון' (תרשים 1.2). שלושת הנחלים הללו תוחמים ביניהם שני רכסים, מזרחי ומערבי. הרכס המזרחי, תחום בין הקדרון לטירופאון בתחומיו מצויות הגבעה המזרחית, הכוללת את גבעת עיר דוד, את העופל והר הבית, וצפונה ממנה את

גבעת בית חסדא. ברכס המערבי תחומים הגבעה המערבית הכוללת את הרובע היהודי, הרובע הארמני והר ציון שמחוץ לחומות, וצפונה משם את השלוחה עליה ניצב הרובע הנוצרי, והוא תחום בין הטירופאון לבין גיא בן הינום. אל שלושת הנחלים הראשיים הללו מתנקזים יובלים נוספים שבעבר היוו תפקיד חשוב באספקת המים של ירושלים.

לעובדות יסוד גיאולוגיות, מורפולוגיות וגאוגרפיות אלה היתה חשיבות רבה בקביעת מיקומה והתפתחותה של ירושלים בראשיתה, בהיותן גורמי אב המשפיעים על מקורות המים, זמינותה של קרקע חקלאית, האפשרויות לביצור האתר וזמינותה של אבן לחציבה ולבנייה



תרשים 1.1: מפת העיר העתיקה – התשתית הטופוגרפית: רכסים ונחלים (רובין, 2000)



אורכו של הכותל המערבי, שהוא הארוך מבין הכתלים, הוא 488 מטרים. 81 המטרים הראשונים מצד דרום נחשפו מיד לאחר מלחמת ששת הימים ומשמשים כיום אתר ארכיאולוגי וסוללה לעליה להר הבית (מעלה המוגרבים). בהמשך 57 מטרים לצד צפון מצויה רחבת התפילה כפי שעוצבה בשנים שלאחר מלחמת ששת הימים.

גובהו המקורי של הכותל המערבי באזור רחבת התפילה הגיע ככל הנראה לכ- 30 מטרים מעל מפלס הרחוב של ימי הבית השני. כיום, חלקו התחתון, כשמונה מטרים, אינו חשוף וחתום על ידי משטח רחבת התפילה.

350 המטרים הנותרים של הכותל המערבי, נמשכים כלפי צפון במפלס העובר מתחת לרחובות ולבתי העיר העתיקה. במפלס הזה נחפרו מנהרות הכותל המערבי. במאה ה-19 החוקרים הבריטים צ'ארלס וילסון (1864) וצ'ארלס וורן (1867-1870) גילו את ההמשך הצפוני של רחבת התפילה בימיהם, אך לא הצליחו לחשוף את כל חלקיו הנסתרים של הכותל המערבי ולא עלה בידם לחבר את כל חלקיו לכדי רצף אחד.

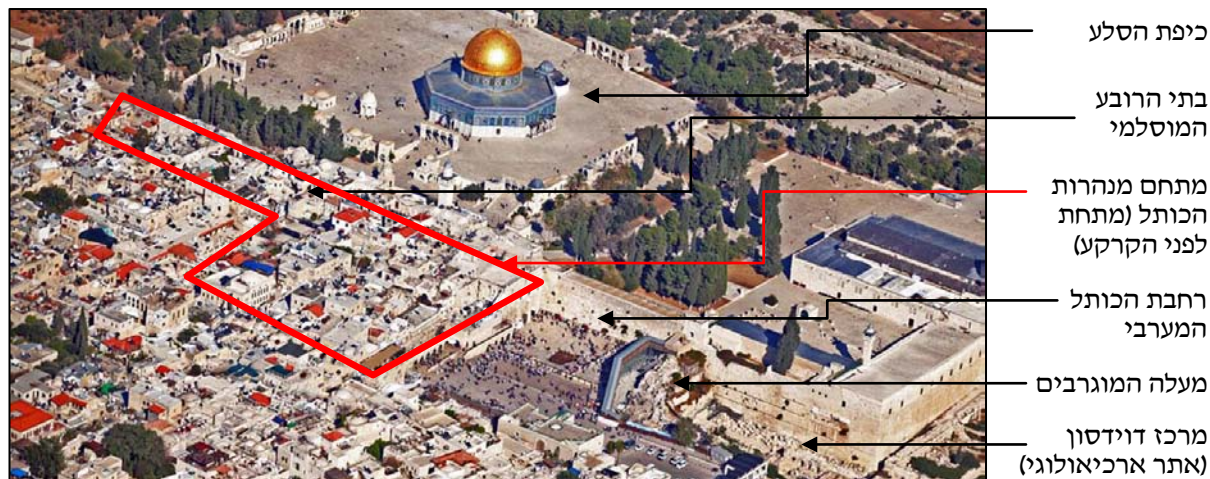
בשנת 1968 החלה מדינת ישראל באמצעות המשרד לענייני דתות לחשוף את מלוא אורכו של הכותל המערבי על מנת להגדיל ולהרחיב את רחבת התפילה שלו. המשמעות הארכיאולוגית של מעשה זה התבהרה מיד כאשר מרחיבי רחבת הכותל המערבי מצאו עצמם מגלים בחפירותיהם את המבואות, המעברים, החדרים, האולמות, בורות המים, היסודות והתשתיות של מבנים עתיקים שנחשפו עם פינוי גלי העפר.

ממצאים אלה הם עדויות על אשר ארע בירושלים ובסביבות הר הבית במשך אלפי שנים. יש לציין כי ההתרחשויות בכל תקופה היו על פני הקרקע החשופים ולא במעבה האדמה, אלא שהצטברות השכבות במהלך הדורות האחת על גבי חברתה והשינויים שהכניס דור אחד בשרידים שהותיר הדור שקדם לו, יצרו חללים ומפלסים תת קרקעיים, אשר חלקם בשימוש משני וחלקם ללא שימוש כלל.

חורבן בית שני סימן את יציאת העם לגלות בת 2,000 שנה.

לאורך השנים עברה ירושלים טלטלות רבות, והשלטון בה עבר מיד ליד בין עמים ואימפריות עולות ויורדות. כל שלטון ערך שינויים ושינה את פני הר הבית וסביבתו.

כחלק ממלחמות המוסלמים בצלבנים בשליטה על העיר ועל הר הבית החליטו המוסלמים בתקופה הממלוכית (1250-1517) ליצור רצף אופקי מהעיר העליונה להר הבית ולסכל כל אפשרות של חלוקת ירושלים. תנאי עיקרי לחיבור המתחמים היה העלמת העמק הטבעי והמרכזי של ירושלים שהשתרע ממערב להר הבית ועד לרחוב הגיא של ימינו. לשם כך נבנתה מערכת גבוהה ומסועפת של קמרונות לאורך הכותל המערבי ולאורך הגשר הגדול המאונך לו. על מערכת הקמרונות הקימו המוסלמים רחובות ובתים. מערכת המבנים ומבני התמך שנשאו אותם מלאו את כל שטח העמק המרכזי של ירושלים עד שהוא נעלם כאילו לא היה מעולם וכך נוצר רצף קרקעי בין הר הבית לחלק המערבי של העיר (בהט, מנהרות הכותל המערבי, 2003). שטח זה מכונה כיום "הרובע המוסלמי" ומתחתיו מצוי חלל מנהרות הכותל (תרשים 1.3) המורכב מיסודות המבנים הממלוכים וממבנים נוספים מתקופות קודמות וביניהם קמרונות הגשר הגדול, אשר מהווים את מקרה החקר.



תרשים 1.3: תצלום אוויר של אזור הר הבית. באדיבות הקרן למורשת הכותל המערבי

הגשר הגדול

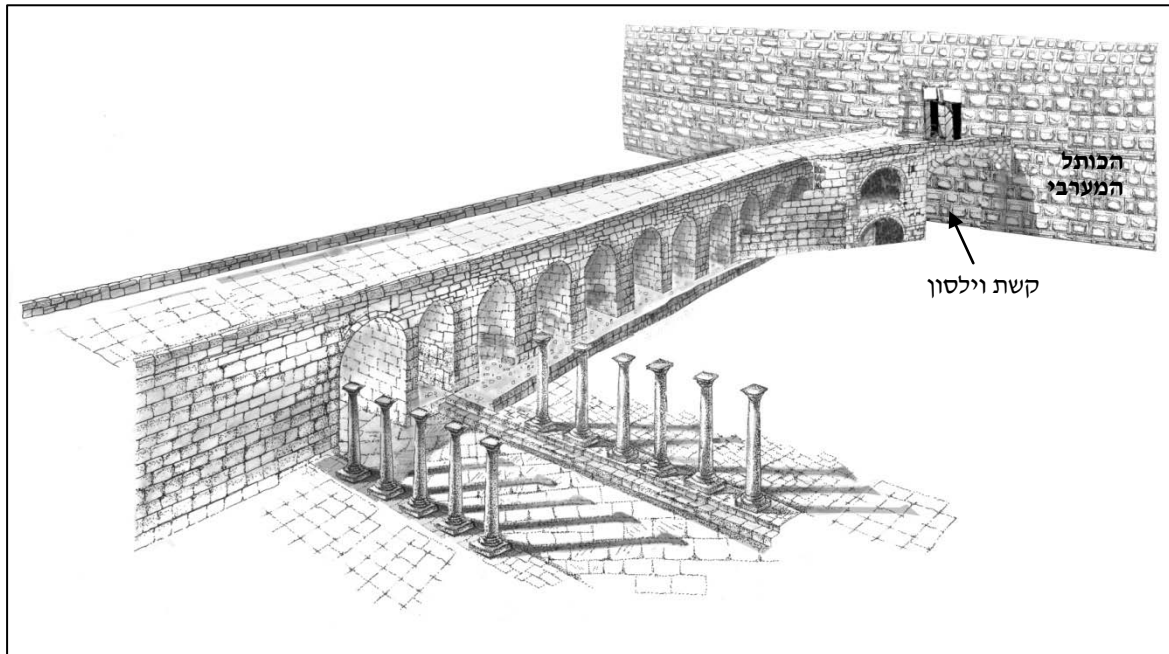
הדעות חלוקות בין הארכיאולוגים והחוקרים השונים לגבי תקופת הבנייה של קשת וילסון וקמרונות הגשר הגדול (בהט, 2003; סולומון, 2011; און & וקסלר-בדולח, 2010). בעבודה זו נסתמך על מסקנות החפירות האחרונות שבוצעו במנהרות הכותל על ידי אלכסנדר און ז"ל כפי שפורסמו באון ווקסלר-בדולח (2010).

קשת וילסון משולבת בכותל המערבי מעט מצפון לרחבת התפילה. ממערב לקשת וילסון נמשך גשר קשתות קדום לאורך כ- 85 מ' עד רחוב הגיא במערב. גשר זה, הידוע בשם 'הגשר הגדול', כולל כמה יחידות אדריכליות שנבנו בזו אחר זו בימי הבית השני (538 לפנה"ס – 70 לספירה) ובתקופה הרומית המאוחרת (326-70).

קשת וילסון נבנתה בימי הבית השני כחלק מגרם מדרגות שהעפיל להר הבית והיא נותרה באותה חרבה במלחמת החורבן בשנת 70 לספירה. בתקופה הרומית המאוחרת, שולבו קשת וילסון וכמה מקשתות גרם המדרגות שנותרו שלמות ממערב לה בגשר ארוך (הגשר הגדול) שנמשך מקשת וילסון מערבה (תרשים 1.4). ממערב לקשת וילסון הגשר הגדול מורכב משני טורי קשתות צמודים ומקבילים זה לזה שרוחבם הכולל כ- 11 מ'. נראה כי טור הקשתות הצפוני נבנה קודם ואח"כ נבנה בהתאמה צמוד אליו טור הקשתות הדרומי. בקצה המערבי של הגשר הגדול נבנתה קשת משותפת לשני טורי הקשתות והיא מקרה את רחוב הגיא, הבנוי כיום בתוואי רחוב הקרדו המזרחי הרומי מימי איליה קפיטולינה. על ראשו של הגשר הגדול נסלל באותה עת רחוב רחב שהוביל להר הבית. את הרחוב הזה מקובל לזהות עם הדקומנוס מימי איליה קפיטולינה.

טור הקשתות הדרומי של הגשר הגדול דומה במידה רבה לטור הקשתות הצפוני וניכר ששני הטורים נבנו בהתאמה. עם זאת יש הבדלים רבים ביניהם – בגובה הקשתות, ברוחבן, וכן במצב השתמרותן. כאשר הטור הצפוני נראה שחוק ופגוע יותר מן הדרומי.

נראה ששני טורי הקשתות נבנו בתקופה הרומית המאוחרת, אך לא בזמן אחד. לפי הצעת און ווקסלר-בדולח (2010), הטור הצפוני נבנה ראשון ואחריו בפער זמנים קטן נבנה הטור הדרומי. ההצעה נסמכת על ההבדל במצבם הפיזי של טורי הקשתות כפי שתואר לעיל (און & וקסלר-בדולח, 2010).



תרשים 1.4 : שחזור הגשר הגדול בתקופת אליה קפיטולינה (און & וקסלר-בדולח, 2010)

1.1.3. פעילות סייסמית

מדינת ישראל ממוקמת באזור סייסמי פעיל. פעילות זו מתבטאת ברעידות אדמה בינוניות המתרחשות בממוצע אחת לעשרות שנים וברעידות אדמה חזקות אחת למאות שנים. עוצמת הנזק במקום בו קיים או מתוכנן מבנה, תלויה בגורמים שונים: במרחק ממוקד הרעידה, במנגנון היווצרות רעידת האדמה, בעוצמתה, בכיוון אל המוקד, בסוג ועובי התשתית (קרקע ומסלע), בטופוגרפיה המקומית בקרבה לים, בסגנון המבנה ובאיכות בנייתו. מרבית רעידות האדמה באזורנו התרחשו לאורך גבולות תת הלוח סיני, ויש להניח שכך יקרה גם בעתיד. מבין שלושת הגבולות, טרנספורם ים-המלח הוא הגורם המשמעותי יותר משום קרבתו לריכוזי האוכלוסייה בישראל. עם זאת, לא ניתן להצביע בוודאות מספקת על איזה מההעתקים שמרכיבים את מערכת הטרנספורם תתרחש הרעידה הבאה (המכון הגיאולוגי הישראלי,

(www.gsi.gov.il)

ההיסטוריה הסיסמית המתועדת של טרנספורם ים-המלח משתרעת על פני טווח זמן נרחב, החל מנתונים גיאולוגים פרה-היסטוריים, דרך התחום הארכיאולוגי-היסטורי (כ-4000 שנה) וכלה בניתוח הסיסמולוגי במאה השנים האחרונות (תרשים 1.5).

במחקרים שנערכו על רעידות האדמה היסטוריות בישראל (Ben-Menahem, 1991; Amiran et al.,)

(1994), תועדו מקרים רבים בהם רעידות האדמה הורגשו או גרמו לנזקים בירושלים (טבלה 1).

אמנם ירושלים חוותה זעזועים ונזקים בעקבות רעידות אדמה, אך לא עברה אף פעם את דרגה 8 בסולם מרקלי. הסיבה לכך נעוצה במרחק של ירושלים מטרנספורם ים-המלח, כ-40 ק"מ, ולכן רעידת אדמה עם מגניטודה קטנה מ-7 ($M_L < 7$) אינה גורמת ליותר מזעזועים והתמוטטויות נקודתיות של מבנים, בתלות בסגנון המבנה, איכות הבנייה שלו והתשתית עליה הוא מבוסס.

טבלה מס' 1 : רשימת רעידות אדמה היסטוריות גרמו לנזק ו/או הורגשו בירושלים עפ"י (Ben-

(Menahem, 1991)

תאריך	מיקום מוקד הרעידה	מגניטודה	נזקים
759 לפנה"ס	33.2N,35.7E	7.3	נזק גדול ונפגעים רבים ביהודה, שומרון והגליל.. נזק גדול בסבסטיה וירושלים, כולל מקדש שלמה. נזק למקדש שלמה
64 לפנה"ס	36.2N,36.1E	7.5	אנטיוכיה נחרבה. הורגשה בקפריסין וישראל. נזק לקירות בבית המקדש (d=500km)
31 לפנה"ס	32N,35.5E	6.7	נזק גדול ביהודה. נהרגו הרבה אנשים. נזקים בבית המקדש השני, במצדה ובארמון החורף של הורדוס ביריחו
306 לספירה	מול חופי צור	7.1	הרס בצור וצידון, הורגשה בירושלים, צונמי בקסריה
362 לספירה	31.3N,35.6E	6.7	צונמי בים המלח. נזקים ברבת מואב. נזק לקונסטרוקציית המקדש שבנה יולינוס הקיסר על הר הבית
447 לספירה	40.2N,28E	7.5	הורגשה בירושלים ובמצריים
528 לספירה	36.2N,36.1E	7.1	הרס אנטיוכיה. נזקים בירושלים ובדמשק. הורגשה במצרים, טורקיה, ארמניה ומסופוטמיה
746 לספירה	32N,35.5E	7.3	נזקים בירושלים בכנסיית הקבר, באזור יריחו ובמזרח ירדן
859 לספירה	36.2N,36.1E	8	הרס מוחלט באנטיוכיה. נזק בירושלים. הורגשה במצרים, טורקיה, ארמניה, מסופוטמיה ומכה
1032 לספירה	מול חופי עזה	6.9	צונמי, נזק כבד בעזה. הורגשה בירושלים ובנגב
1068 לספירה	מול חופי יבנה	7	צונמי בחופים הדרומיים של ישראל. הורגשה בירושלים, רמלה, מצריים וסעודיה
1070 לספירה			נזק בקהיר וברמלה. הורגשה בירושלים
1114 לספירה	37.1N,36E	7	הרס באנטיוכיה. צונמי. הורגשה בירושלים
1115 לספירה	37N,38.9E הרי הטאורוס	7.5	קירות באדסה ביוון נהרסו. חזקה בסוריה ובירושלים
1170 לספירה	35.9N,36.4E	7.5	אלפי קורבנות. טריפולי חרבה. נזקים בדמשק, צידון ובעלבכ. נזק לקירות בצור ובירושלים
1546 לספירה	32N,35.5E	7	מאות נפגעים בשכם. נזק גדול בטבריה, חברון, כרכ, סלט וירושלים. גלי גאות ושפל בים המלח. זרם המים בירדן הופסר ליומיים.
1822 לספירה	36.7N,36.9E	7.2	אנטיוכיה נחרבת שוב. צונמי בחופי טורקיה. הורגשה בירושלים ובקפריסין
1834 לספירה	31.3N,35.6E	6.3	נזק בירושלים, בית לחם, שכם, עזה וכרכ.
1846 לספירה	35.8N,25.3E	7.7	הורגשה בקהיר ובירושלים
1863 לספירה	36.4N,27.7E	7.8	הורגשה בירושלים, קהיר, אלכסנדריה וסמירנה (טורקיה)
1926 לספירה	36.5N,27.3E	8	הורגשה בירושלים, מצרים, טורקיה, צפון אפריקה ומרכז איטליה
1927	32N,35.5E	6.3	נזק גדול ביהודה ושומרון. נהרגו 500 איש. הזרימה בירדן הופסקה ל- 22 שעות

בעדויות ההיסטוריות יש אי בהירות רבה. דיווחים שונים מגיעים ממקורות שונים והמידע אינו שלם וסובל מהגזמות. כיום מתבצע המעקב אחר רעידות אדמה בעזרת רשת של תחנות סיסמיות המופעלות על ידי האגף לסיסמולוגיה במכון הגיאופיסי לישראל. מרבית המידע על התרחשות רעידות אדמה בארץ ישראל, ובמיוחד החזקות שבהן, מתייחס לקטע שבין בקעת הלבנון לדרום ים המלח. רעידות אדמה במגניטודה גבוהה מ- 6 גרמו בארץ ישראל להרס רב ולנפגעים רבים. התפלגות קצב התרחשותן של רעידות האדמה לאורך קטע זה של השבר הסורי - אפריקאי מראה שרעידות אדמה במגניטודה 6 ומעלה מתרחשות (בקטע הנבדק) בממוצע פעם אחת בכ- 80 שנים. על בסיס מידע זה, ובידיעה שרעידת האדמה

האחרונה (מגניטודה 6.2) התרחשה ביולי 1927 (מוקד הרעש בצפון ים המלח) קיים סיכוי גבוה מאוד שבתוך 50 שנה תתרחש שוב רעידת אדמה חזקה במקום כלשהו בין דרום הלבנון לדרום ים המלח. עיקר פעילותם של מרכזים סיסמולוגיים בארץ ובעולם מתמקדת בבעיית ההערכה של הסיכון הסיסמי. בכל ההערכות יש מידה לא מבוטלת של אי ודאות. לפיכך, הערכות של סיכון סיסמי הן תמיד הערכות הסתברותיות. התקן הישראלי (ת"י 413) כמו תקנים אחרים בעולם, מאפשר סיכון של חשיפת הבניין לתנודת קרקע חזקה (ולא בהכרח רעידת אדמה חזקה), לגביה קיים סיכוי של 10%, שכמותה או גבוהה ממנה תתרחש לפחות פעם אחת בתקופה כלשהי של 50 שנים, זאת אומרת, יכולה להתרחש לפחות פעם אחת ב- 475 שנים (שפירא, 2008; המכון הגיאופיסי לישראל, 2014).



תרשים 1.5: תפוצת רעידות אדמה ממגניטודה 4 ומעלה באזור תת הלוך סיני במאה השנים האחרונות. הרעידות שדרגתן 6 ומעלה מסומנות בצבע אדום עם ציון החודש והשנה בה אירעו. (המכון הגיאולוגי הישראלי, www.gsi.gov.il)

התקן הישראלי, ת"י 413 – תכן עמידות מבנים ברעידת אדמה, אשר כל מהנדס בניין מתכנן חייב לפעול על פיו, מפרט את דרישות התכן על מנת שמבנים יעמדו ברעידת אדמה בלא סיכון של פגיעה ביציבות הרכיבים הנושאים בעת רעידת אדמה מתונה, וללא התמוטטות וסיכון חיי אדם בעת רעידת אדמה חזקה. (ת"י 413: תכן עמידות מבנים ברעידת אדמה, 2004) חשוב לציין כי התקן מתייחס למבנים מודרניים הבנויים בעיקר משלד בטון ופלדה, ואינו מתייחס למבנים ישנים ועתיקים הבנויים אבן עם תקרות שאינן שטוחות, כמו כל החללים המרכיבים את מנהרות הכותל. ירושלים ממוקמת כ- 40 ק"מ מטרנספורם ים המלח, ואזור מנהרות הכותל, הכולל גם את הגשר הגדול, בנוי על גבי המילוי שמילא את עמק הטרופיאון. המילוי של העמק מורכב משרידי מבנים קדומים, חלקם אף שלמים ויציבים, ומילוי ארכיאולוגי של עפר ואבנים. עפ"י חפירות ארכיאולוגיות וקידוחי בדיקה שבוצעו בשנים האחרונות באזור הגשר הגדול, גובה המילוי בין קמרונות הגשר לסלע האם משתנה בין 5 מ' ל- 12 מ'. סלע האם באזור זה הוא גיר קשה מתצורת נצר מגיל טורון - קרטיקון עליון (סנה & אבני, 2011). חומר המילוי הממלא את עמק הטרופיאון, אשר עליו בנוי הגשר הגדול ומתחתיו

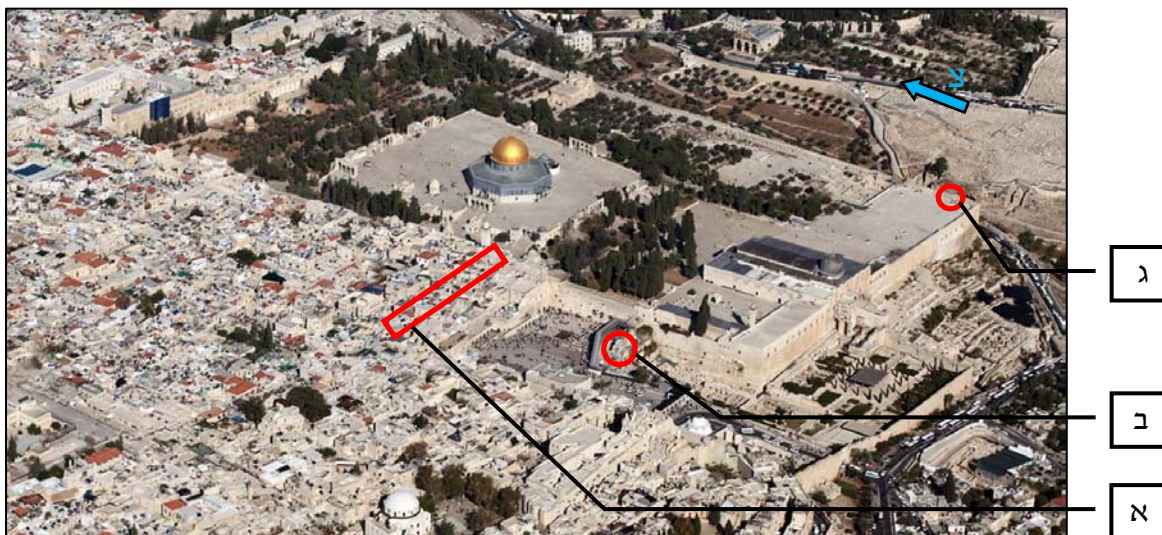
ישנו סלע גיר קשה, עלול לגרום לתופעת ההגברה. הגברה של תנודות קרקע בזמן רעידת אדמה נגרמת מהקטנת מהירות הגלים הסיסמיים תוך כדי עלייתם מהסלעים הקשים העמוקים אל הסלעים הרכים והקרקעות בקרבת פני השטח. כאשר שינוי המהירות של הגלים אינו הדרגתי ומתרחש מעבר חד בין המצע הסלעי הקשה לשכבת הקרקע הרכה, תופעת ההגברה מתחזקת במידה רבה כתוצאה מכליאת האנרגייה הסיסמית בשכבה העליונה. הגלים הסיסמיים שמוחזרים מפני השטח כלפי מטה מתאבכים עם הגלים המוחזרים מהמצע הסלעי הקשה כלפי מעלה ונוצרת תהודה עם תדירות ואמפליטודה אופייניים. במקרים חריגים אלו ישנו חשש שמקדמי ההגברה בת"י 413 אינם מספיקים. (גבירצמן & זסלבסקי, 2009) במקרה הנדון, המילוי הארכיאולוגי הוא השכבה העליונה הרכה, ועמק הטרופיאון מסלע הגיר הוא השכבה התחתונה הקשה.

1.1.4. עדויות פיזיות לרעידות אדמה באתרים ארכיאולוגיים

באתרים הארכיאולוגיים וההיסטוריים בעיר העתיקה בירושלים ובפרט באזור הר הבית (תרשים 1.6), נצפים נזקים מבניים רבים המעידים על כשלים עקב תזוזות אופקיות חוזרות ונישנות. כיום חישובים לעומסים אופקיים מתבצעים בעיקר להתמודדות עם לחץ אופקי בעומק הקרקע, עומסי רוח ותזוזות קרקע אופקיות הנובעות מפעילות רעידת אדמה.

לעומסי רוח אין יכולת השפעה כה גדולה על מבנים מסוג זה והמבנים במקור נבנו על פני הקרקע ולכן לא סביר שלחצי קרקע אופקיים גרמו לסוג זה של נזקים. בנוסף, סוג הנזקים מצביע על מחזוריות של תזוזות ולא על עומס אופקי קבוע. מכאן שהגורם העיקרי לכשלים אלו הוא פעילות של רעידות אדמה. יש לזכור כי סוג הכשל והשפעתו על המבנה תלויים גם באיכות הבנייה, בסגנון המבנה, בחומרי הבנייה, העומסים הפועלים על המבנה ואופן ביסוס המבנה.

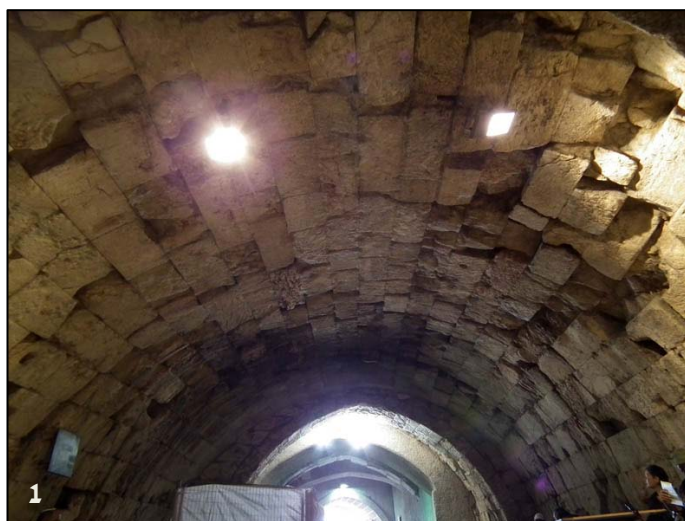
חשוב לזכור כי המבנים ההיסטוריים הנחשפים בחפירות הארכיאולוגיות, בתלות בתקופת בנייתם, עברו מספר רעידות אדמה, תיקונים מבניים ושינויים רבים במשטר העומסים שפעל עליהם במשך השנים. המקרים והתמונות של הכשלים המבניים המופיעים בהמשך מדגימים נזקים שנגרמו כתוצאה מפעילות של רעידות אדמה. יש לציין כי מסקנה זו אינה נסמכת על מחקר מדעי מעמיק, אלא על כישורי מהנדסים המתמחים בשימור מבנים, וארכיאולוגים בעלי ניסיון רב. יוצא דופן מבין המקרים הוא מקרה התזוזה בכותל המזרחי שנמדד לפני ואחרי רעידת האדמה בשנת 2004 וברור כי הנזק המבני הוא תוצאה ישירה של רעידת האדמה.



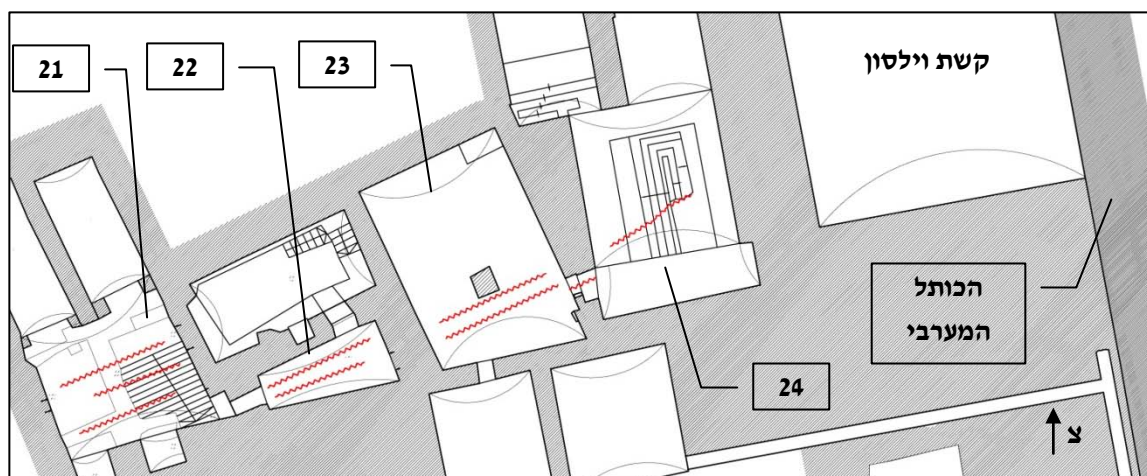
תרשים 1.6: תצלום אוויר של אזור הר הבית. באדיבות הקרן למורשת הכותל. א. מנהרות הכותל, הגשר הגדול. ב. מעלה המוגרבים. ג. הר הבית, הכותל המזרחי

א. מנהרות הכותל – הגשר הגדול

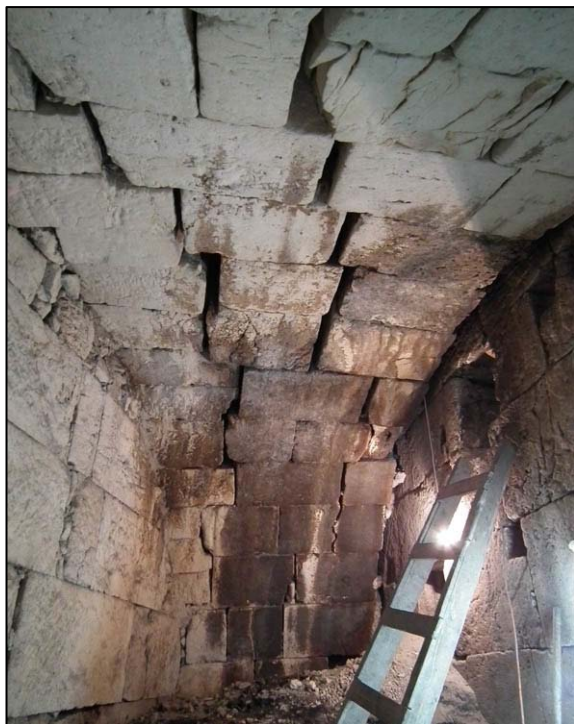
קמרונות הגשר הגדול החשופים כיום, נבנו בתקופה הרומית המאוחרת (326-70) (ראה פירוט בתת פרק 1.1.2). חשוב להזכיר שבחלק התחתון של הגשר, רק הקירוי המקומר נבנה בתקופה הרומית המאוחרת ואילו הקירות האנכיים נבנו בתקופות קדומות יותר. מכאן שכל רעידת אדמה בתקופה זו או לאחריה, שגרמה לנזקים באזור הר הבית, יכלה לגרום לנזקים הנראים בתרשימים 1.7-1.13. טור הקמרונות הדרומי של הגשר הגדול נבנה על מנת לחזק את טור הקשתות הצפוני לאחר שנפגע ברעידת אדמה, ומכיוון ששני טורי הקשתות נבנו בפער זמנים קטן (און & וקסלר-בדולח, 2010), יתכן כי טור הקמרונות הצפוני נפגע ברעידת האדמה שהתרחשה בשנת 362 לספירה והטור הדרומי נבנה מיד אחריה.



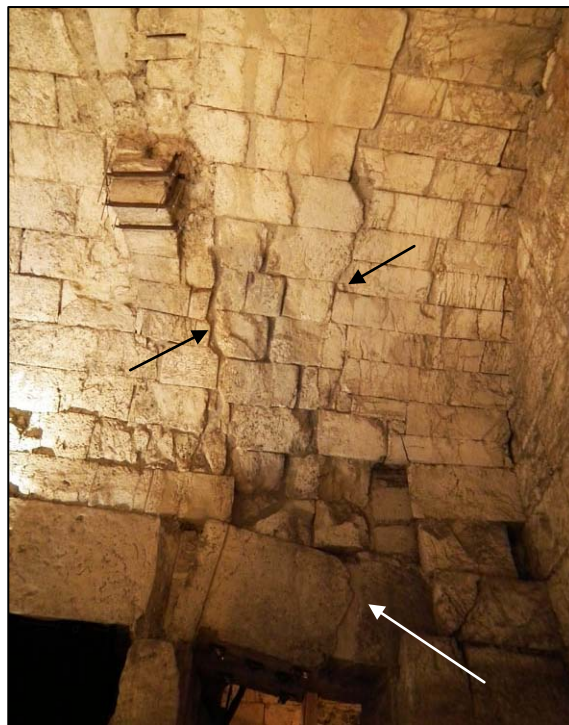
תרשים 1.7: הקמרון המערבי ביותר במערכת הקמרונות של הגשר הגדול. סדקים באבני הבנייה ובניהן, אבנים מרוסקות ומעוכות, דפורמציות קשות.
1. מבט כללי מצפון. 2. שברים, סדקים ודפורמציות בקמרון.



תרשים 1.8: תוכנית של הקומה התחתונה של הגשר הגדול בחלק המזרחי (ללא קני"מ). המספרים מסמנים את מספרי החדרים. באדום הסדקים המתוארים בתמונות הבאות.



תרשים 1.9 : סדקים בקמרון בחדר 22.
(תאריך צילום: 20.1.2010)



תרשים 1.10 : סדקים בקמרון ושבר באבן המשקוף
בחדר 23. (תאריך צילום: 23.12.2012)



תרשים 1.12 : הסדיקה במשקוף ובמקווה בחדר
24. (תאריך צילום: 23.12.2012)



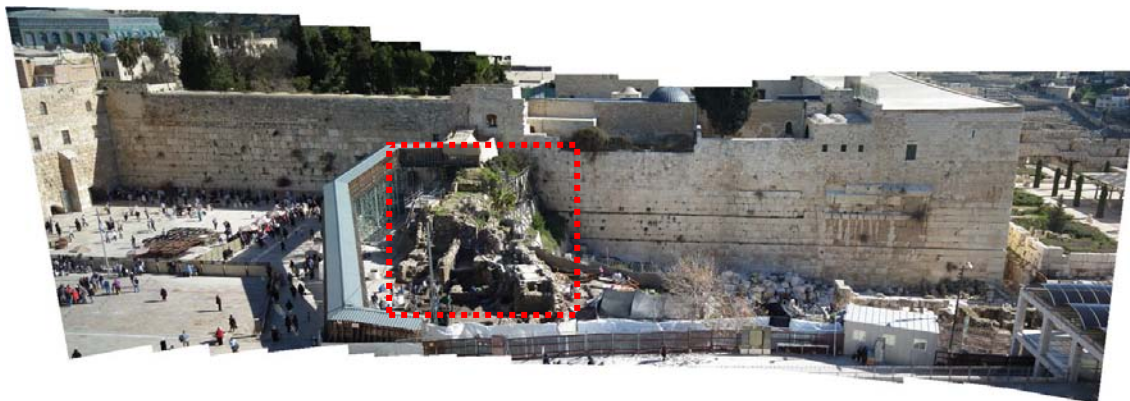
תרשים 1.11 : שבר באבן המשקוף במעבר בין חדר
23 לחדר 34. (תאריך צילום: 23.12.2012)



תרשים 1.13 : סדיקה ותזוזה במקווה ברצפת חדר
24. (תאריך צילום: 23.12.2012)

ב. מעלה המוגרבים

בחפירה הארכיאולוגית הנערכת בימים אלה במעלה המוגרבים (תרשים 1.14) נחשפו קירות אנכיים עם נטיות גדולות וקשתות אבן עם דפורמציות משמעותיות (תרשימים 1.15-1.20). החפירה הארכיאולוגית עוד לא הסתיימה, והמסקנות המובאות כאן לגבי תיארוך הממצאים, ראשוניות בלבד ומובאות מתוך שיחה עם מנהל החפירה במעלה המוגרבים מטעם רשות העתיקות, הארכיאולוג ד"ר חיים ברבה.



תרשים 1.14: תמונת פנורמה של אזור רחבת הכותל, מעלה המוגרבים ומרכז דוידסון במבט ממערב. מעלה המוגרבים תחום באדום. (תאריך צילום: 4.02.2013)



תרשים 1.15: דפורמציות קשות, מעיכה וסדקים בקשת אבן (תאריך צילום: 19.03.2013)



תרשים 1.16: קיר נטוי (תאריך צילום: 6.08.2013)



תרשים 1.17: דפורמציות קשות, מעיכה וסדקים בקשת אבן (תאריך צילום: 5.02.2013)

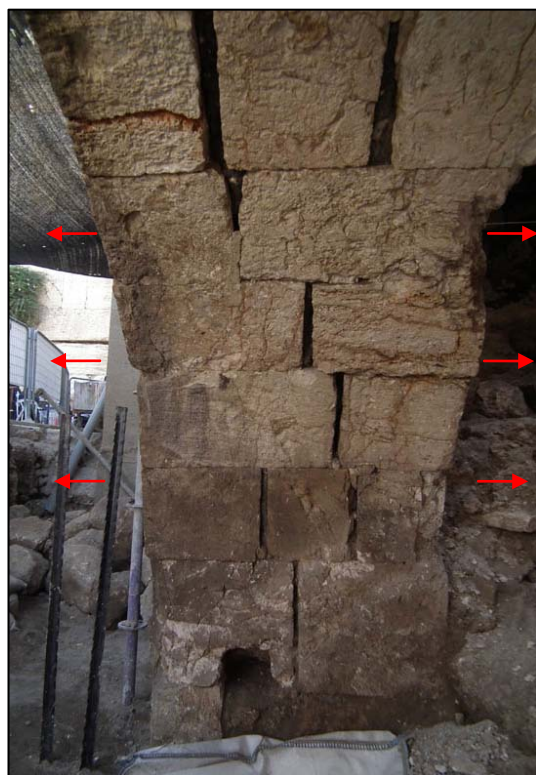
תחתית האומנה הנטויה והקשת (תרשימים 1.15-1.17) מתוארכות לתקופה שבין התקופה הרומית המאוחרת (326-135)/הביזנטית (638-326) לבין התקופה העבאסית (969-750). הקיר הניצב שנבנה לתמיכת הנטייה והחלק העליון של האומנה שאינו נטוי נבנו ככל הנראה בתקופה העבאסית (969-750) (ברבה, דברים בעל פה, 2013). מכאן שהאומנה והקשתות נפגעו באחת משתי הרעידות המתאימות לפער שנים זה ושגרמו לנזקים בירושלים - 528, 746 לספירה.



תרשים 1.18 : דפורמציה בקשת (תאריך צילום: 30.06.2013)



תרשים 1.19 : קירות נטויים (תאריך צילום: 27.08.2013)



תרשים 1.20 : סדקי פתיחה בקשת (תאריך צילום: 3.07.2013)

בתרשים 1.19, הקיר הנטוי ימינה מתוארך לתקופה הביזנטית (638-326) או אפילו קדום יותר, והקיר הנטוי שמאלה ובתוכו הקשת עם סדקי הפתיחה מתרשים 1.20 מתוארכים לפחות לסוף התקופה האיסלמית הקדומה (התקופה הפאטמית 1099-696) ואולי קצת לפני. הקשת בתרשים 1.18 מתוארכת לתקופה הצלבנית (1187-1099). ואילו הקיר שאינו נטוי ו"מודבק" לקיר הביזנטי בתרשים 1.19 הוא מהתקופה הממלוכית (1517-1250) ונראה שהוא נבנה בכדי לתמוך את הקירות הנטויים. בנוסף החדרים הצלבניים שהתמוטטו נמצאו מלאים בחומר מהתקופה הממלוכית (ברבה, דברים בעל פה, 2013). מכאן שמדובר ברעידות אדמה שהתרחשו בין סוף התקופה האיסלמית הקדומה לבין התקופה הממלוכית. ובסבירות גבוהה לרעידה בשנת 1170 (סוף התקופה הצלבנית).

ג. הר הבית – הכותל המזרחי

בשנת 2003, התבקשה רשות העתיקות לבדוק את מצבו ההנדסי של הקיר המזרחי באורות שלמה. קיר זה מהווה את חלקו הדרומי של הכותל המזרחי של הר הבית. בבדיקת מהנדס רשות העתיקות התגלה כי ישנה נטייה חריגה של הכותל מזרחה (תרשימים 1.23, 1.24) והוחלט כי בשלב הראשון יש לבצע סריקת לייזר תלת מיימדית של הפן החיצוני של הכותל המזרחי (תרשים 1.26). הסריקה בוצעה באוגוסט 2003.

אורות שלמה הנו חלל גדול מתחת לפני בימת הר הבית בפינה הדרום מזרחית. החלל מקורה בקמרונות חבית, שכיונם צפון דרום והם נשענים על שורה של אומנות וקשתות (ארקדות) (תרשימים 1.21-1.22). מידות האורות הן 62 מ' צפון דרום ו 83 מ' מערב מזרח. 13 הקמרונות נשענים על 12 ארקדות המורכבות מ- 88 אומנות. גובה הקמרונות הוא כ- 9.0 מ', מפתח הקמרונות נע בין 3.5-7.4 מ' ומידות האומנות כ- 1.2 מ'. צורת הקמרונות והקשתות היא קשת מעגלית. בעקבות רעש האדמה שהתרחש ב- 11 בפברואר 2004 התבקשה חברת "מבט" לערוך מדידה חוזרת של החלק הנטוי של הכותל המזרחי, לאחר שעלה חשד כי חלו תזוזות בכותל.

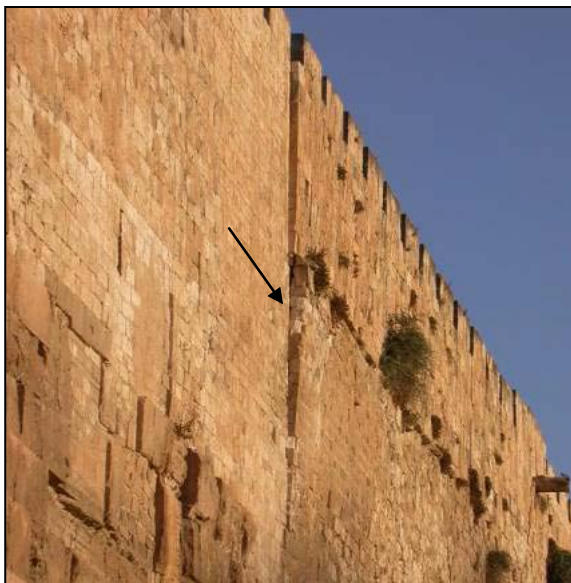
המדידה החוזרת בוצעה ב- 12 בפברואר 2004 ותוצאותיה הושושו עם המדידה שנערכה בחודש אוגוסט 2003. תוצאות ההשוואה בין שתי המדידות מלמדות על תזוזה של עד 25 מ"מ. (תרשימים 1.25, 1.27) עפ"י נתוני המכון הגיאופיזי, מוקד הרעידה ב- 11/02/2004 היה באגן ים המלח (35.5E, 31.7N) בעומק של 18 ק"מ ובמגניטודה 5.2.



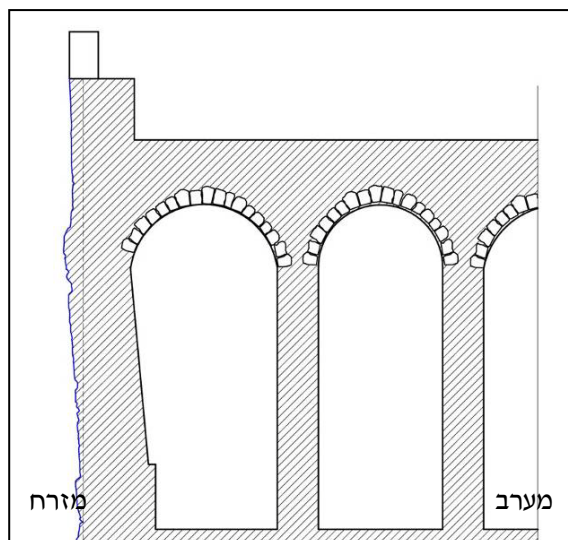
תרשים 1.21 : אורות שלמה, מבט כללי (צולם ע"י עופר כהן, 2003)



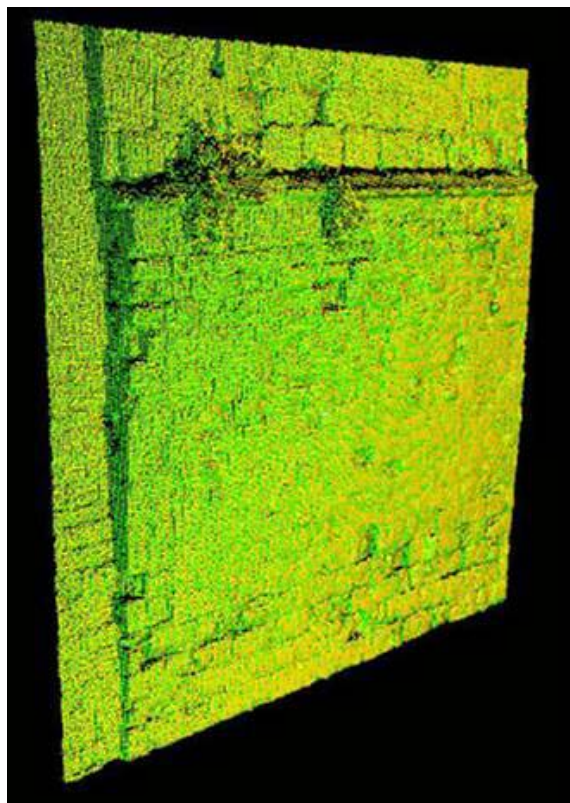
תרשים 1.22 : אורות שלמה, מבט לדרום (צולם ע"י עופר כהן, 2003)



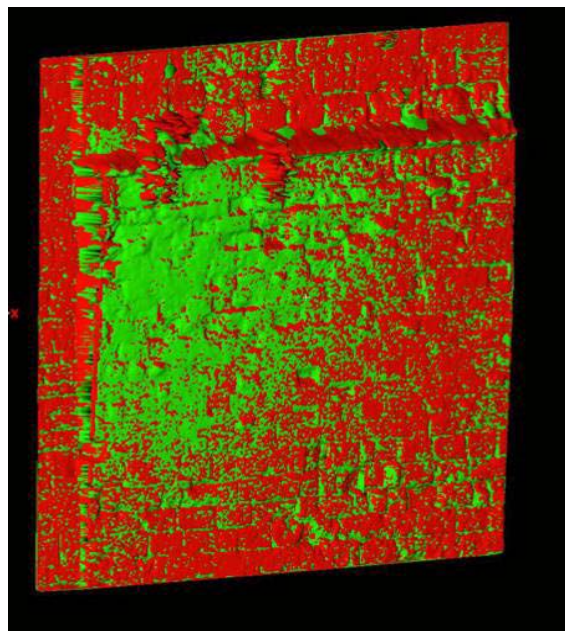
תרשים 1.24 : מבט מכיוון דרום מזרח, לפני רעידת האדמה (צולם ע"י עופר כהן, 2003)



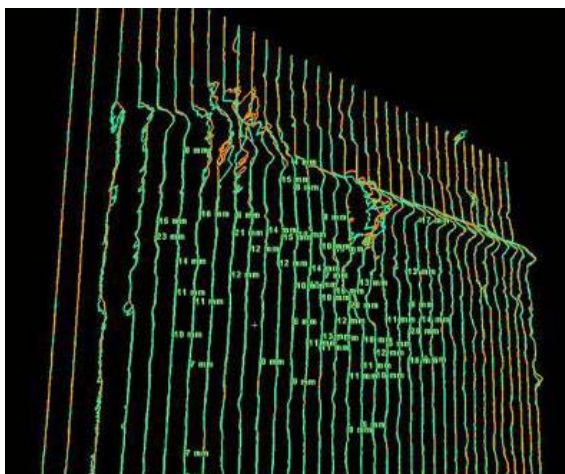
תרשים 1.23 : חתך באורוות שלמה דרך הכותל המזרחי עם הלבשת הנטייה מהסריקה לפני רעידת האדמה (שורטט ע"י עופר כהן, 2003)



תרשים 1.26 : סריקת לייזר תלת מימדית של האזור הדרומי בכותל המזרחי. באדיבות "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ"



תרשים 1.25 : תוצאות ההשוואה בין המדידות. באדום לפני הרעידה ובירוק אחרי הרעידה. באדיבות "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ"



תרשים 1.27 : חתך השוואתי. באדיבות "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ"

1.2. מקרה החקר

נבחרו שלושה מבני קמרונות ממערכת הגשר הגדול במנהרות הכותל (תרשימים 1.28-1.29). הקמרונות נבחרו ממספר סיבות:

הקמרונות שנבחרו בשנים האחרונות, נחשפו לאחר שנים ארוכות שהיו מכוסים ומלאים בעפר ולכן ניתן היה לראות אותם עם כל המפגעים, לפני הטיפול ההנדסי והשימורי, שלרב מטשטש את המצב הפיזי ה"מקורי" (בזמן החשיפה) שבו הם נמצאו.

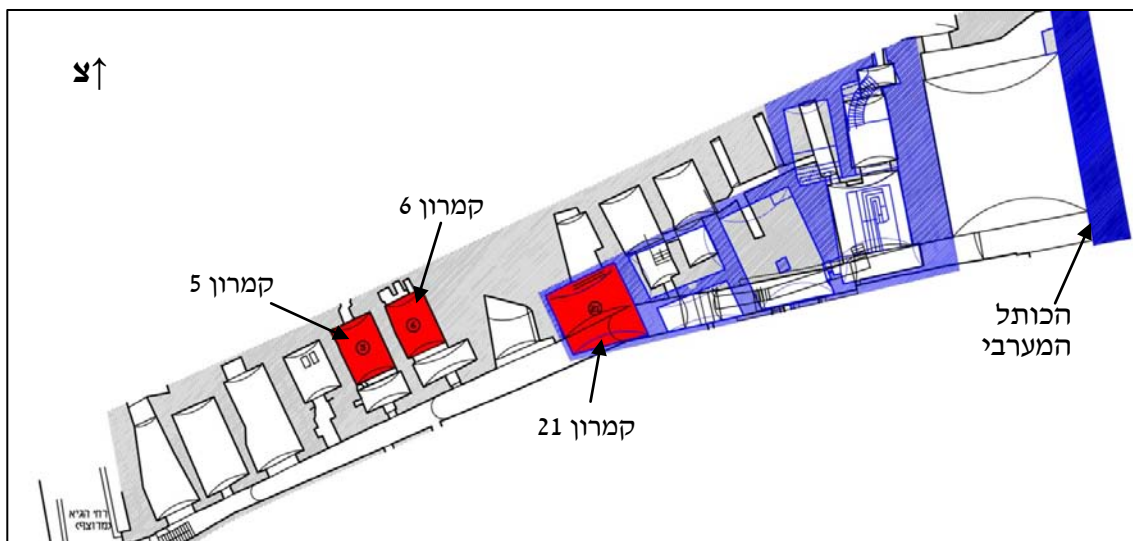
בשלושת הקמרונות נתגלו מפגעים זהים שנראה שנגרמו כתוצאה מרעידות אדמה.

הקמרונות טופלו מבחינה הנדסית ושימורית בתקופה האחרונה ועל כן נמדדו באופן מפורט ביותר.

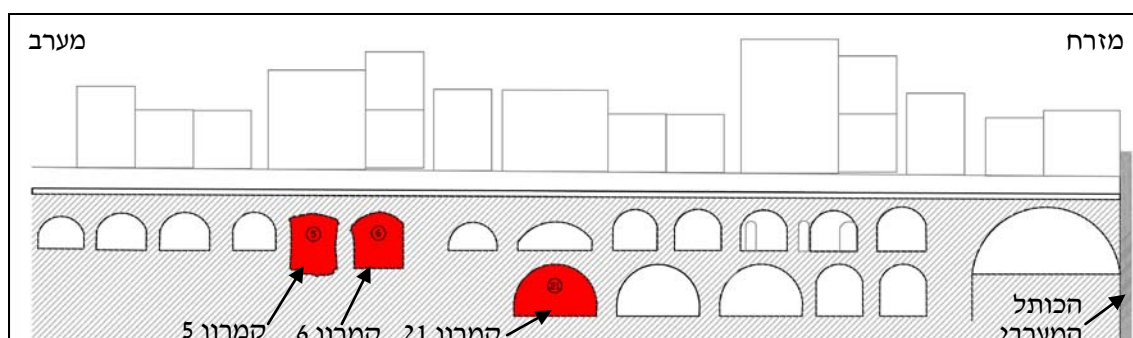
נראה כי הקמרונות נבנו באותה תקופה היסטורית.

הקמרונות נבדלים ביניהם בגיאומטריה, ומכיוון שבכל שאר הפרמטרים הנ"ל הם דומים, ניתן לבדוד את השפעת הגאומטריה ולבחון כיצד היא משפיעה על התנהגות של קשת אבן עתיקה.

המבנים הם חלק ממערכת הגשר הגדול והם מוספרו ע"י הקרן למורשת הכותל והארכיאולוגים העובדים במקום. בהמשך העבודה נתייחס למספרי הקמרונות עפ"י מערכת המיספור הקיימת.



תרשים 1.28: תוכנית הגשר הגדול (ללא קני"מ). בכחול המפלס התחתון, באדום מקרי החקר



תרשים 1.29: חתך סכמטי של הגשר הגדול (ללא קני"מ). באדום מקרי החקר

1.2.1. קמרון 5

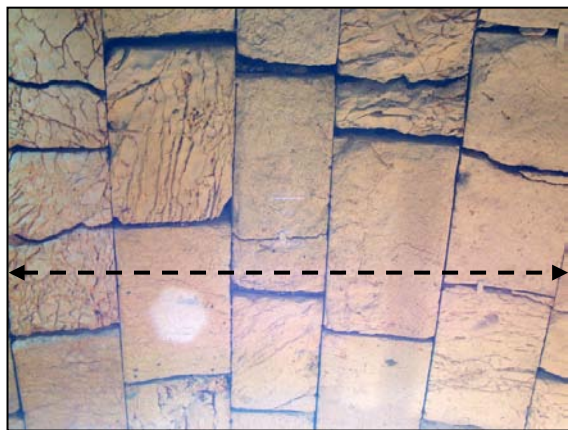
קמרון 5 הוא המערבי ביותר מבין שלושת הקמרנות הנחקרים. הקמרון בנוי מאבני גיר מסוג מיזיאחמר ומלכה (ראה פירוט בתת הפרק 1.1.1) בגדלים משתנים, 60-120/40-60 ס"מ (תרשימים 1.30-1.31). הקמרון שטוח יחסית, בעל מפתח של כ- 4 מ' ורדיוס של 4.45 מ'. הקמרון נמצא במצב יציב, אך עם דפורמציות קלות, עם סדקים מבניים הנובעים מ"פתיחת" הקמרון בכיוון צפון-דרום (בניצב לציר הגשר), עם אבנים סדוקות בכיוון מזרח-מערב (תרשים 1.32), ועם אבנים מרוסקות בעקבי הקמרון (תרשים 1.33). קירות האבן האנכיים, עליהם יושב הקמרון סובלים מדפורמציות קשות. בנוסף, הקמרון סובל מנזילות לאורך שנים רבות.



תרשים 1.30: קמרון 5, מבט כללי מצפון (תאריך צילום: 23.6.2008)



תרשים 1.31: קמרון 5 מיד לאחר חשיפתו, מבט כללי מצפון מערב (תאריך צילום: 13.3.2008)



תרשים 1.32: קמרון 5, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה. הקו המקווקו – ציר מזרח-מערב (תאריך צילום: 23.6.2008)



תרשים 1.33: קמרון 5, אבנים מרוסקות בעקב הקמרון. (תאריך צילום: 23.6.2008)

1.2.2. קמרון 6

קמרון 6 סמוך לקמרון 5 ממזרח (בעלי קיר משותף בעובי כ- 135 ס"מ). הקמרון בנוי מאבני גיר מסוג מיזיאחמר ומלכה (ראה פירוט בתת הפרק 1.1.1) בגדלים משתנים (55-120/35-60 ס"מ). הקמרון בעל רדיוס קטן יותר מקמרון 5 (חביתי יותר), בעל מפתח של כ- 4.5 מ' ורדיוס של 2.77 מ' (תרשים 1.35). הקמרון נמצא במצב יציב וכמו קמרון 5 סובל מסדקים מבניים הנובעים מ"פתיחת" הקמרון בכיוון צפון-דרום, בניצב לציר הגשר (תרשים 1.34), מאבנים סדוקות בכיוון מזרח-מערב (תרשים 1.36), ומדפורמציות גדולות בקירות האנכיים. אך בניגוד אליו אינו סובל מדפורמציות הנראות לעין בקמרון עצמו ומריסוק אבנים בעקב הקמרון.



תרשים 1.35: קמרון 6, מבט כללי מדרום
(תאריך צילום: 18.2.2010)



תרשים 1.34: קמרון 6, סדקים בקמרון הנובעים מ"פתיחה" בכיוון צפון-דרום הקו המקווקו – ציר מזרח-מערב
(תאריך צילום: 15.6.2008)



תרשים 1.36: קמרון 6, סדקים באבני הבנייה בכיוון מזרח-מערב. הקו המקווקו – ציר מזרח-מערב
(תאריך צילום: 15.6.2008)

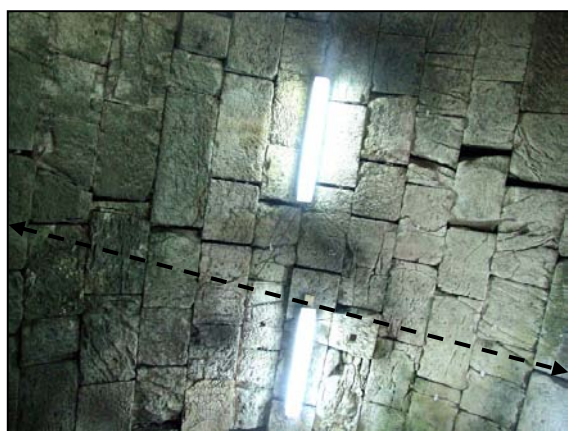
1.2.3. קמרון 21

קמרון 21 ממוקם מזרחית לקמרונות 5,6 (במרחק של כ- 20 מ') ונמצא במפלס נמוך יותר של הגשר. הקמרון בנוי מאבני גיר מסוג מיזאחמר ומלכה (ראה פירוט בתת הפרק 1.1.1) בגדלים משתנים (50-130/45-55 ס"מ). בשונה מקמרונות 5,6 הקמרון נבנה על קירות אנכיים קדומים יותר ככל הנראה מסוף ימי הבית השני (המאה הראשונה לפנה"ס - 70 לספירה), ועקב הקמרון המערבי שלו נמוך יותר מעקב הקמרון המזרחי. הקירות אינם סובלים כלל מדפורמציות. הקמרון חביתי לחלוטין (חצי עיגול), בעל



תרשים 1.37: קמרון 21, מבט כללי מצפון מערב (תאריך צילום: 3.12.2012)

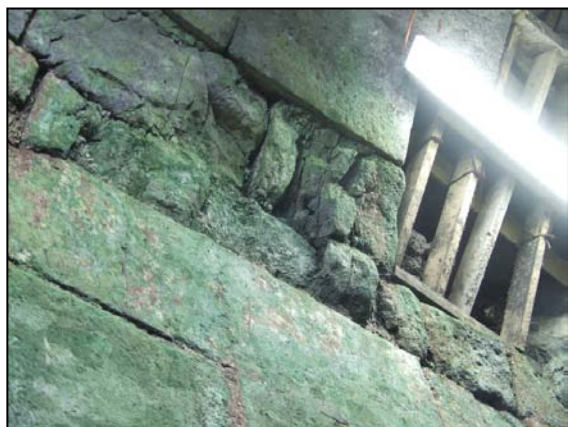
מפתח של 7 מ' ורדיוס של 3.61 מ' (תרשים 1.37). הקמרון נמצא במצב יציב, אך סובל מסדקים מבניים הנובעים מ"פתיחת" הקמרון בכיוון צפון-דרום (בניצב לציר הגשר), מאבנים סדוקות בכיוון מזרח-מערב (תרשימים 1.38-1.39), שנראה כי נגרמו כתוצאה ממאמצי לחיצה וגזירה בכיוון צפון-דרום, מריסוק אבנים באזור עקבי הקמרון (תרשים 1.40), בנוסף ובשונה מקמרונות 5,6, משקיעה והתנתקות של אבני בנייה בודדות (תרשים 1.41).



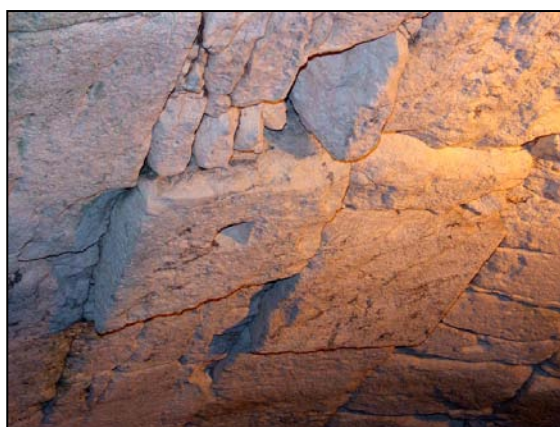
תרשים 1.39: קמרון 21, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה. הקו המקווקו – ציר מזרח-מערב (תאריך צילום: 18.9.2008)



תרשים 1.38: קמרון 21, סדקים בקמרון ובאבני הבנייה. הקו המקווקו – ציר מזרח-מערב (תאריך צילום: 16.7.2007)



תרשים 1.40: קמרון 21, חוסר באבני בנייה ואבנים מרוסקות בעקב הקמרון (תאריך צילום: 13.6.2010)



תרשים 1.41: קמרון 21, דפורמציה של אבנים בודדות. (תאריך צילום: 16.6.2007)

1.3. מטרת המחקר ויעדיו

מטרת המחקר :

מטרת המחקר היא להעמיק את הידע וההבנה של התנהגות קמרון אבן תחת עומסים חיצוניים ותנודות קרקע חזקות, לשם שיפור יכולות הייצוב ההנדסי והשימורי של קמרונות אבן עתיקים, ולסיוע במניעה ובמזעור נזקים ברעידת אדמה עתידית, באמצעות הדמיות נומריות של מבני קשתות בשני מימדים.

יעדי המחקר :

- ניתוח התנהגות הקמרונות ומציאת נקודות כשל.
- בחינת השפעת רעידת אדמה על התנהגות הקמרונות.
- בחינת השפעת התפתחות הבנייה כיום על עמידות הקמרונות ברעידת אדמה עתידית.
- התאמה של פתרונות הנדסיים ושימוריים לתוצאות ניתוח התנהגות קמרון האבן.

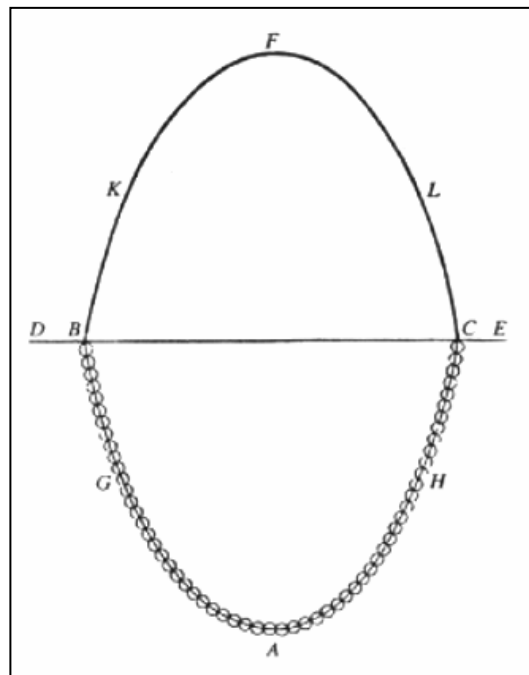
2. רקע מדעי

2.1. קשתות אבן

שלושת הקמרונות אותם נבחר בהמשך העבודה שונים אחד מהשני בעיקר בגיאומטריה. החל מקמרון 21 שניתן לומר שהוא חצי מעגלי, וכלה בקמרון 5 שמתקרב למצב של קשת שטוחה. בפרק הנוכחי ישנה התייחסות קצרה לשני מצבי הקיצון של הקשתות, הקשת הקלאסית החצי מעגלית והקשת השטוחה הנוצרת בתקרת חלל במסת הסלע.

2.1.1. קשתות אבן קלאסיות

"כשם שהקו הגמיש תלוי, כך גם אבל הפוך תעמוד הקשת הקשוחה" (Hooke, 1675) הנחת היסוד בכבלים הנה כי לא מתפתחים בהם מומנטים, ולכן כל הכוחות הפועלים על הכבל משנים את הגיאומטריה שלו והמאמצים בכבל עצמו הנם מאמצי מתיחה בלבד. עפ"י האנלוגיה של הוק, ההנחה בקשתות (או בכל גיאומטריה מקומרת) הנה שאם לוקחים את הגיאומטריה של כבל מסויים המוגדר על ידי אורך הכבל, המרחק בין שני הסמכים שלו והעומסים הפועלים עליו, והופכים אותה (תרשים 2.1), אזי המתווה שיתקבל יעבוד במאמצי לחיצה בלבד תחת אותם העומסים.



תרשים 2.1: האנלוגיה של הוק בין קשת לשרשרת תלויה (Heyman, 1982)

בעת העתיקה אבנים ותוצריהם היו חומרי הבנייה הנפוצים והזמינים ביותר. לאבנים יש חוזק גבוה ללחיצה וחוזק נמוך מאד למתיחה (ערכי החוזק משתנים כתלות בסוג האבן). על כן, כאשר רצו לייצר קירוי לחלל או מערכות מבנים להעברת עומסים לקרקע (כאשר רצפת המבנה גבוהה מהקרקע), הדרך הפשוטה ביותר היתה לבנות מבנה עם גיאומטריה שיוצרת מאמצי לחיצה בלבד באלמנטים המרכיבים אותו, ולכן הרב המוחלט של המבנים העתיקים מקורים או מבוססים (כאשר המבנה לא על פני הקרקע) במבני אבן קמורים.

קשת אבן בנויה מאבני בנייה מרובעות, לרוב בצורת טרפז או מלבן, אך לא בהכרח. רב קשתות האבן הקדומות נבנו עם חומר מליטה בין אבני הבנייה. כיום בהרבה קשתות אבן קדומות אין חומרי מליטה, אם בגלל שלא נבנו כך לכתחילה ואם בגלל שחומר המליטה נשטף והתבלה עם השנים. חומרי המליטה הקדומים הורכבו מחומרים מקומיים ומשתנים ואין יכולת ממשית להעריך את תכונותיהם. לאור האמור לעיל, לא נתייחס להשפעת חומרי המליטה בקשתות, אך ננסה לדמות מצבים בהם לא קיימים חומרי מליטה בין אבני הבניה ואין מגע מלא בין אבני הבנייה.

לאורך השנים ננקטו מספר גישות לניתוח התנהגות של קשתות אבן, החל בבדיקות שדה (Boothby et al., 1998) דרך ניתוח אנליטי לתסבולת ונקודות הכשל בקשתות (Blasi and Foraboschi, 1994; Heyman, 1982; Sinopoli et al., 1997; Vilnay, 1988 Bicanic et al., 2003; Clemente, 1998; De Luca et al., 2004).

מטרת פרק זה היא לפשט את עקרון פעולת הקשת ומעבר הכוחות כפי שנראה בהדמיות בפרק התוצאות.

ניתוח עקרון פעולת הקשת מבוסס על שלוש הנחות עיקריות (Heyman, 1982):

- לא יתכן כשל כתוצאה מהחלקה בין אבני הקשת, מכיוון שהחיכוך בין האבנים גדול מדי או שצורת האבנים אינה מאפשרת זאת.
- בקשת אבן אין יכולת מעבר לכוחות מתיחה. למרות שלאבנים עצמן יש תסבולת מתיחה כלשהי, אופן חיבור אבני הקשת אינו מאפשר קבלת מאמצי מתיחה.
- לאבני הקשת יש תסבולת לחיצה אינסופית. משמעות ההנחה היא שמאמצי הלחיצה המתקבלים באבני הקשת אינם מתקרבים לתסבולת הלחיצה של האבנים עצמן ואין חשש לכשל מעיכה באבנים.

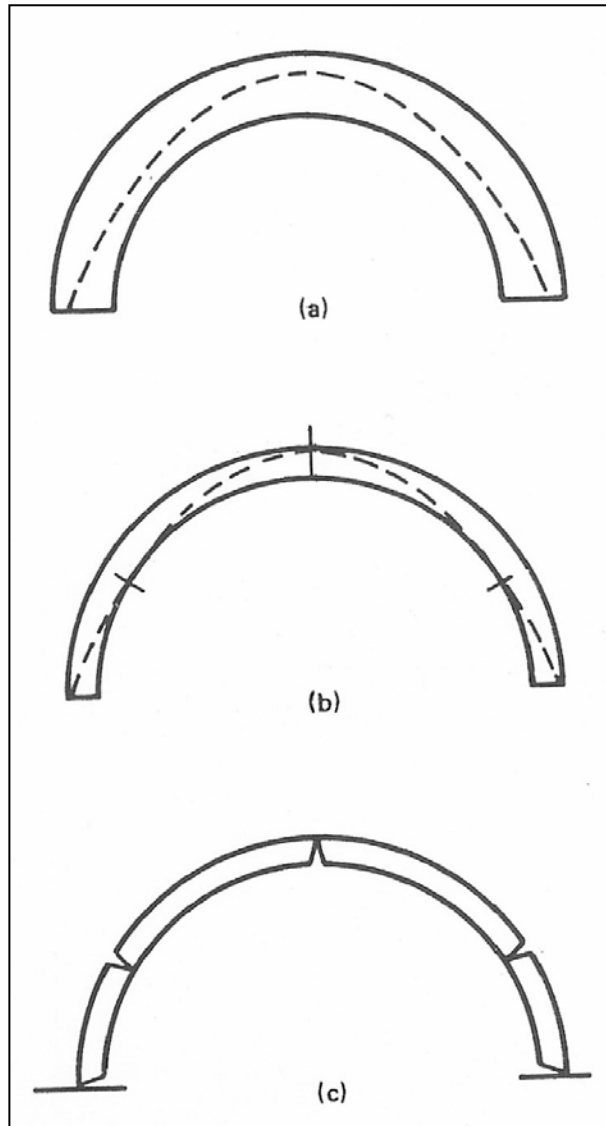
כל עוד אנו מניחים שהקשת מועמסת בעומסים אנכיים בלבד, מנגנון הכשל העיקרי שניתן לצפות ינבע מהנחה מספר שתיים. ממנה משתמע שהיווצרות כוחות מתיחה בקשת יגרמו לפתיחה ולרוטציה של חלק מאבני הקשת.

מציאת מיקום התפתחות מאמצי המתיחה בחיבורים מתאפשרת באמצעות ניתוח קו הלחיצה. (Heyman, 1982; Vilnay and Cheung, 1986)

קו הלחיצה מורכב מהוקטורים השקולים המייצגים את מאמצי הלחיצה באבני הבנייה ונובעים מהעומסים החיצוניים ומהמשקל העצמי של אבני הקשת. יש לציין כי קו הלחיצה לא בהכרח ניצב לפני האבן הנושקים לאבן הסמוכה לה.

קשת יציבה היא קשת בה קו הלחץ כולו עובר בתוך אבני הקשת. כאשר קו הלחץ מגיע להיקף החיצוני או הפנימי של הקשת יוצרו בנקודות אלה צירים ותרחש רוטציה ופתיחה, ולכן ככל שהקשת עבה יותר כך היא יציבה יותר. שינוי במצב העמיסה משנה את קו הלחיצה ועלול אף להפוך קשת יציבה ללא יציבה מבלי לשנות את גיאומטריית הקשת.

בתרשים 2.2 ניתן לראות את קו הלחיצה העובר בקשת וכאשר הקשת עבה יותר היא יציבה יותר, ולכל קשת בהתאם לעומסים אותם היא נושאת יש עובי מינימלי (תרשים 2.2-b).

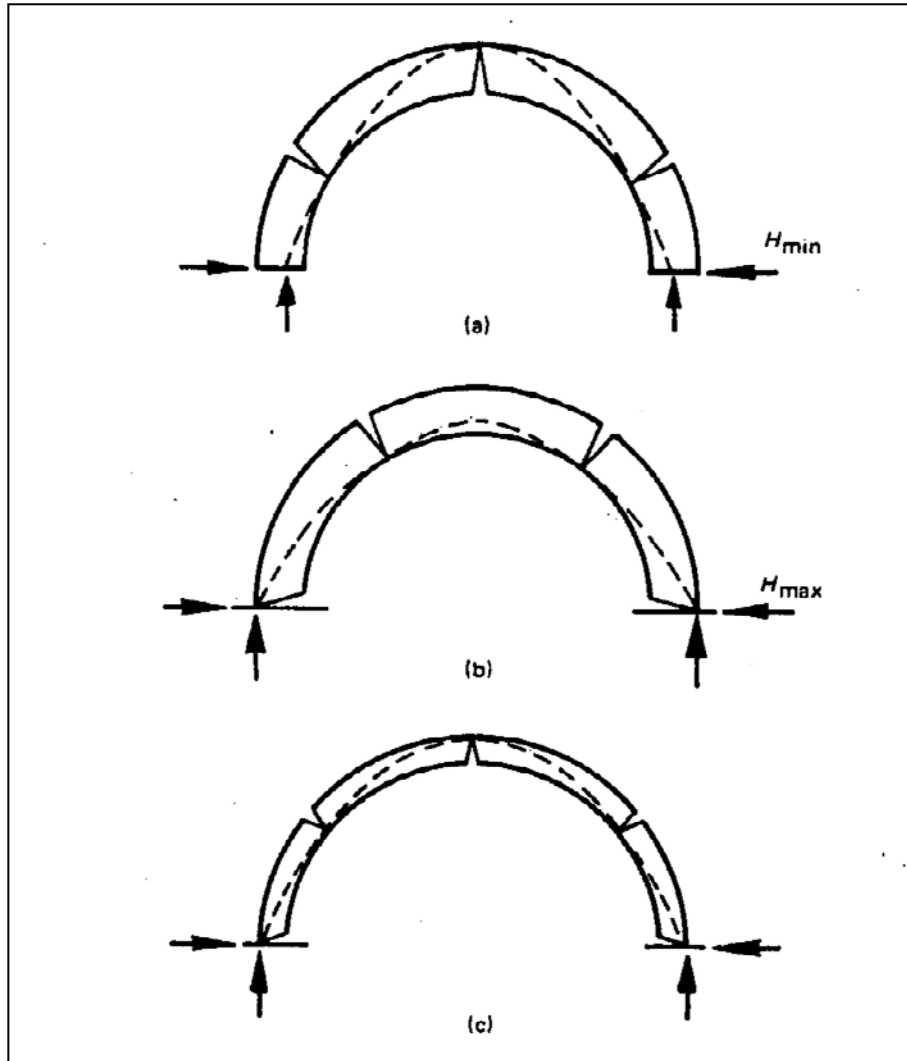


תרשים 2.2: קו הלחיצה. (a) קו הלחיצה עובר כולו בתוך הקשת. (b) הקשת בעלת העובי המינימלי, קו הלחיצה נוגע בבפני הקשת הפנימיים והחיצוניים. (c) היווצרות רוטציה ופתיחה העלולים לגרום לכשל. (Heyman, 1982)

מבנה הקשת, נמצא בשיווי משקל סטטי ולכן הדרך לפתרון אנליטי של המבנה היא באמצעות הפעלת משוואות שיווי המשקל.

הפעלת עומסים חיצוניים על קשת גורמת לשינויים בערך הדחף האופקי הפועל בסמכים ויכולה אף לערער את יציבות הקשת. לדחף האופקי יש מגבלת מינימום ומקסימום (תרשים 2.3), ואת הטווח בניהם ניתן למצוא באמצעות שיווי משקל של מומנטים סביב נקודת ציר בה תתרחש רוטציה של אבני הקשת בכשל (Blasi and Foraboschi, 1994; Heyman, 1982; Vilnay and Cheung, 1986).

ככל שהקשת דקה יותר טווח הדחף האופקי מצטמצם, וכאשר עובי הקשת הוא מינימלי (תרשים 2.3 מצב c) לדחף האופקי אין טווח אלא ערך קבוע. (Heyman, 1982)



תרשים 2.3: קשת חצי מעגלית. (a) הערך המינימלי האפשרי לדחף אופקי בסמכים - H_{min} , מנגנון כשל תחתון. (b) הערך המקסימלי האפשרי לדחף אופקי בסמכים - H_{max} , מנגנון כשל עליון. (c) קשת בעובי מינימלי. (Heyman, 1982)

2.1.2 קשתות אבן שטוחות - מודל ה- Voussoir

מסת הסלע מכילה סדקים אנכיים אשר יחד עם מישורי השכבות יוצרת מבנה של בלוקים. כאשר ישנו חלל במסת הסלע, המבנה "הבלוקי" נמצא כתורם משמעותי לתהליך התקשחות (arching) המאמצים סביב החלל ומסייע למאמצים אופקיים להתפתח ולנעול בלוקים בתקרת החלל. מודל לניתוח יציבות קורה הסדוקה על-ידי סדק במרכזה הוצע לראשונה על ידי Evans (1941) ונקרא "Voussoir beam" (מונח בצרפתית לאבני-יתד הבונות מבני קשתות). בהמשך המודל עבר שינוי על-ידי Beer and Meek (1982) ושיפורים נוספים נעשו במרוצת השנים על-ידי Sofianos (1996).

סיכום פיתוחי מודל ה- voussoir המובא בהמשך נכתב על ידי Brady and Brown (2004). המודל של קורת Voussoir מניח כי תקרת החלל בעל מפתח S בנויה מקורה אופקית החצויה במרכזה על-ידי סדק אנכי. המודל הינו דו-מימדי מתוך הנחת מעוות מישורי (תרשים 2.4). רוחב הקורה הוא S ועובייה t . הקורה תומכת את משקלה העצמי W על-ידי מאמצים אופקיים המתפתחים כפועל יוצא מהכפיפה האנכית ו"נועלים" את דפנות הקורה מהחלקה. היות וצידי הקורה ומרכזה מוכתבים

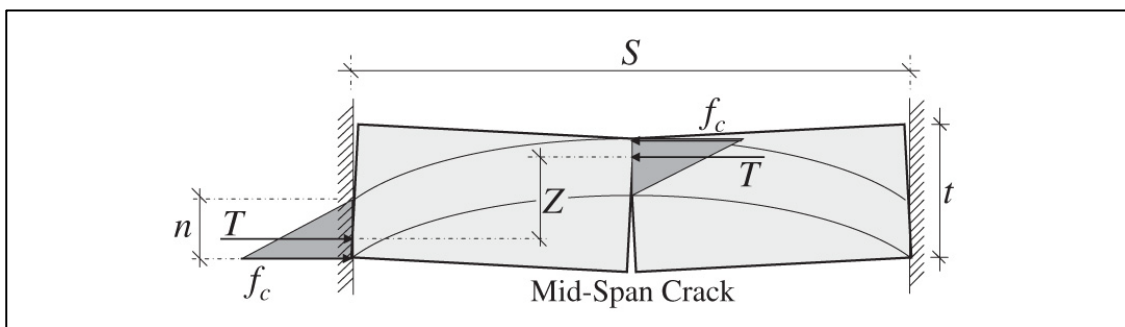
ממישורי אי רציפות, הם אינם מעבירים מאמצי מתיחה אופקיים המתפתחים בחלקו התחתון של מרכז הקורה ובחלקים העליונים שבצידיה. לעומת זאת, מאמצי לחיצה לטראליים בהחלט מתפתחים כתוצאה מהכפיפה ומועברים לרוחב הקורה בצורה של קשת, מהחלק התחתון שבצידי הקורה דרך חלקה העליון במרכזה. הקו המתאר את מאמץ הלחיצה הממוצע לרוחב הקורה נקרא thrust ומניסיונות מעבדה וממודלים נומריים נמצא כי צורתו היא בקירוב חלק מפרבולה.

במצב כזה, שלושה סגנונות כשל עיקריים נלקחים בחשבון:

1. החלקה אנכית לאורך דפנות הקורה – מתרחשת כאשר כוח החיכוך המקסימאלי המסוגל להתפתח על דפנות הקורה ולהתנגד להחלקה קטן מהכוח האנכי המושך כלפי מטה שנוצר ממשקלה העצמי של הקורה.
2. ריסוק פינות הקורה הנמצאות תחת לחיצה (crushing) - כשל מסוג זה יתרחש כאשר מאמצי הלחיצה בפינות הקורה יגברו על חוזק הלחיצה החד-צירי של הסלע הרציף.
3. קריסה לרוחב הקורה (buckling).

פוטנציאל לכשל מסוג crushing ו-buckling גדל ככל שהיחס בין רוחב המפתח S לעובי הקורה t גדל. לעומת זאת, ככל שהיחס הזה קטן, נצפה לקבל החלקה לאורך דפנות הקורה.

לצורך האנליזה מניחים כי התפלגות מאמצי הלחיצה בצידי הקורה הינה משולשת, כלומר המאמץ הגבוה ביותר מתרחש בפינות הקורה (פינה תחתונה בצדדים, עליונה במרכז) וערכו הולך וקטן ליניארית עם ההתקדמות במעלה/מורד הסדק, כאשר גובה אזור הלחיצה מוגדר כ- h (תרשים 2.4) שקול כוח הלחיצה T פועל בצורה אופקית במרכז הכובד של האזור הלחוף (בצידי הקורה ובמרכזה), זאת אומרת בשליש גובה המשולש ושקול זה מועבר דרך מרכז הקורה לאורך קו שצורתו פרבולה, כאשר הוא יוצר צמד כוחות בעל זרוע מומנט Z .



תרשים 2.4: דיאגרמה של קורת Voussoir הכוללת נתונים גאומטריים, כוחות ומאמצים המתפתחים בקורה. (Bakun-Mazor et al., 2009)

3. שיטות המחקר

3.1. שיטת ה-DDA

בפרק זה תסקר שיטת ה-DDA בקצרה. פירוט רחב יותר של השיטה מופיע ב - Shi (1988,1993). DDA היא מהמובילות בשיטות ה-DEM (אלמנטים דיסקרטים) העקיפות מבחינת ההתפתחות והיישומים האפשריים (Jing, 2003). בעבודה זו כל האנליזות הנומטריות הדינמיות יבוצעו על-ידי הקוד המקורי של ה-DDA, אשר נכתב על ידי ד"ר Shi.

תכנת ה-DDA ממדלת חומר בלתי רציף כמערכת של בלוקים נפרדים המסוגלים לעבור דפורמציה, ונעים עצמאית. על אף שמקורה של השיטה היא במשפחת ה-discrete element method, היא דומה מאוד לשיטת האלמנטים הסופיים (finite element method), ומהווה למעשה הכללה שלה (Shi, 1993). החוק העומד בבסיס השיטה הוא החוק השני של התרמודינמיקה, הקובע כי מערכת שפועל עליה כוח חיצוני תעבור דפורמציה בצורה כזו שבסופו של התהליך למערכת כולה תהיה אנרגיה פוטנציאלית מזערית. שימוש ב-DDA מאפשר הן אנליזות סטטיות, והן דינמיות. בשני סוגי האנליזות (סטטית ודינמית) יש שימוש בתכנית צעדי זמן (time-steps) ואלגוריתם עקיף (implicit). ההבדל בין אנליזה סטטית לדינמית הוא שבסטטית מהירות הבלוקים מתאפסת בתחילת כל צעד-זמן, בעוד שבדינמית מהירות הבלוקים בתחילת כל צעד זמן היא מהירותם בסוף צעד הזמן הקודם. ישנן שתי מגבלות על יכולת התנועה של הבלוקים ב-DDA: בין הבלוקים לא מתאפשרת חדירה ואף לא מתיחה. יישום מגבלות אלו נעשה על-ידי שימוש בקפיצים וירטואליים המותקנים כביכול בכל מגע בין שני בלוקים. חדירה בין הבלוקים או מתיחה ביניהם תביא להתכווצות או מתיחה של הקפיץ, פעולה שדורשת אנרגיה, ולכן הפתרון עם מינימום האנרגיה הוא זה ללא מתיחה וחדירה של הבלוקים. אחד היתרונות הגדולים של השיטה הוא שאין צורך להניח מראש את סגנון הכשל של המבנה, כמו בשיטות אחרות בגיאומכניקה. סגנון הכשל הוא חלק מתוצאות האנליזה ב-DDA. באמצעות DDA נוח למדל בלוקים בעלי גיאומטריות מורכבות המוכתבות מנטיות מישורי אי-רציפות במסת הסלע והמרווחים ביניהם, כי הבלוקים ב-DDA אינם מוגבלים לגיאומטריות סטנדרטיות, בניגוד לשיטת אלמנטים סופיים (FEM), בהם כל האלמנטים בעלי גיאומטריה קבועה.

חסרונות השיטה הם בעיקר אי היכולת בשלב הזה לבצע מודלים תלת מימדיים, והעדר האפשרות לראות ולנתח את השתנות המאמצים בתוך בלוק מכיוון שהמאמצים והעיבורים בכל בלוק הינם קבועים ומחושבים עפ"י ממוצע. יחד עם זאת, שיטה חדשה (mm - manifold method), שאינה בשימוש בעבודה זו, מאפשרת לשלב עם רשת ה-DDA (שהיא רשת פיסיקלית – הגבולות הפיסיקליים של הבעיה) רשת של אלמנטים סופיים (רשת מתמטית), על מנת לקבל את התפלגות המאמצים בתוך הבלוקים.

3.1.1 משוואות ה-DDA

תזוזה (u, v) של נקודה (x, y) בבלוק i על פני המישור מיוצגת על-ידי ששה משתנים, המרכיבים את וקטור התזוזה של הבלוק $[D_i]$:

$$[D_i] = (u_0 \quad v_0 \quad r_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy})^T \quad (3.1)$$

שלושת המשתנים הראשונים הינם תזוזות ורוטציה של גוף קשיח, ושלושת האחרונים הינם עיבורים נורמליים ועיבור גזירה בבלוק.

התזוזה המלאה של הבלוק ניתנת להצגה בצורה הבאה:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

על ידי משוואה זו ניתן לחשב תזוזה של כל נקודה (x, y) בבלוק, בהנחה שהתזוזות בנקודה (x_0, y_0) ידועות, וכן העיבורים ידועים.

בהנחה שמערכת הבעיה מכילה מספר n של בלוקים, משוואות שיווי המשקל הכוללות של הבלוקים הן מהצורה:

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

כל קבוע K_{ij} מוגדר על-פי המגעים בין בלוק i לבלוק j , וכאשר $i = j$ הוא מוגדר על-פי תכונות הבלוק. מכיוון שלכל בלוק שש דרגות חופש $(u_0 \quad v_0 \quad r_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy})$, כל קבוע K_{ij} הוא למעשה מטריצה בגודל 6×6 . D_i ו- F_i הם וקטורים של 6×1 כאשר D_i הוא וקטור משתני התזוזה של בלוק i , ו- F_i הוא וקטור העומסים על בלוק i .

משוואות שיווי המשקל נגזרות תוך שמירה על תנאי מינימום אנרגיה פוטנציאלית Π המיוצרת על-ידי כוחות ומאמצים. השורה ה- i של מטריצת משוואות שיווי משקל (משוואה 2-3) מכילה למעשה שש משוואות ליניאריות:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri}} = 0, \quad r = 1, \dots, 6 \quad (3.4)$$

כאשר d_{ri} הוא משתנה הדפורמציה של בלוק i . סך כל האנרגיה הפוטנציאלית Π הוא סכום של כל מקורות האנרגיה – מאמצים וכוחות.

3.1.2. הפעלת התכנה

אנליזת DDA מורכבת למעשה מהפעלה של מספר קודים במספר שלבים עוקבים: DL, DC, DF, ו-DG, המפורטים להלן בעקבות (Young, 1996).

קוד DL (DDA lines) – מייצר קווים התוחמים את הבעיה, ומהווים את אי-הרציפויות או הסדקים בבעיה. הקווים מיוצרים בצורה סטטיסטית על-ידי קביעת המרווח הממוצע בין סדקים, אורך ממוצע, מידת חפיפה בין סדקים (Shi and Goodman, 1989) ומידת האקראיות של הופעתם. בשלב זה ניתן גם להזין קווים שאינם סטטיסטיים.

קוד DC (DDA cut) – יוצר את מערכת הבלוקים הנוצרת מחיתוך הקווים שהוגדרו על ידי ה-DL. לאחר חישוב של כל נקודות החיתוך של הקווים, אותם מקטעי קווים שלא תורמים ליצירת בלוקים סגורים נמחקים. הקוד שומר את קואורדינטות הבלוקים ושטחם. בנוסף, בשלב זה ניתן להוסיף אלמנטים נוספים למרחב האנליזה, כגון נקודות קבועות, נקודות מדידה, נקודות העמסה ועוד.

קוד DF (DDA force) – מבצע את האנליזה הסטטית או הדינמית על המרחב שהוגדר בקוד DC. בשלב זה פרמטרים פסיקליים נוספים מוזנים אל המרחב, כמו תכונות החומר, עומסים נקודתיים, כוחות גוף, מאמצים התחלתיים ומהירות התחלתית. כמו כן בשלב זה מוגדרים - הפרמטרים הנומריים $k01$, $g1$, $g2$ ו- $g0$:

$k01$ - פרמטר השליטה הדינמי (dynamic control parameter) – מגדיר את סוג האנליזה. ערך הפרמטר נע בין 0 ל-1, כאשר 0 מציין אנליזה סטטית, ו-1 מציין אנליזה דינמית מלאה. כל מספר בין 0 ל-1 קורלטיבי למידת הריסון הקינטי באנליזה, למשל 0.95 קורלטיבי לריסון קינטי של 5%.

$g2$ – יחס התזוזה המרבית (assumed maximum displacement ratio) - התזוזה המחושבת עבור כל צעד זמן מוגבלת על-ידי ערך מרבי, על מנת למלא אחר התנאים של תזוזות אינפיניטסימאליות בכל צעד זמן. ערך מרבי לתזוזה בצעד זמן אחד הוא $g2 * W$, כאשר W הוא מחצית המימד האנכי של מרחב האנליזה.

$g1$ – גבול עליון של צעד הזמן (upper limit of step size) – גודל צעד הזמן המרבי היכול לשמש בצעד זמן אחד.

$g0$ – קשיחות הקפיצים (contact spring stiffness) – הקשיחות המיוחסת לקפיצים אשר "מותקנים" במגעים בין הבלוקים. בכל צעד זמן מחושבים כל המגעים בין הבלוקים השונים. משוואות שיווי המשקל מחושבות בצורה איטרטיבית, תוך שימוש באיטרציות מסוג "open-close", עד שאין מתיחה או חדירה בין הבלוקים. בסוף צעד הזמן כל הבלוקים מקיימים שיווי משקל.

קוד DG (DDA graph) – קוד המייצר תמונות קפואות (snap shots) מתוך האנליזה, וכן קבצי postscript להדפסה. כמו כן הקוד מייצר תמונה גרפית של המאמצים הראשיים בבלוקים עם תום האנליזה.

העובדה ששיטת DDA לא מצריכה כל הנחה לגבי מנגנון הכשל, אלא מניבה אותו כתוצאה של האנליזה, מאפשרת ומחייבת לערוך אימותים של תוכנה זו עם פתרונות אנליטיים, תוכנות אחרות, כשלים נצפים ו/או ניסיונות מעבדה. מחקרי אימות רבים כאלו נעשו בשנים האחרונות כפי שנסקר על ידי (Maclaughlin and Doolin, 2005), ושיטת DDA נמצאה במחקרים אלו כמתאימה ביותר לבעיות גיאוטכניות והנדסיות.

3.2. שיטות שדה

3.2.1. מיפוי

לאחר חפירה ארכיאולוגית וחשיפת הקמרונות בחדרים 5,6,21 בשנים 2007-2010, ערכה חברת "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ", סריקה ומדידה מלאה ומקיפה של החדרים. המיפוי התלת ממדי המפורט של חדרים אלה סיפק למתכנני ההנדסה והשימור מידע מעודכן בטרם התחילו עבודות הייצוב והשימור.

למיפוי זה שני ערכים חשובים נוספים :

1. זהו תיעוד מעודכן של חלק מקמרונות הגשר הגדול, שהוא בעל ערך היסטורי. המידע עצמו מאפשר עבודות מחקר ולימוד חדשות.

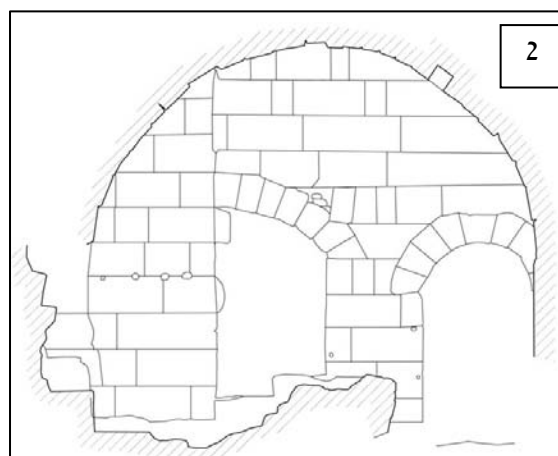
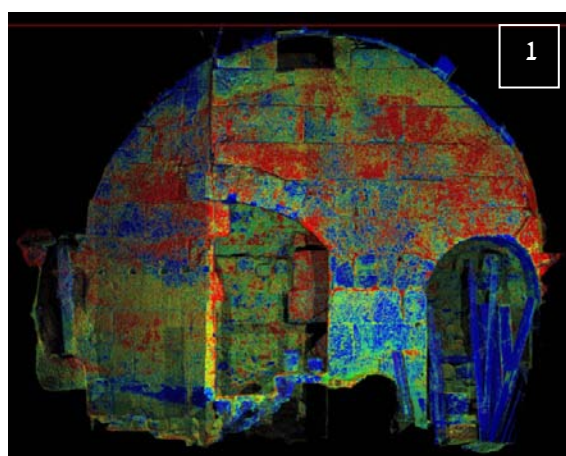
2. המידע שנאסף על חדרים אלה מאפשר ניטור ומעקב אחר תזוזות עתידיות, בעקבות אירועים חד פעמיים כמו רעידת אדמה ונזילה חזקה או עקב החלשות המבנה והאלמנטים המרכיבים אותו במשך השנים.

הסריקה שבוצעה מאפשרת מיפוי ותיעוד תלת ממדיים, מרחוק וללא מגע, ברמת דיוק ופירוט גבוהים מאוד והיא מאפשרת מדידת מרחקים וקואורדינטות של הגוף המתועד.

מערכת הסריקה מבוססת על מכשיר מבוקר מחשב, המוצב מול הסביבה הנמדדת ושולח אליה אלפי פולסים של לייזר בכל שנייה, תוך ביצוע תנועת סריקה של המרחב המתועד. כל פולס נשלח בזווית אנכית ואופקית חד-ערכית ויחידה. הפולסים המשודרים פוגעים במעטפת העצם הממופה ומוחזרים אל הסורק, המשתמש בהם לחישוב המרחק לנקודת הפגיעה. מדיעת המרחק ושתי הזוויות הניצבות, מתקבל המיקום המרחבי של נקודת הפגיעה (X,Y,Z) וכן צבעה (RGB).

בדרך זו התקבל אוסף נקודות גדול מאד - "ענן נקודות" (Cloud of Points), המקושר לרשת הקואורדינאטות הארצית, ובו כל המידע הגאומטרי והחזותי על חדרים אלה.

ענן הנקודות שימש חומר גלם להפקת מודל תלת ממדי, חתכים, שרטוטים ותכניות, ולניתוחים גאומטריים. (תרשים 3.1)



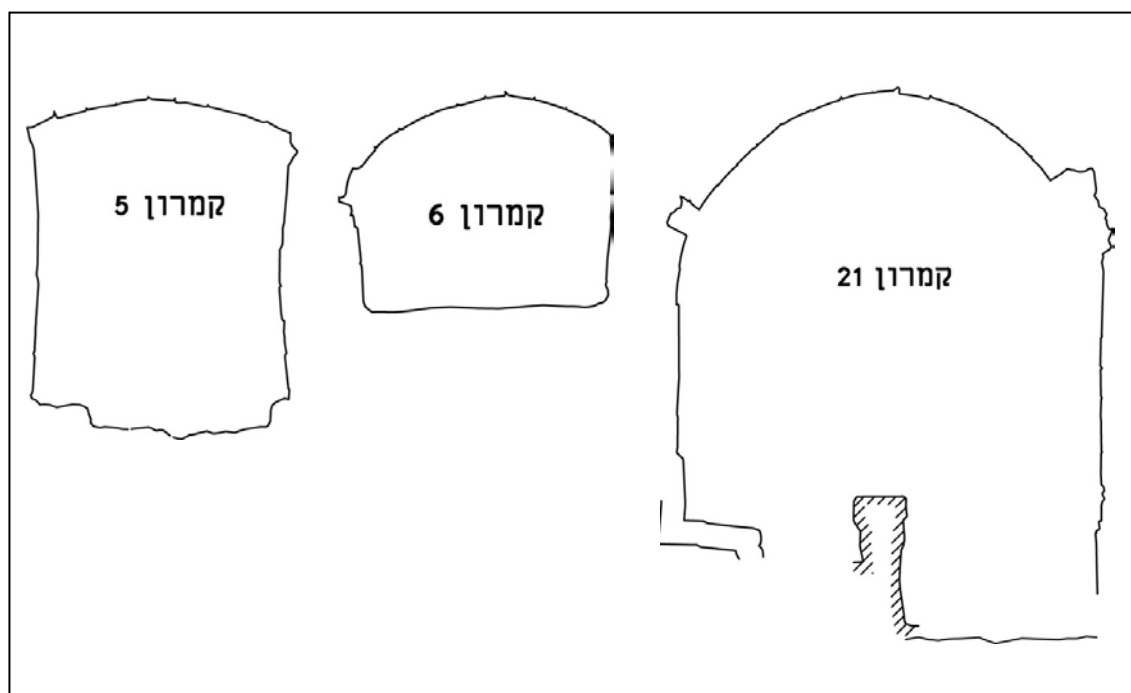
תרשים 3.1 : דוגמא לחומרי גלם שהופקו ע"י חברת "מבט טכנולוגיות בתלת מימד בע"מ" בחדר 21
1. "ענן נקודות" במבט לכיוון דרום. 2. שרטוט אוטוקד של חתך במרכז החדר עם מבט לכיוון דרום (ללא קנ"מ)

3.3. מידול

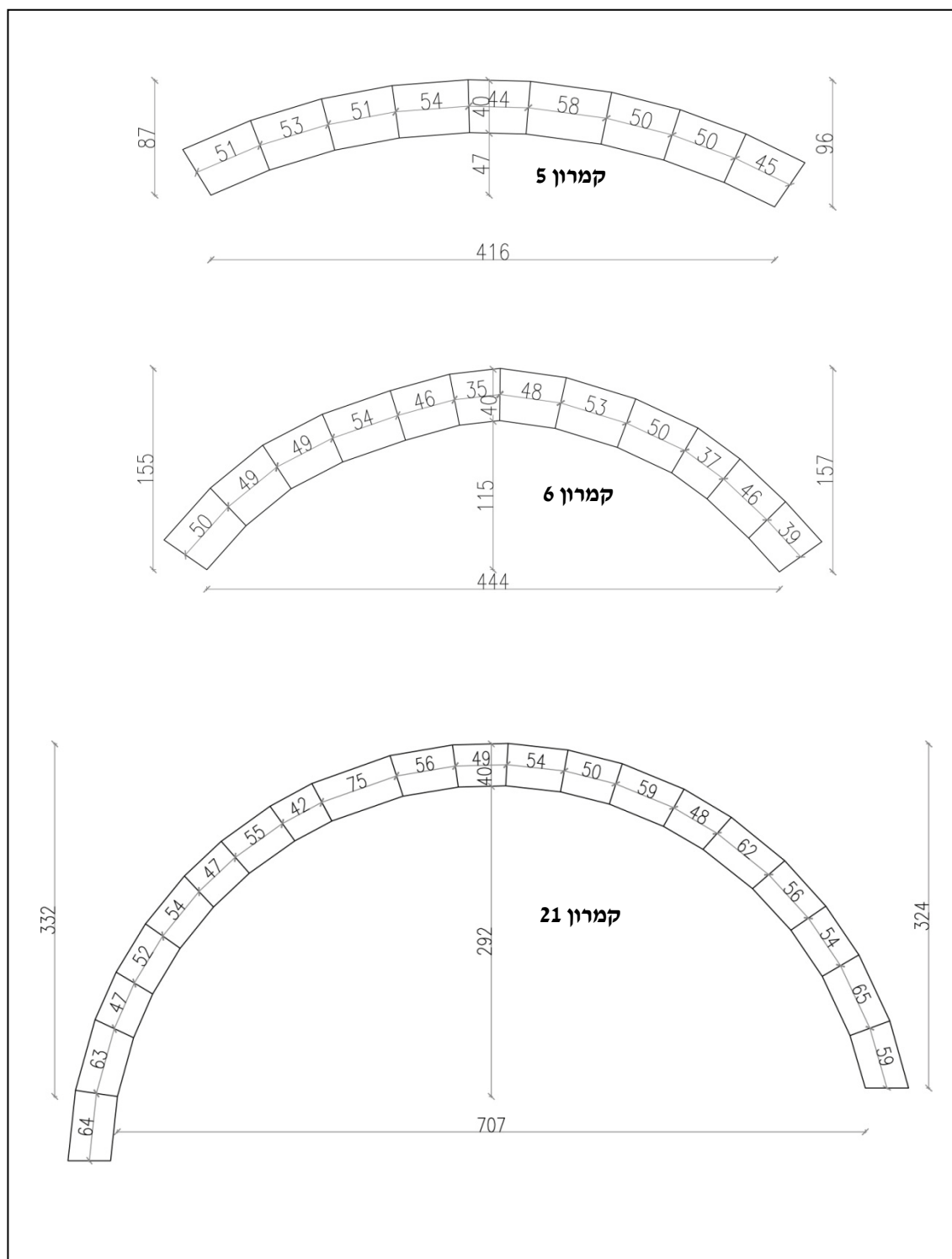
3.3.1. שרטוט באמצעות AutoCad

לשם בניית מודלים דו מימדיים לשלושת הקמרונות, נלקחו שלושה שרטוטי אוטוקד של חתכים במרכז הקמרונות (במבט לצפון) שהופקו ע"י חברת "מבט" (תרשים 3.2), ועל בסיסם שורטטו חתכים הבנויים מבלוקי אבן. (תרשים 3.3)

בשרטוט שהתקבל מהסריקות והמידות ניתן לראות רק את הפן הפנימי של הקמרונות ולכן השרטוט מבוסס על הנחה כי כל אבני הבנייה הן באותו גובה וישנו שטח מגע מלא בין אבן לאבן. מכיוון שכיום הקמרונות בעלי דפורמציות קלות, נעשו שינויים קלים במתווה הקמרונות במצבם הנוכחי במטרה לשרטט אותם במתווה המקורי בו הם נבנו. יש לציין כי הקמרונות נבנו במקור עם חומר מליטה בין בלוקי האבן, אך מכיוון שהם נמצאו במקומות בודדים ואינם ניתנים למדידה ולביצוע בדיקות מעבדה, הם לא הובאו לידי ביטוי בשרטוט, אך במידול הם באים לידי ביטוי בשינוי זווית החיכוך.



תרשים 3.2 : שרטוטי אוטוקד של חתכים במרכז הקמרונות (במבט לצפון) שהופקו ע"י חברת "מבט". (ללא קני"מ)



תרשים 3.3 : שרטוט אוטוקד של החתכים הבנויים מבלוקי אבן (ללא קנ"מ). המידות בס"מ

3.3.2 מידול באמצעות 2D-DDA

חקירת התלות בין הפרמטרים הנומריים לבין תוצאות האנליזה ומחקרי אימות, שחלקם אף עסקו בנייתו לאחר למציאת פרמטרים של רעידות אדמה היסטוריות באמצעות תוכנת 2D-DDA על מבנים היסטוריים באתרים ארכיאולוגיים, בוצעו בעבר (Tsesarsky and Hatzor, 2006; Tsesarsky and Talesnick, 2007; Kamai and Hatzor, 2008; Bakun-Mazor et al., 2009; Yagoda-Biran and

מכיוון שמקרה החקר מלווה בהרבה סימני שאלה לגבי זמן בניית המבנים, מספר רעידות האדמה שפגעו בו, תיקונים מבניים שונים בתקופות שונות ומשטר עומסים לא ידוע בוודאות בזמן פעילות רעידות האדמה השונות, בעבודה זו לא יתבצע מחקר אימות ולא ניתוח לאחור. השימוש בתוכנה הוא ככלי להבנת התנהגות המבנים במצבם הנוכחי וגזירה מכך לגבי התנהגותם בעתיד ויכולתם לעמוד ברעידת אדמה עתידית.

בכדי לבנות מודלים המדמים את מצב הקמרונו במציאות הונחו מספר הנחות ראשוניות :

- מבנה קמרון הוא מבנה תלת מימדי, אך מכיוון שבכיוון ציר הקמרון, צפון-דרום, לא פועלים כוחות חיצוניים וכי כל המאמצים הנוצרים מכוחות חיצוניים ומהמשקל העצמי של אבני הקמרון מתפתחים בכיוון מזרח-מערב, ניתן למדל קמרון באמצעות הפיכתו לקשת דו מימדית במצב מאמץ מישורי ($\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \sigma_z = 0$).
- ישנו מגע מלא בין אבני הבנייה, ללא התחשבות בהיווצרות ריכוזי מאמצים עקב סיתות לא מדויק של אבני הבנייה או עקב הימצאות חלקית של חומרי מליטה בין האבנים. בכדי לדמות מצב שבו חומר המליטה חלש מאד או אפילו לא קיים כלל, נציב במודלים זווית חיכוך קטנות מאד.
- הסמכים של הקשתות ממוקמים נקודתית בעקבי הקשת ואין להם יכולת תזוזה.
- במודל קמרון 21 ישנם 6 סמכים. תוספת הסמכים (בתחתית בלוק 1) מייצרת שיווי משקל ומאפשרת השוואה של תוצאות ההדמיות בין שלושת המודלים.
- העומסים על אבני הבנייה נובעים מעומס מפורס שווה ומישורי והם פועלים במרכז הצלע העליונה של כל אבן, כאשר כל האבנים מועמסות.

על מנת להשוות בין הקמרונו השונים ולבודד ולחקור את השפעת הפרמטרים שיפורטו בהמשך על התנהגות הקמרון, הפרמטרים הפיזיקליים והנומריים המתוארים בטבלה 2 לא שונו במהלך כל האנליזות.

טבלה מס' 2 : הפרמטרים הפיזיקליים והנומריים שהוכנסו לתוכנה לשם ביצוע ההדמיות

	פרמטרים	ערכים
פרמטרים פיזיקליים	צפיפות	25 kN/m ³
	מודול יאנג	30 Gpa
	מקדם פואסון	0.25
פרמטרים נומריים	פרמטר דינמי	1
	גודל צעד זמן	0.001 sec
	תזוזה מירבית בצעד זמן	0.01
	קשיחות הקפיצים במגע	15x10 ⁶ kN/m

להנחות הראשוניות יש השלכות משמעותיות על תוצאות ההדמיות ודיון בכך יפורט לעומק בפרק הדיון. בניית המודלים התבצעה באמצעות הוצאת קורדינטות מדויקות משרטוטי החתכים באוטוקד של קודקודי הבלוקים (אבני הבנייה), נקודות ההעמסה באמצע הצלע העליונה של כל בלוק, נקודות מרכז הבלוק שמהם נמדדות התזוזות ונקודות הסמכים של כל קשת. במהלך הסימולציות שהתבצעו על כל קמרון שונו מספר פרמטרים עיקריים :

• זוית החיכוך

זוית החיכוך בין אבני הבלוקים מדמה את מצב המגע בין אבני הבנייה. הקמרון במקור נבנה עם חומר מליטה בין האבנים, ובתלות בחוזק חומר המליטה ללחיצה ולמתיחה, מצב המגע בין האבנים נע בין זוית חיכוך גדולה מאד, 40° ומעלה, לבין זוית החיכוך הקטנה ביותר בה עומד הקמרון ואינו קורס, המדמה שטח מגע מינימלי בין האבנים כתוצאה מהיעלמות חומר המליטה עקב שינוי הזמן ובעיקר עקב חדירת מים.

• עומסים

נחלק את שינויי העומסים לשני מצבים :

מצב עמיסה נמוך שמתייחס למצב העמיסה על הגשר בתיפקודו המקורי כגשר פתוח להולכי רגל, אז - העומסים היחידים שנשא הם מילוי האדמה עד לריצוף, הולכי רגל ואמת מים.

מצב עמיסה גבוה שמתייחס לימינו, בהם על קמרונות הגשר ממוקמים בתי הרובע המוסלמי שבנייתם ממשיכה להתפתח גם כיום, ועל כן העומסים על קמרונות הגשר גדלים באופן משמעותי (טבלה 3). מכיוון שקמרונות הגשר משמשים כיסודות למבנים, אך ביניהם לבין המבנים ישנה שכבת מילוי מאבנים ואדמה, נתייחס לעומס הנוסף מהמבנים כאל עומס מפורס. העומס שחושב בנוי מהערכת משקל של מבנה אבן בעל שתי קומות. יש לקחת בחשבון שיש נקודות בהן העומסים נמוכים יותר ולהיפך, וישנם מקומות בהם העומס המופעל על הקמרונות הוא נקודתי ולא מפורס, אך מכיוון שאין אפשרות לדעת זאת בוודאות ההנחה היא שכל העומס מפורס שווה והוא יוצר עומס נוסף של

$$.300 \frac{kN}{m^2} \quad \left[30 \frac{ton}{m^2} \right]$$

המשקלים המרחביים שנלקחו בחשבון בחישוב העומסים הם :

$$25 \frac{kN}{m^3} - \text{משקל מרחבי אבן}$$

$$18 \frac{kN}{m^3} - \text{משקל מרחבי מילוי}$$

טבלה מס' 3 : העומסים החיצוניים הפועלים על בלוקי האבן במודלים של הקשתות (תרשים 3.5)

מספר בלוק	קמרון 5		קמרון 6		קמרון 21	
	מצב עמיסה נמוך (kN)	מצב עמיסה גבוה (kN)	מצב עמיסה נמוך (kN)	מצב עמיסה גבוה (kN)	מצב עמיסה נמוך (kN)	מצב עמיסה גבוה (kN)
1	9.68	105.00	8.97	95.07	10.26	50.16
2	8.83	109.20	9.51	85.11	10.65	52.65
3	7.91	109.20	8.39	104.99	11.56	70.36
4	8.02	117.60	8.26	119.56	13.18	90.88
5	6.53	96.60	6.30	102.90	10.75	84.25
6	8.82	126.00	4.90	86.80	12.21	108.81
7	8.21	107.10	6.47	113.57	9.26	93.26
8	8.87	102.90	7.67	121.07	14.89	170.29
9	9.08	92.40	7.97	108.77	10.54	134.44
10			6.47	75.77	9.06	120.36
11			8.10	81.60	9.96	129.66
12			7.61	66.41	9.49	116.59
13					12.18	133.98
14					10.87	105.37
15					14.50	121.60
16					13.16	95.06
17					12.18	77.28
18					13.36	74.26
19					9.70	47.50

• רעידות אדמה

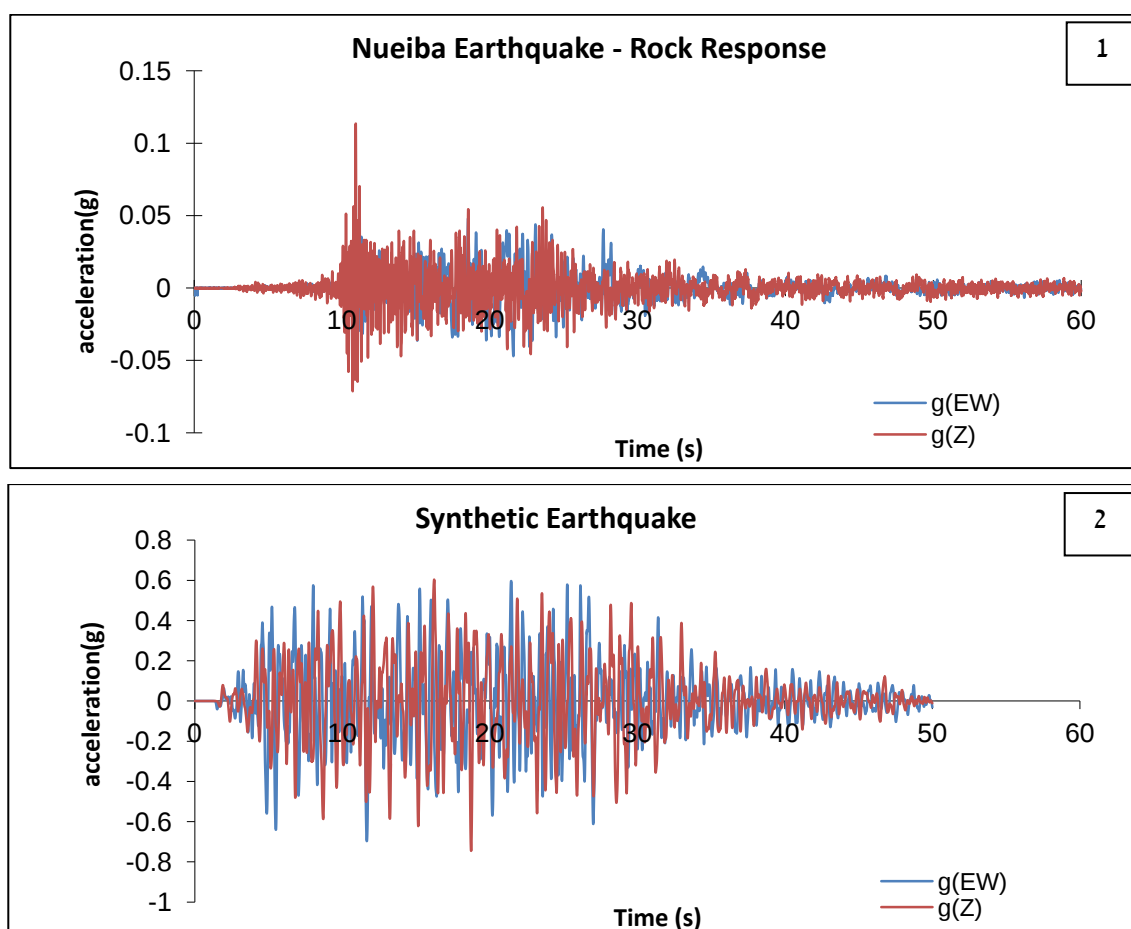
נערכו שלוש הדמיות שונות: מצב סטטי ללא רעידת אדמה, הפעלת רעידת אדמה חלשה והפעלת רעידת אדמה חזקה.

הפעלת ההדמיות עם רעידות האדמה נעשתה באמצעות הזנת רשומה של תאוצות קרקע ברעידות אדמה אמיתיות אל מרכזי המסה של כל אחד מהבלוקים במודל.

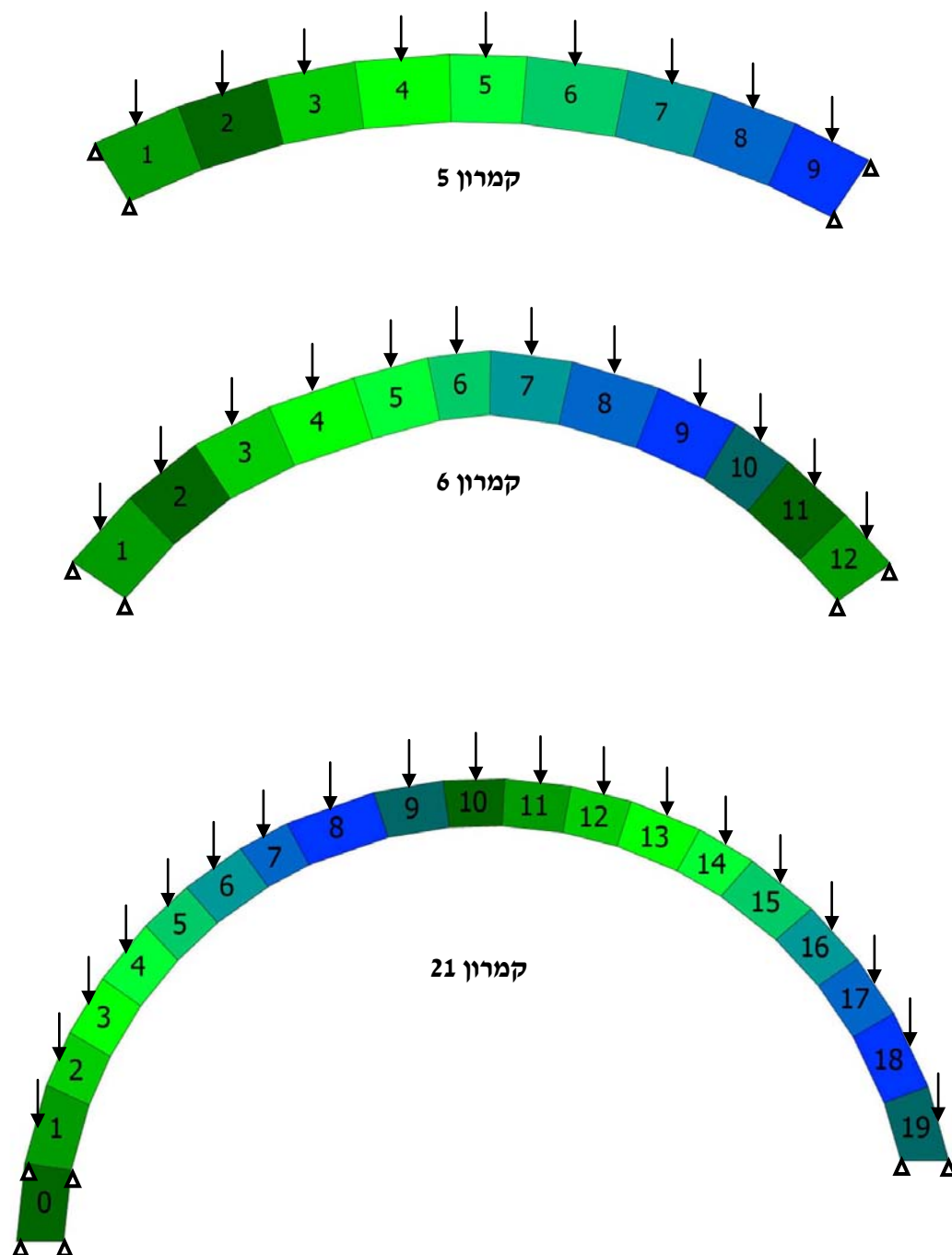
הרעידה המכונה "רעידה חלשה" היא רעידת אדמה שהתרחשה בנואיבה ב- 22 בנובמבר 1995. הרעידה נקלטה באילת על מילוי במרחק של כ- 70 ק"מ ממוקד הרעידה, כאשר המגניטודה $M_w=7.2$, תאוצת הקרקע האופקית המירבית $PGA=0.05g$, ותאוצת הקרקע האנכית המירבית $PGA=0.11g$. התאוצות שהוזנו לתוכנה הן אחרי דה קונבולוציה לתגובת הסלע שבוצעה ע"י (Zaslavsky and Shapira (2000). (תרשים 3.4-1)

הרעידה המכונה "רעידה חזקה" היא רישום סינטטי של רעידת אדמה המתאימה להעתק הסך-אנדריאס שהשתמשו בה לתכנון גשר המפרץ בסן פרנסיסקו (Law and Lam (2003, כאשר המגניטודה $M_w=8$ ותאוצת הקרקע האופקית והאנכית המירבית $PGA=0.7g$. (תרשים 3.4-2)

המודלים הורעדו תחת רכיב התאוצה האופקית בכיוון מזרח - מערב יחד עם רכיב התאוצה האנכית. יש לזכור כי תחזית ה- PGA לאזור ירושלים עפ"י התקן הישראלי ת"י 413, היא $0.125-0.15(g)$.



תרשים 3.4: תאוצות רעידות האדמה בכיוון מזרח-מערב ובכיוון האנכי. 1. נואיבה 1995 (רעידה חלשה).
2. רעידה סינטטית (רעידה חזקה)



תרשים 3.5 : שרטוט המודלים של שלושת הקמרונות

4. תוצאות

4.1. קמרון 5

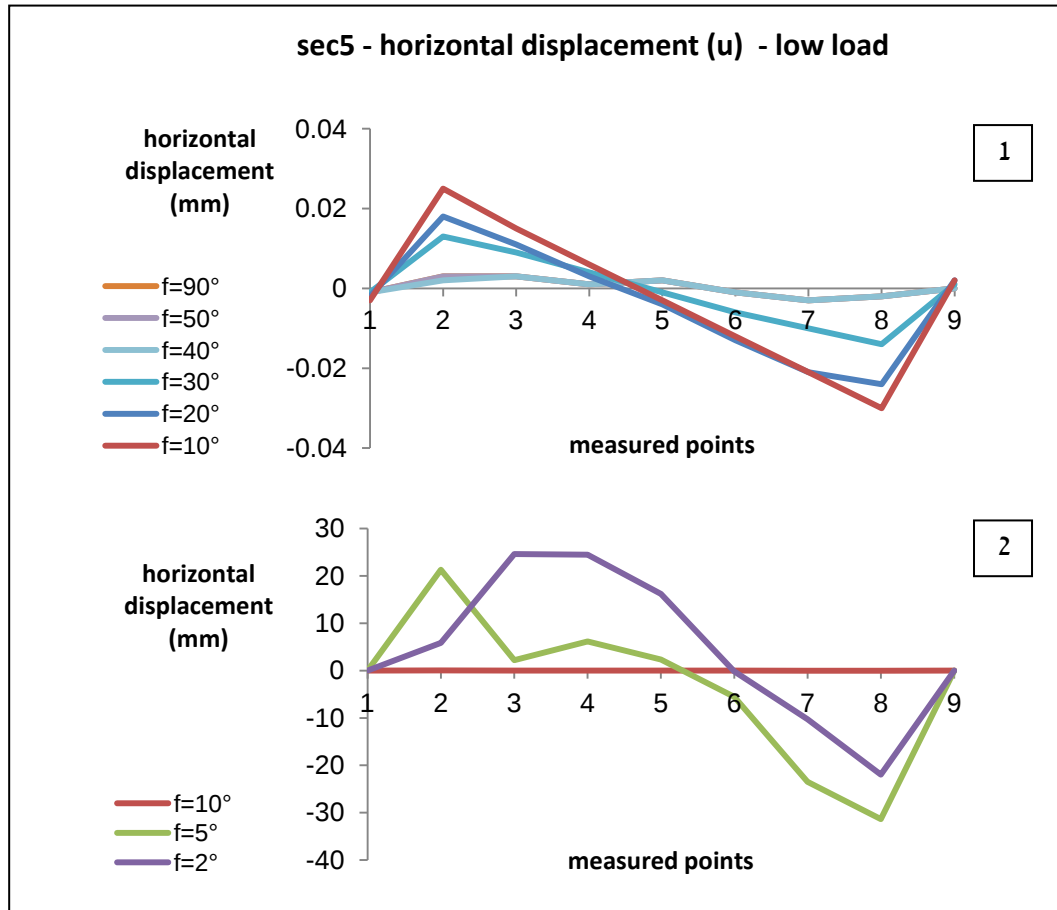
4.1.1. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך

הגרפים הבאים (תרשימים 4.1-4.5) מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר הפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים. טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=2^\circ-90^\circ$. יש לציין כי ישנם מצבים בהם הקמרון עבר דפורמציות גדולות מאד ואינו מתמוטט, אך סביר להניח שבמציאות קמרון עם דפורמציות כה גדולות לא יישאר יציב לאורך זמן.

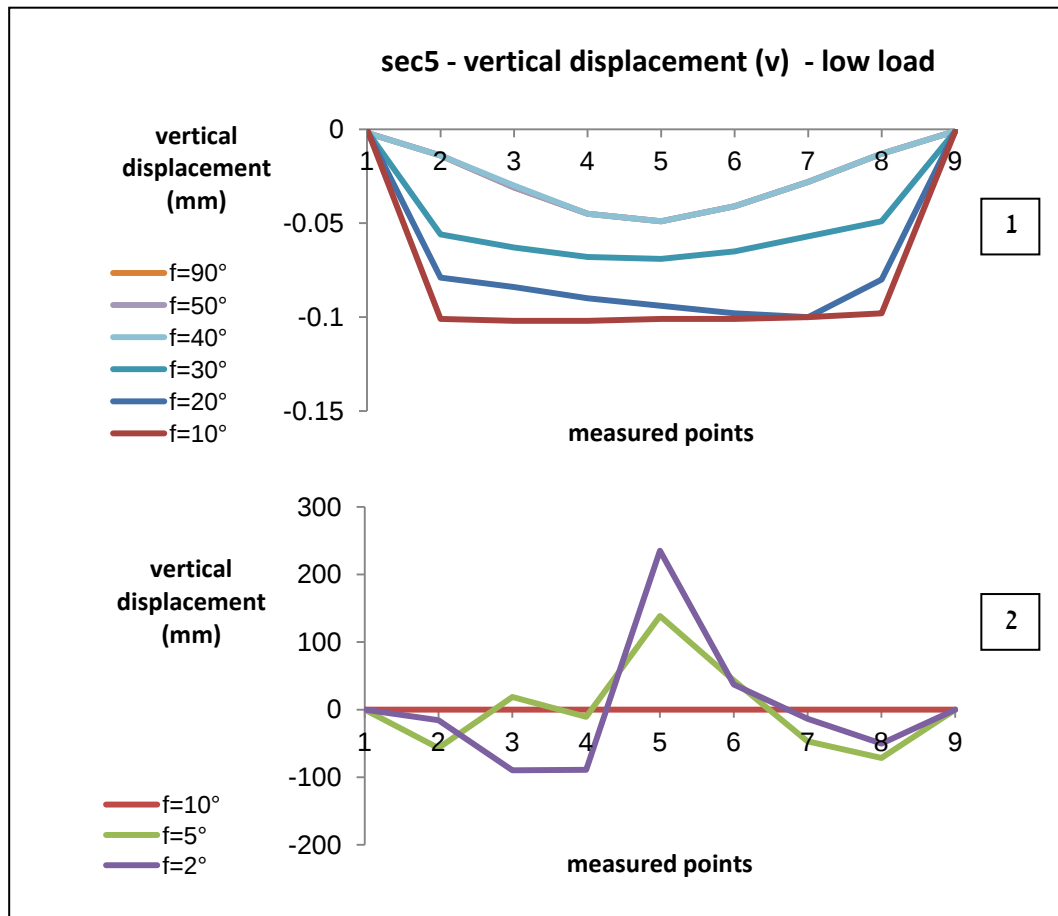
בזוויות $40^\circ-90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית ואין שינויים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

בזוויות $10^\circ-40^\circ$ החוקיות וסימטריית התזוזות והמאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות והמאמץ האופקי גדלים. המאמצים האנכיים ומאמצי הגזירה משתנים בערכים קטנים יחסית וללא חוקיות מסויימת.

בזוויות חיכוך הקטנות מ- 10° ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות באופן משמעותי. יחד עם זאת, נעלמת הסימטריה והחוקיות בהתנהגות התזוזות. החוקיות והסימטריה במאמצים נשמרת ויש שינוי משמעותי במאמץ האופקי, אך ללא חוקיות מסוימת. נראה כי כאשר מתרחשות התזוזות הגדולות, מאמצי הלחיצה האופקיים קצת קטנים.

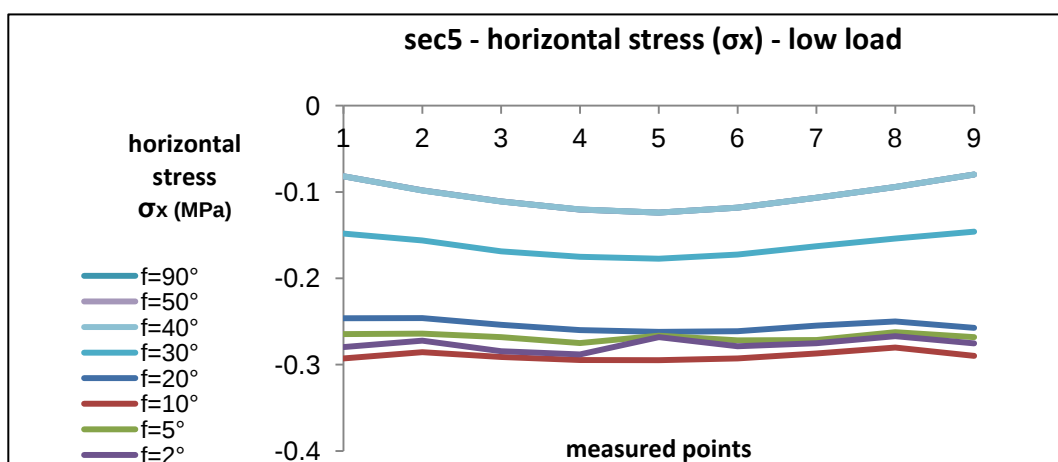


תרשים 4.1: גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 10° . 2. זווית חיכוך קטנות מ- 10° .

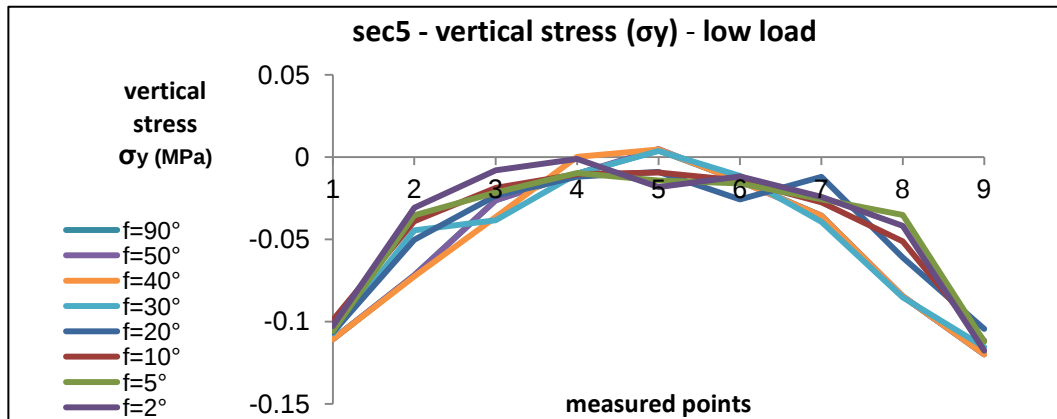


תרשים 4.2: גרף דפורמציה אנכית כנגד זוויות חיכוך. 1. זוויות חיכוך גדולות מ- 10° . 2. זוויות חיכוך קטנות מ- 10° .

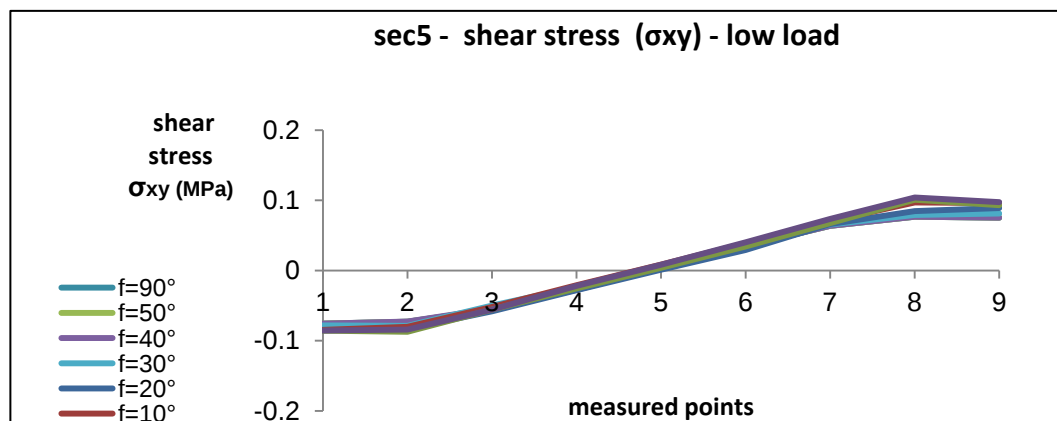
- התזוזה האופקית בזוויות חיכוך 2-5 גדולה באופן משמעותי ביותר מהתזוזות בזוויות חיכוך הגדולות מעשר מעלות ומגיעה לתזוזה של 31 מ"מ בבלוק 8. בזוויות הגדולות מעשר מעלות התזוזות אינן משמעותיות וקטנות מ-0.03 מ"מ.
- התזוזה המקסימלית האנכית מתרחשת בבלוק 5 בזווית חיכוך של 2° מעלות והיא עולה כלפי מעלה כ-235 מ"מ. בזוויות הגדולות מעשר מעלות התזוזות כולן כלפי מטה וקטנות מ-0.1 מ"מ.



תרשים 4.3: גרף המאמץ האופקי כנגד זווית החיכוך



תרשים 4.4: גרף המאמץ האנכי כנגד זווית החיכוך



תרשים 4.5: גרף מאמץ הגזירה כנגד זווית החיכוך

- ניתן לראות בתרשימים 4.2-4.5 כי כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים והמאמץ האנכי והגזירה המקסימלי מתפתח בבלוקי הקיצוניים ומתאפס במרכז הקמרון.

4.1.2 השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך

התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

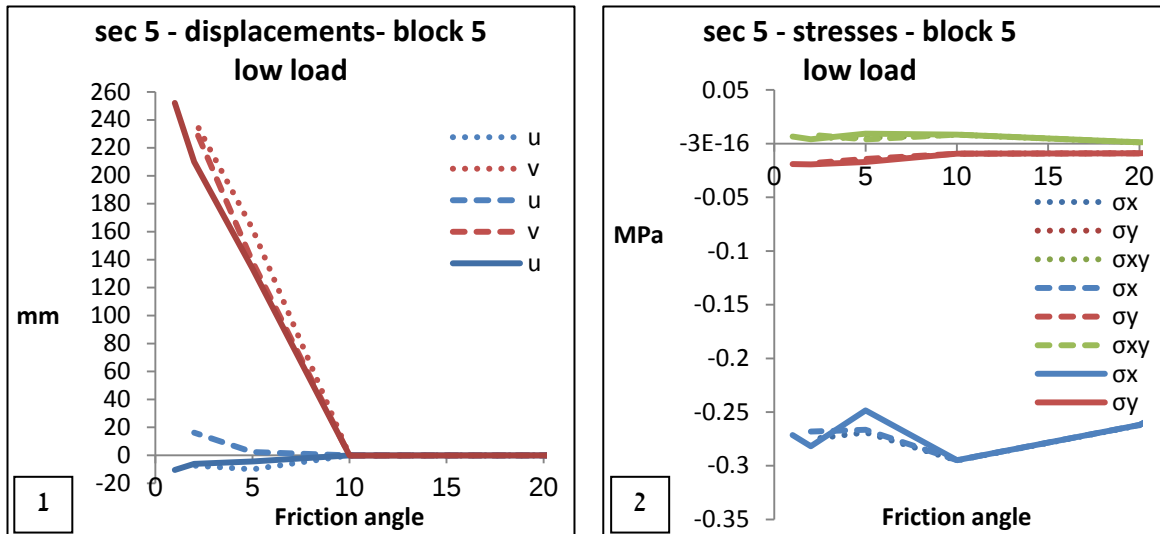
טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס ברעידה החלשה הוא $f=1^{\circ}-90^{\circ}$, וברעידה החזקה $f=2^{\circ}-90^{\circ}$.

מבחינת התוצאות נראה שהתייצבות הקמרון מיד בסוף הרעידה קרובה מאד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה והגרפים של תוצאות התזוזות והמאמצים דומים מאד לגרפים שראינו בסעיפים האחרונים עם שינויים קלים.

ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו עם הרעידות קשורים ביכולת העמידה של הקמרון בזווית חיכוך הנמוכה ביותר ובשינויים בערכי וכיווני התזוזות בזווית החיכוך הקטנות.

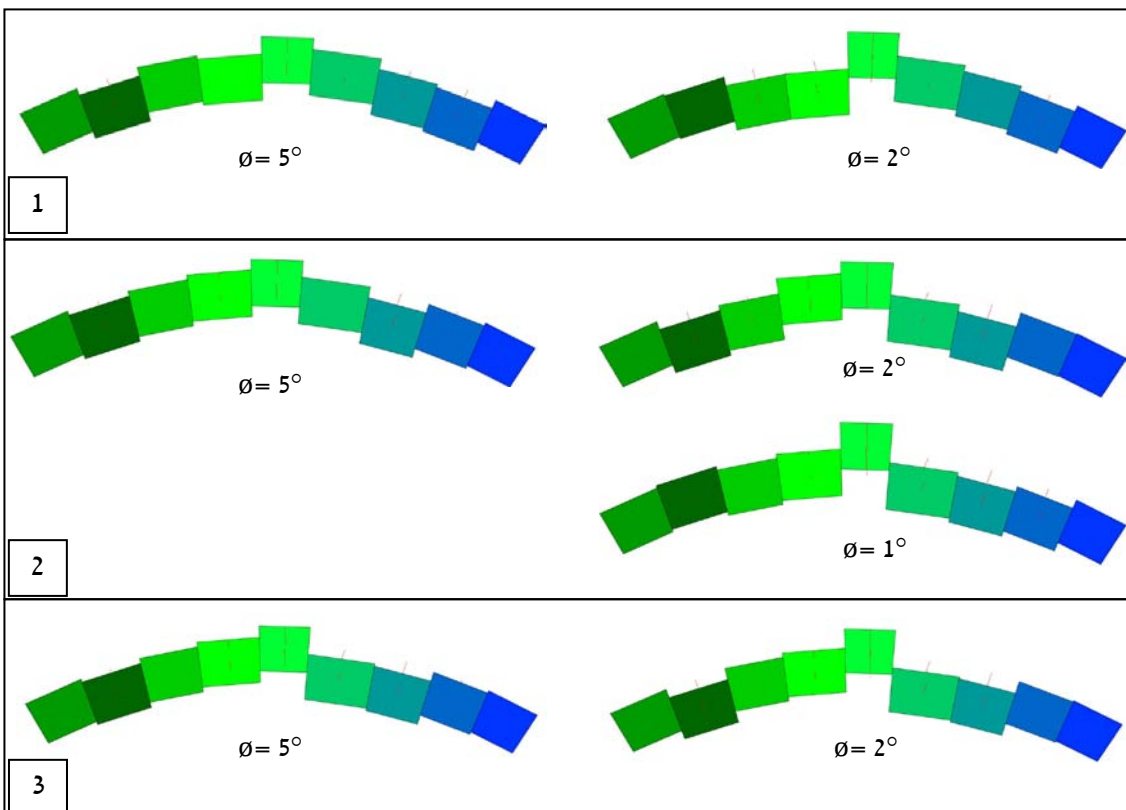
נסכם את התוצאות באמצעות הגרפים הבאים (תרשים 4.6) שמראים את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 5 (בלוק המפתח), בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידות אדמה.

נראה את השתנות התזוזות והמאמצים רק בזווית החיכוך הקטנות בהם נראים שינויים כתוצאה מפעילות רעידות האדמה.



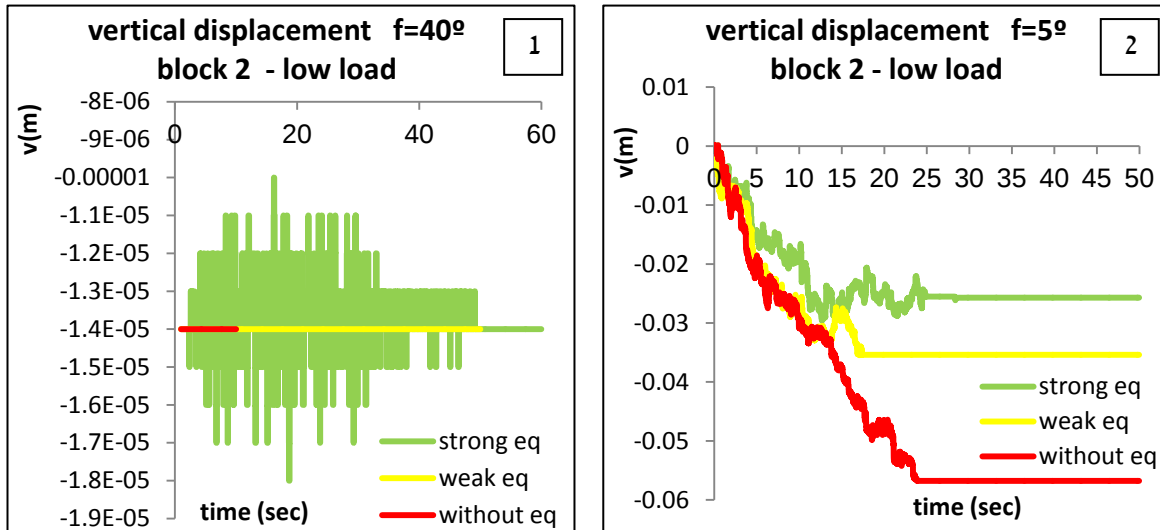
תרשים 4.6: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

תרשים 4.6 מהווה מעין סיכום לתזוזות המאמצים המתפתחים בבלוקים, כאשר מופעלים על הקמרון העומסים הנמוכים, וניתן לראות כי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, אינן גורמות לשינוי בתזוזות ובמאמצים המתפתחים בבלוקים בזווית חיכוך הגדולות מ- 10° , בעוד שבזווית חיכוך הקטנות מ- 10° נראים פערים קטנים בערכי המאמצים ופערים משמעותיים יותר, אך ללא חוקיות מסויימת, בתזוזות. בתרשים 4.7 ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות בזווית חיכוך הקטנות ביותר בהן הקמרון נותר יציב ואינו קורס, בשינוי מצב רעידת האדמה.

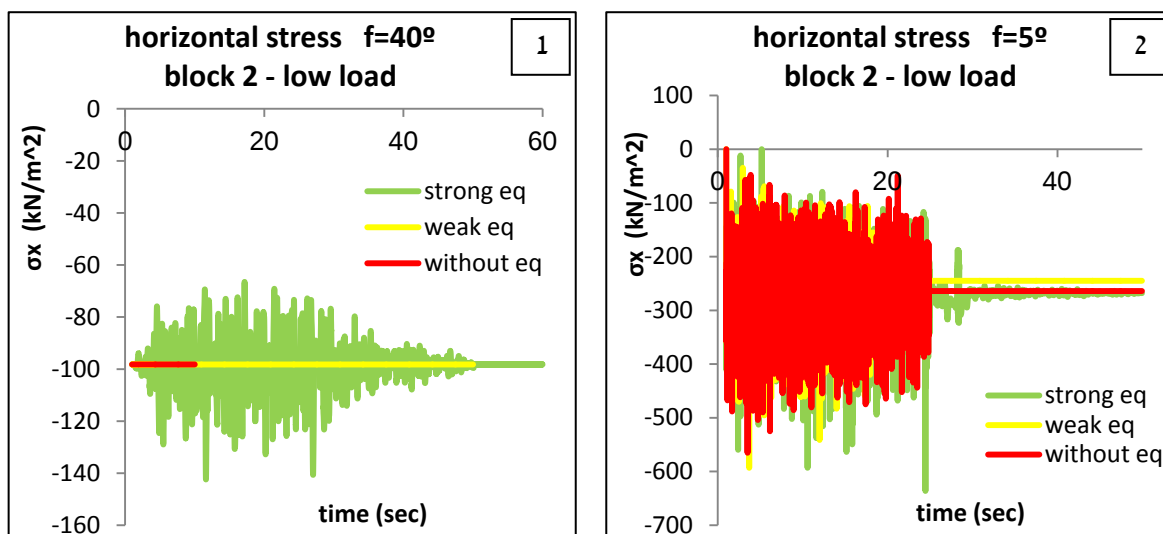


תרשים 4.7: תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט. 1. ללא הפעלת רעידת אדמה. 2. לאחר רעידת אדמה חלשה. 3. לאחר רעידת אדמה חזקה.

יש לזכור כי התוצאות הנ"ל מתייחסות למאמצים ולתזוזות הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשינויים במאמצים ובתזוזות המתרחשים תוך כדי פעילות רעידת האדמה. בגרפים הבאים (תרשימים 4.8-4.9) נראה את השינויים המתרחשים במאמצים האופקיים ובתזוזות האנכיות בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית חיכוך של 5° ו- 40° .



תרשים 4.8: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 5°



תרשים 4.9: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 5°

ניתן לראות כי בזמן פעילות רעידת האדמה בזווית חיכוך גדולות אין הבדל משמעותי בין מצב המאמצים והתזוזות ללא רעידת אדמה לבין מצב המאמצים בהפעלת רעידת אדמה חלשה, וכי בשני המקרים הקמרון מתייצב מיד, בניגוד למצב המאמצים בהפעלת הרעידה החזקה, בו יש שינויים משמעותיים במאמצים ובתזוזות המתפתחים בבלוקי האבן תוך כדי הרעידה, ורק בסוף פעילות הרעידה מצב המאמצים מתייצב. כשהמאמצים והתזוזות מתייצבים בסוף פעילות הרעידה החזקה, הם מתייצבים על ערכים כמעט זהים למצב ללא הרעידה ועם הרעידה החלשה, מלבד בזווית חיכוך של 5° בה ערכי התזוזות הסופיות שונות משמעותית בכל מצב.

עוד ניתן לראות כי בזווית חיכוך קטנות מאד, לוקח זמן לקמרון להתייצב והבלוקים חווים שינויי מאמצים ותזוזות משמעותיים עד להתייצבות בשנייה ה- 25, ללא קשר לרעידת האדמה. אם כי נראה שעדיין לקמרון לוקח קצת יותר זמן להתייצב במצב של רעידה חזקה.

4.1.3. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה

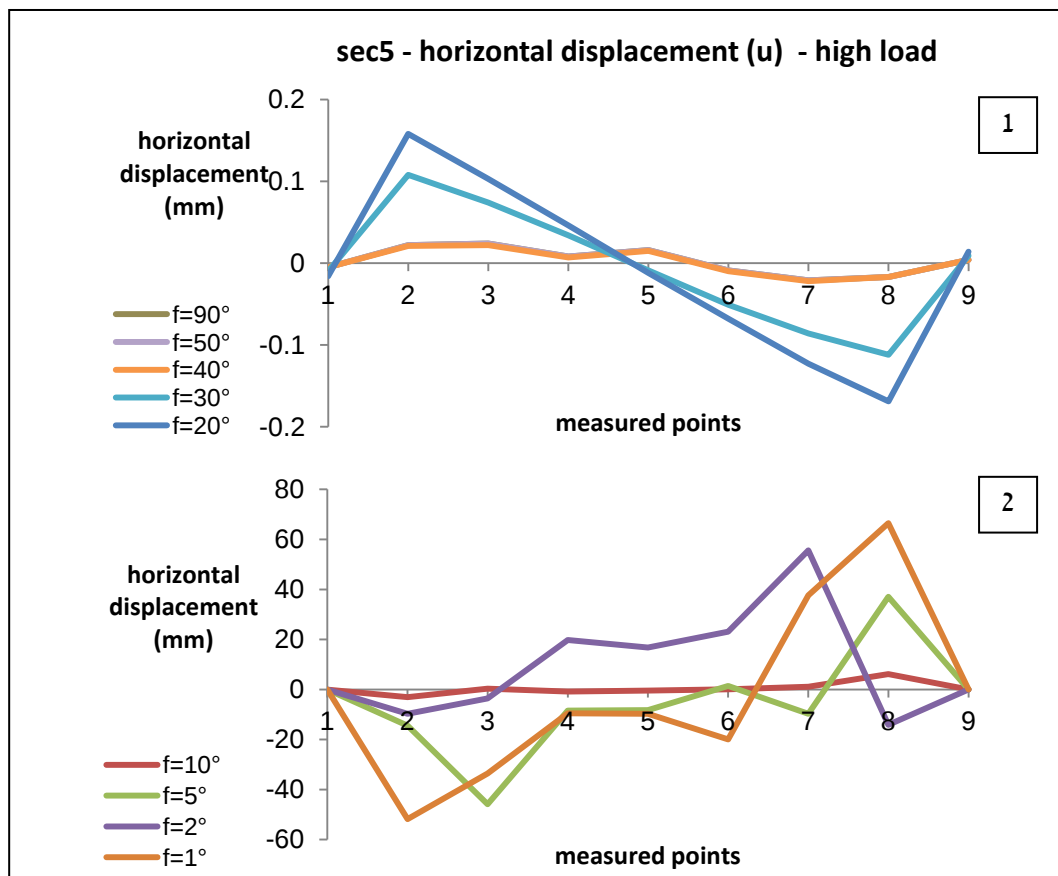
הגרפים הבאים (תרשימים 4.10-4.12) מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר הפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים.

טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=1^\circ-90^\circ$, אך יש לציין כי ישנם מצבים בהם במודל הקמרון עבר דפורמציות גדולות מאד ואינו מתמוטט, אך סביר להניח שבמציאות קמרון עם דפורמציות כה גדולות לא ישאר יציב לאורך זמן.

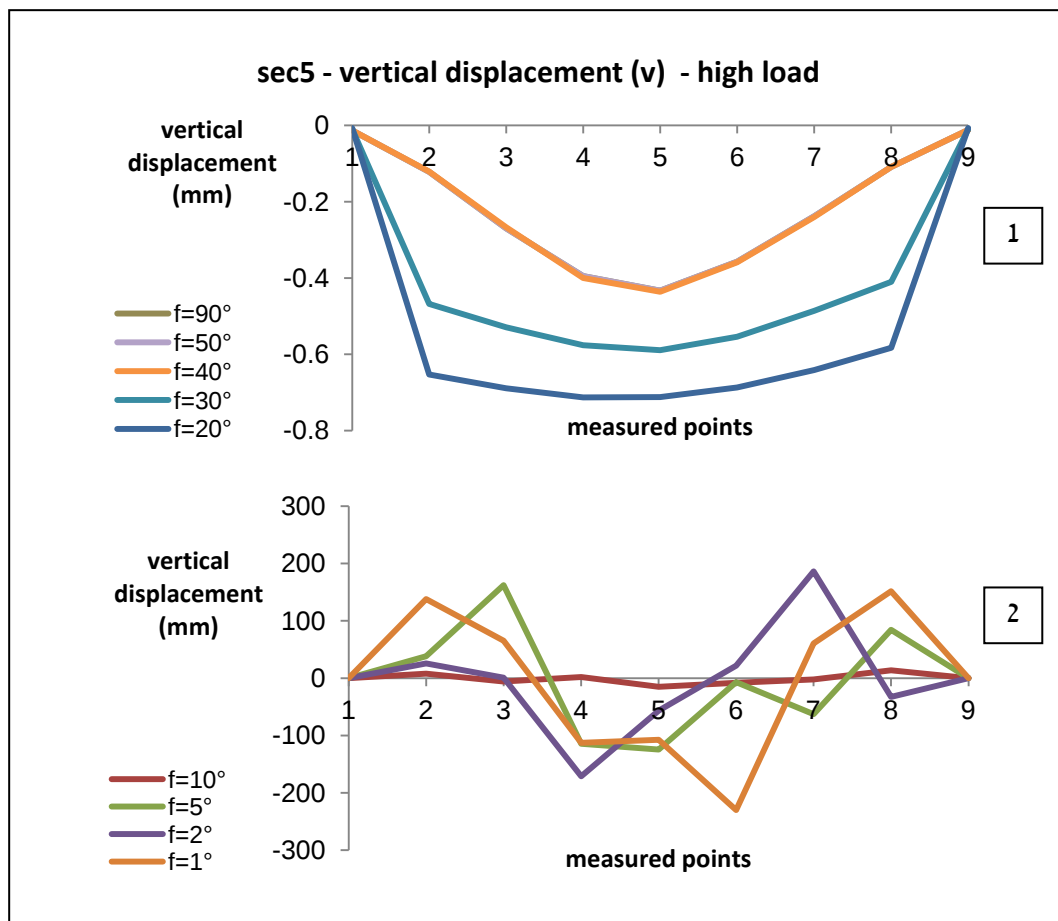
בזוויות $40^\circ-90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית ואין שינויים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

בזוויות $20^\circ-40^\circ$ החוקיות וסימטריית התזוזות והמאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות והמאמץ האופקי גדלים. המאמצים האנכיים ומאמצי הגזירה משתנים בערכים קטנים יחסית וללא חוקיות מסויימת.

בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות באופן משמעותי. יחד עם זאת, נעלמת הסימטריה והחוקיות בהתנהגות התזוזות. החוקיות והסימטריה במאמצים נשמרת ויש שינוי משמעותי במאמץ האופקי, אך ללא חוקיות מסוימת.



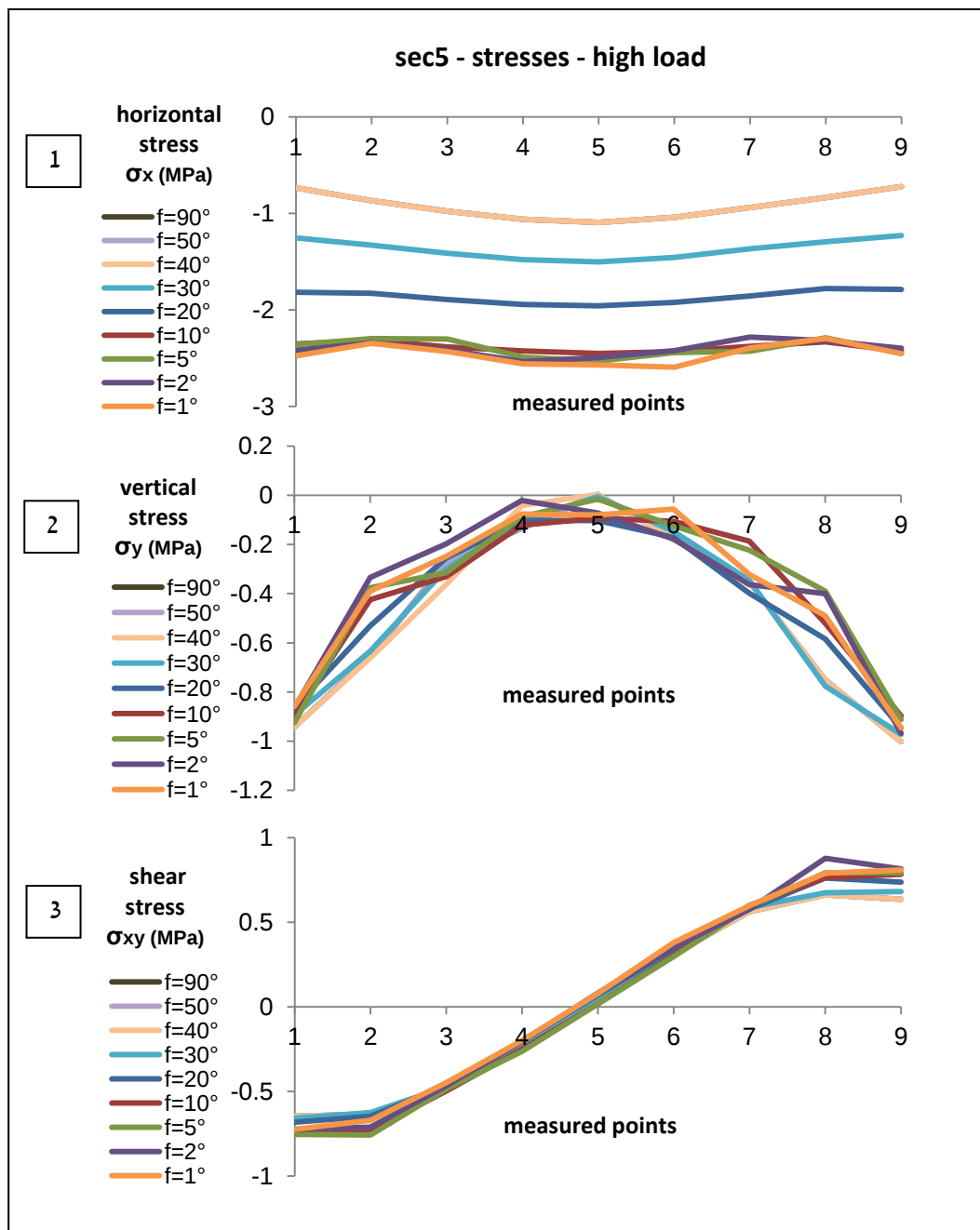
תרשים 4.10: גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 20° . 2. זווית חיכוך קטנות מ- 10° .



תרשים 4.11: גרף דפורמציה אנכית כנגד זוויות חיכוך. 1. זוויות חיכוך גדולות מ-20°. 2. זוויות חיכוך קטנות מ-10°

- התזוזה האופקית בזוויות חיכוך הקטנות מ-10° גדולה באופן משמעותי מהתזוזות בזוויות חיכוך הגדולות מ-20° ומגיעה לתזוזה של 66 מ"מ בבלוק 8. בטווח זה אין חוקיות ברורה בשינויי הכיוון והגודל של התזוזות האופקיות. בזוויות הגדולות מעשרים מעלות התזוזות אינן משמעותיות וקטנות מ-0.17 מ"מ.

- בזוויות 10°-1° הבלוקים הקיצוניים עולים למעלה והאמצעיים שוקעים וערכיהם גדולים משמעותית מערכי התזוזה בזוויות 20°-90°. התזוזה האנכית המקסימלית מתרחשת בבלוק 6 בזווית חיכוך של 1° מעלות והיא יורדת כלפי מטה כ-230 מ"מ. בזוויות הגדולות מעשרים מעלות התזוזות כולן כלפי מטה וקטנות מ-0.7 מ"מ.



תרשים 4.12 : גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה

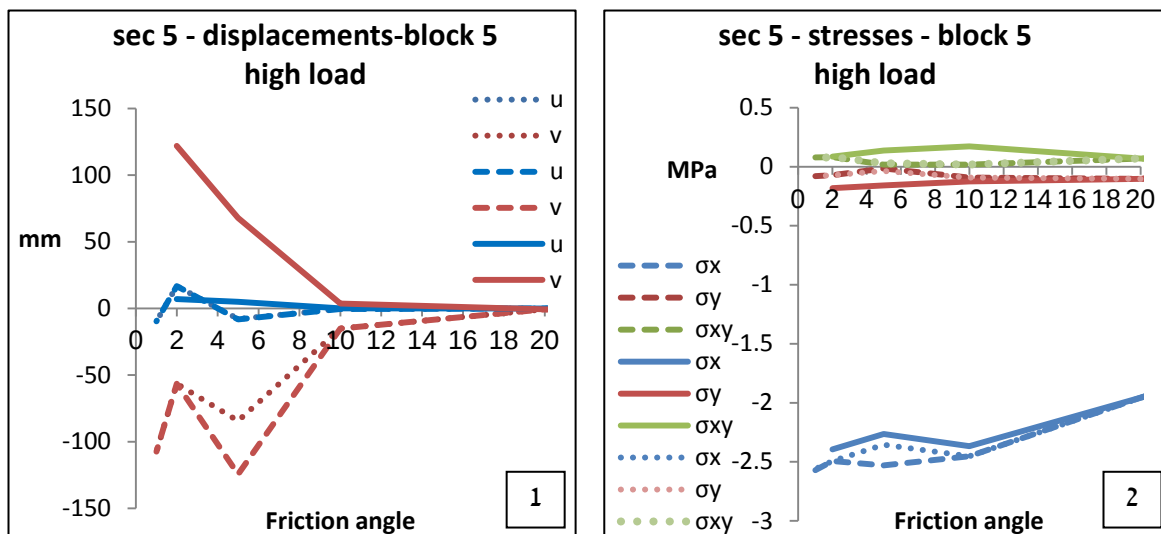
כפי שניתן לראות בתרשים 4.12, כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים והמאמץ האנכי והגזירה המקסימלי מתפתח בבלוקי הקיצוניים ומתאפס במרכז הקמרון.

4.1.4. השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה

התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

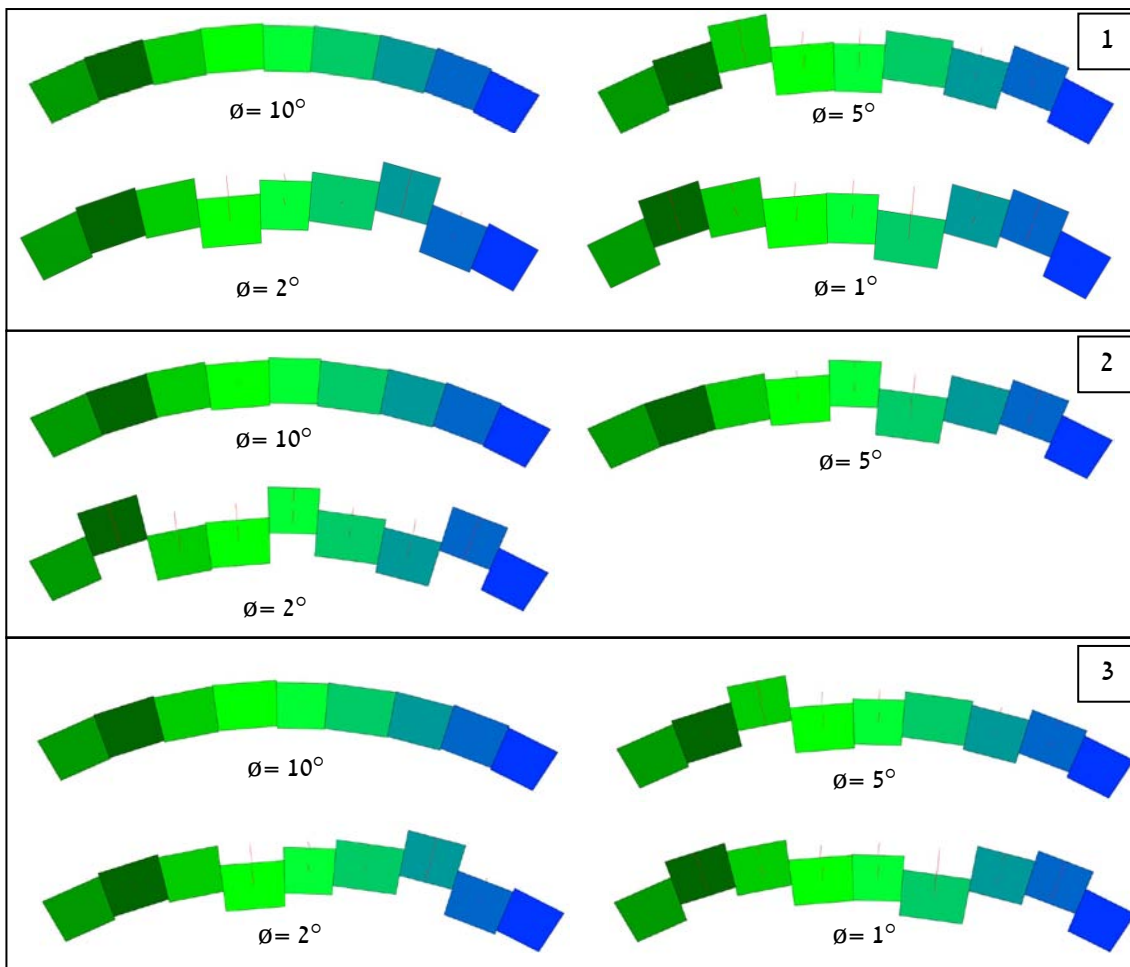
טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס ברעידה החלשה הוא $f=2^\circ-90^\circ$, וברעידה החזקה $f=1^\circ-90^\circ$. מבחינת התוצאות נראה שמצב הקמרון בהתייבבותו מיד בסוף שתי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, קרוב מאד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה, והגרפים של תוצאות התזוזות והמאמצים דומים מאד לגרפים שראינו בסעיפים הקודמים. ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו בסוף הרעידות, קשורים ליכולת העמידה של הקמרון גם בזווית החיכוך הנמוכה ביותר ובשינויים בערכי וכיווני התזוזות בזווית החיכוך הקטנות.

נסכם את התוצאות באמצעות תרשים 4.13 שמציג את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 5 (בלוק המפתח), בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידות אדמה. נראה את השתנות התזוזות והמאמצים רק בזווית החיכוך הקטנות בהם נראים שינויים כתוצאה מפעילות רעידות האדמה.



תרשים 4.13: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 5. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

ניתן לראות כי כאשר משווים בין המאמצים והתזוזות הפועלים על הבלוקים ללא הפעלת רעידת אדמה לבין המאמצים והתזוזות הפועלים על הבלוקים עם הפעלת רעידות האדמה, ישנה השפעה לרעידת אדמה רק בזווית חיכוך הקטנות מעשרים מעלות ועיקר השינוי מתרחש בתזוזות. בתרשים 4.14 ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות בזווית החיכוך הקטנות ביותר בהן הקמרון נותר יציב ואינו קורס, בשינוי מצב רעידת האדמה.



תרשים 4.14: תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט. 1. ללא הפעלת רעידת אדמה. 2. לאחר רעידת אדמה חלשה. 3. לאחר רעידת אדמה חזקה.

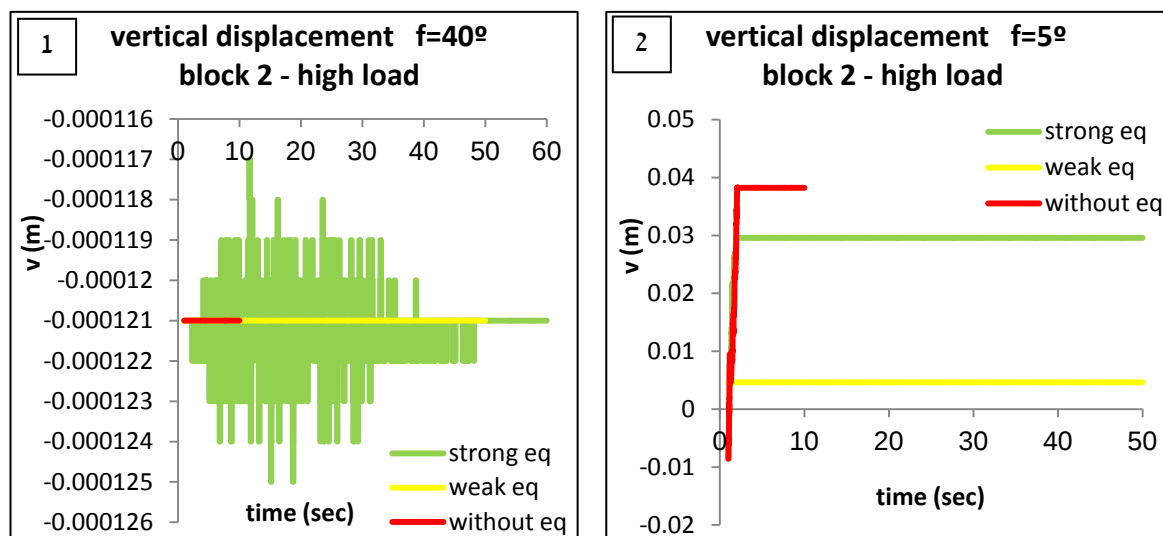
יש לזכור כי התוצאות בתרשימים 4.13-4.14 מתייחסות למאמצים ולתזוזות הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשינויים במאמצים ובתזוזות המתרחשים תוך כדי פעילות רעידות האדמה.

בגרפים הבאים (תרשימים 4.15-4.16) נראה את השינויים המתרחשים במאמצים האופקיים ובתזוזות האנכיות בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית חיכוך של 40° ו- 5° .

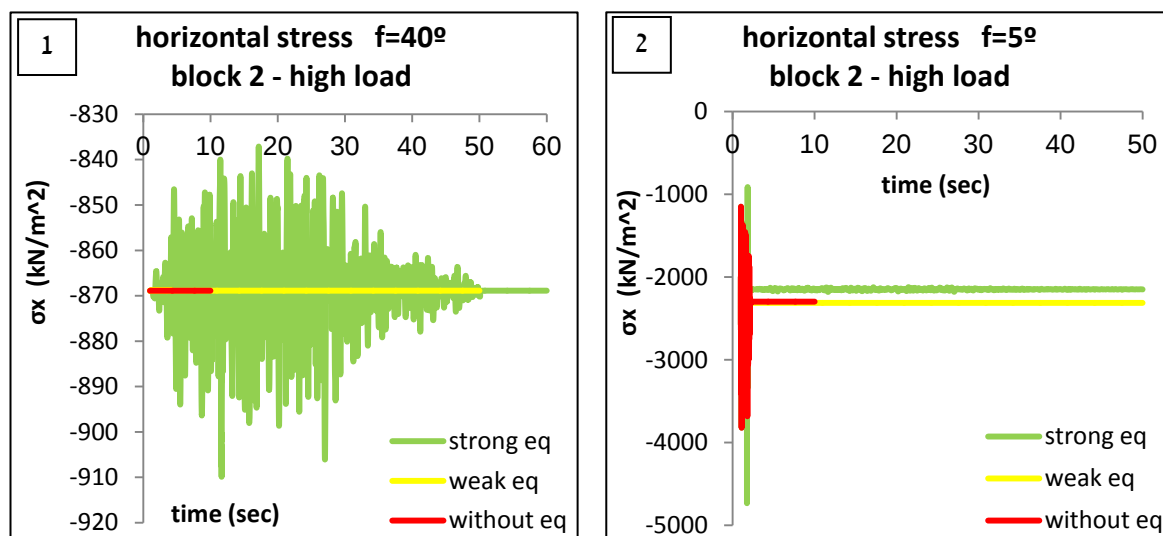
ניתן לראות כי בזמן פעילות רעידת האדמה בזווית חיכוך של ארבעים מעלות אין הבדל משמעותי בין מצב התזוזות והמאמצים ללא רעידת אדמה לבין מצב המאמצים בהפעלת רעידת אדמה חלשה, וכי בשני המקרים הקמרון מתייצב מיד, בניגוד למצב המאמצים והתזוזות בהפעלת הרעידה החזקה, בו יש שינויים משמעותיים במאמצים ובתזוזות המתפתחים בבלוקי האבן תוך כדי הרעידה, ורק בסוף פעילות הרעידה מצב המאמצים מתייצב ומתנהג בדומה למצב המאמצים ללא רעידה או עם רעידה חלשה.

בזווית חיכוך של חמש מעלות התנהגות המאמצים משתנה, אמנם המאמצים ללא רעידה ועם רעידה חלשה מתייצבים מהר מאוד, אך ערכיהם שונים לחלוטין, ונראה כי ערכי המאמצים לקראת סוף הרעידה החזקה קרוב יותר לערכי המאמצים ללא רעידה מאשר למצב המאמצים בהפעלת רעידת אדמה חלשה.

ניתן לראות כי בזווית חיכוך קטנות מאד, הבלוקים חווים שינויי תזוזות ומאמצים מאד גדולים בשניות הראשונות, ללא קשר לרעידת האדמה, ולכן שינויי המאמצים והתזוזות המתרחשים בהמשך כמעט ואינם נראים.



תרשים 4.15: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 5° .



תרשים 4.16: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 5° .

4.1.5. מסקנות

בכל מצבי העמיסה ובכל מצבי רעידות האדמה שינוי זווית החיכוך לא גורם לשינויים בערכי התזוזות והמאמצים בזווית חיכוך הגדולות מ- 40° . מתחת ל- 40° מעלות נראה כי ככל שזווית החיכוך קטנה, התזוזות גדלות ובהתאמה גם המאמץ האופקי. בזווית אלה ישנם גם שינויים קטנים במאמץ האנכי ובמאמץ הגזירה ביחס הפוך, כאשר המאמץ האנכי יורד מאמץ הגזירה עולה ולהיפך. בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° אין חוקיות ברורה בשינוי ערכי התזוזות והמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

נראה כי לרעידות האדמה יש השפעה על התזוזות והמאמצים המתרחשים בבלוקים רק בשינויי המאמצים והתזוזות תוך כדי הרעידה החזקה או בזווית חיכוך מאד קטנות.

ראינו בסעיפים הקודמים, הנוגעים לקמרון מס' 5, כי לרעידות האדמה יש השפעה על התזוזות והמאמצים המתרחשים בבלוקים רק בזווית חיכוך מאד קטנות, והשינויים המשמעותיים מתרחשים בעקבות שינויי העומסים. אך גם שינויים אלה אינם גורמים לחוקיות שונה בהתנהגות המאמצים והתזוזות, אלא בערכי המאמצים.

נסכם את ההבדלים המשמעותיים בין שני מצבי העמיסה מיד בסיום פעילות רעידות האדמה, כאשר העומסים הנקודתיים על הבלוקים במצב העמיסה הגבוה גדולים בממוצע פי 12.8 מאשר במצב העמיסה הנמוך.

0 המאמצים האופקיים, האנכיים ומאמצי הגזירה המקסימליים המתפתחים בבלוקים במצב עמיסה גבוה, גדולים בממוצע פי 8-9 ממצב העמיסה הנמוך.

0 במצב של עומסים גבוהים, נראות תזוזות משמעותיות כבר בזווית חיכוך של 10° , בשונה ממצב עמיסה נמוך שם את התזוזות רואים רק בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° .

0 התזוזות ההאופקיות והאנכיות של הבלוקים בזווית חיכוך הגדולה מ- 10° גדולות יותר במצב עמיסה גבוה, כאשר מתחת ל- 10° , אין חוקיות מסויימת.

מאמצי הלחיצה המקסימליים הנוצרים במרכזי הבלוקים אינם מתקרבים לתסבולת הלחיצה של אבני הקמרון ומגיעים למאמץ לחיצה מקסימלי של 6 מגפ"ס.

בשל הגיאומטריה השטוחה של הקמרון, מאמצי הלחיצה האופקיים כמעט שווים לחלוטין בכל הבלוקים וגורמים לעומס אופקי גבוה מאד על הקירות האנכיים עליהם נסמך הקמרון. בנוסף, מאמצי הלחיצה האופקיים המקסימליים המתפתחים במרכזי הבלוקים גדולים בערך פי 2.5 ממאמצי הלחיצה האנכיים המקסימליים.

4.2. קמרון 6

4.2.1. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך

הגרפים הבאים מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר והפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים. (תרשימים 4.17-4.19)

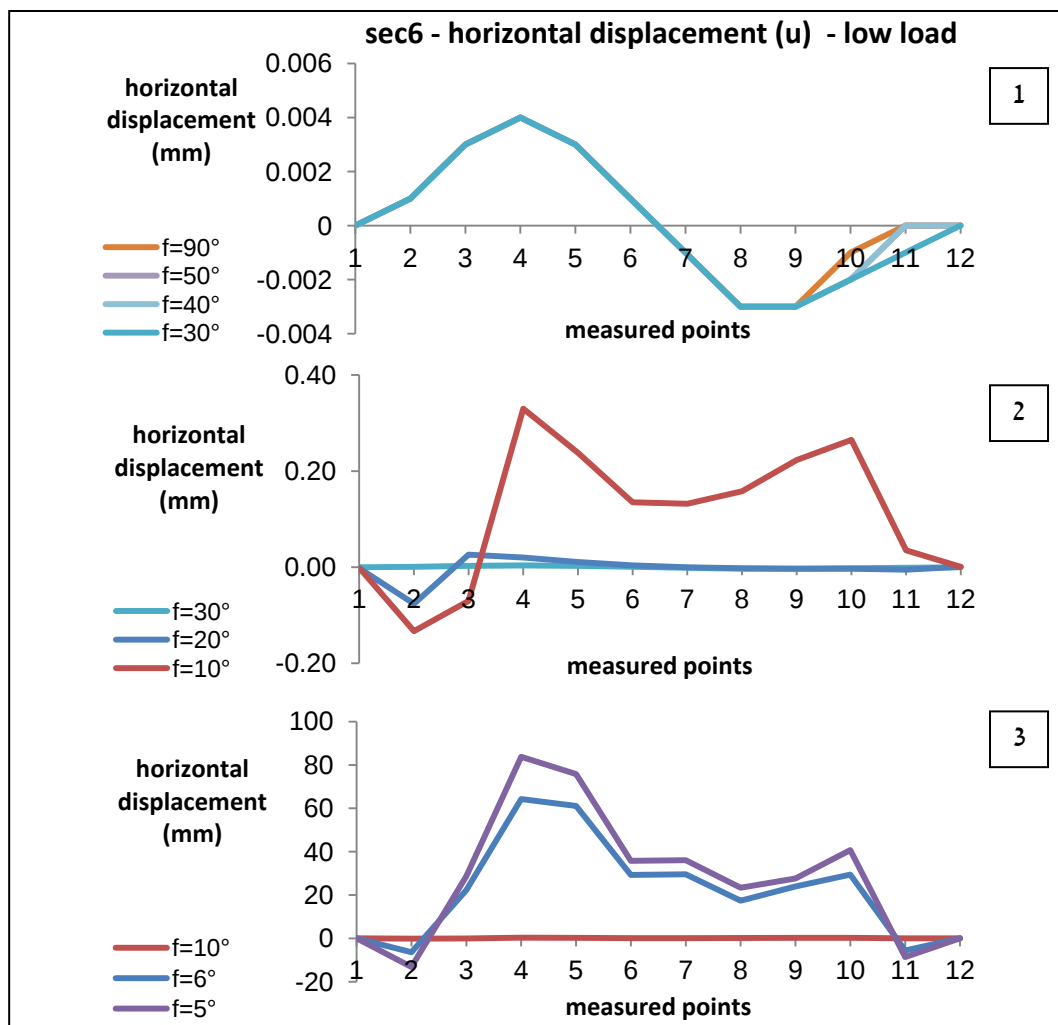
טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=5^\circ-90^\circ$.

יש לציין כי ישנם מצבים בהם במודל הקמרון עבר דפורמציות גדולות מאד ואינו מתמוטט, אך סביר להניח שבמציאות קמרון עם דפורמציות כה גדולות לא יישאר יציב לאורך זמן.

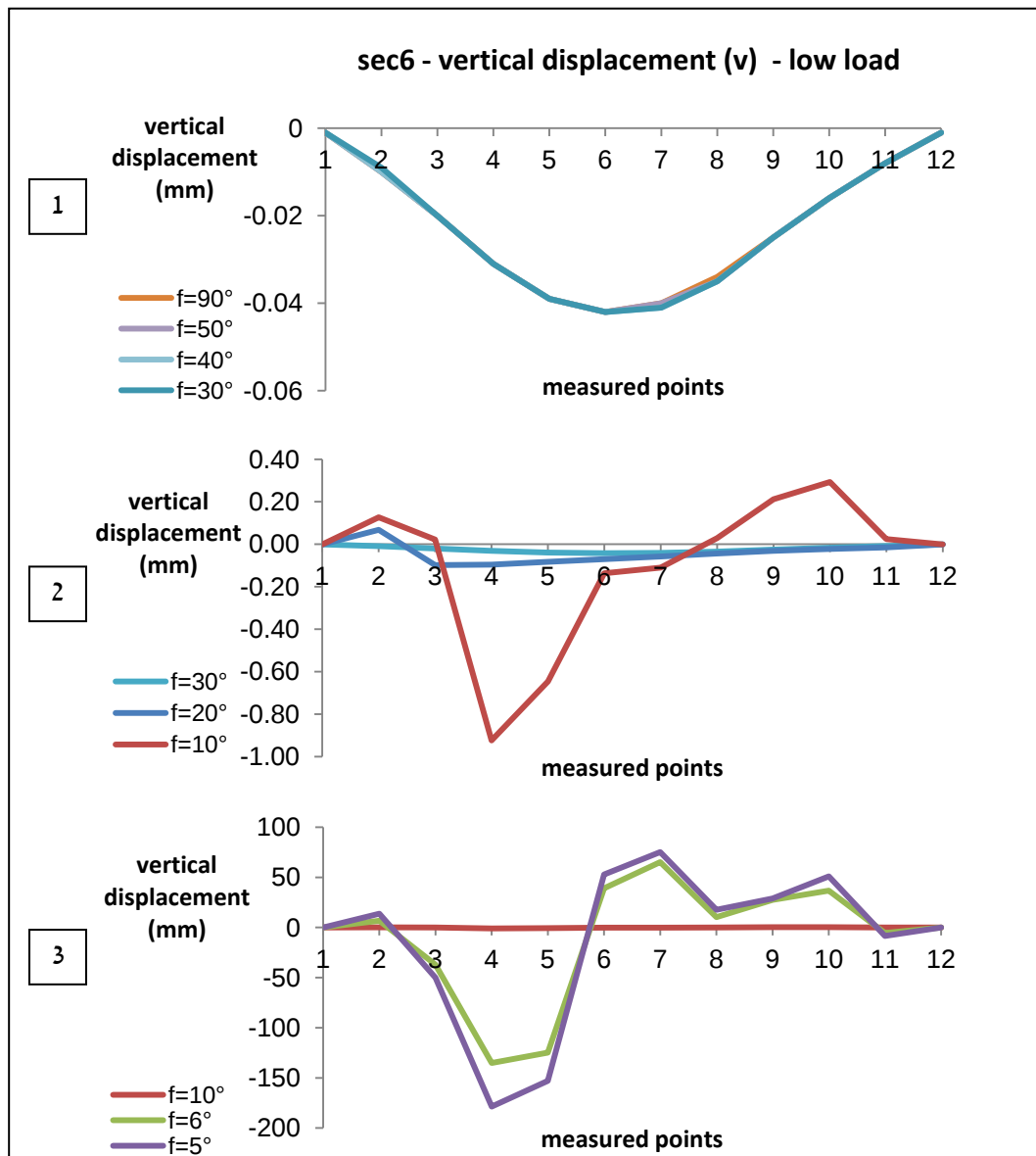
בזוויות $30^\circ-90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית וישנם שינויים מינוריים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

בזוויות $20^\circ-30^\circ$ החוקיות וסימטריית המאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה וישנה גדילה משמעותית במאמץ האופקי ושינויים קלים יותר במאמץ הגזירה שגדל בבלוקים הקיצוניים ובמאמץ האנכי שגדל מעט בבלוקים המרכזיים. התזוזות גדלות באופן משמעותי ומאבדות את הסימטריה והחוקיות הקיימת בזווית חיכוך גדולות יותר.

בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות באופן משמעותי. יחד עם זאת, נעלמת הסימטריה והחוקיות בהתנהגות התזוזות. החוקיות והסימטריה במאמצים נשמרת וישנם שינויים קלים במאמצים, אך ללא חוקיות מסוימת.

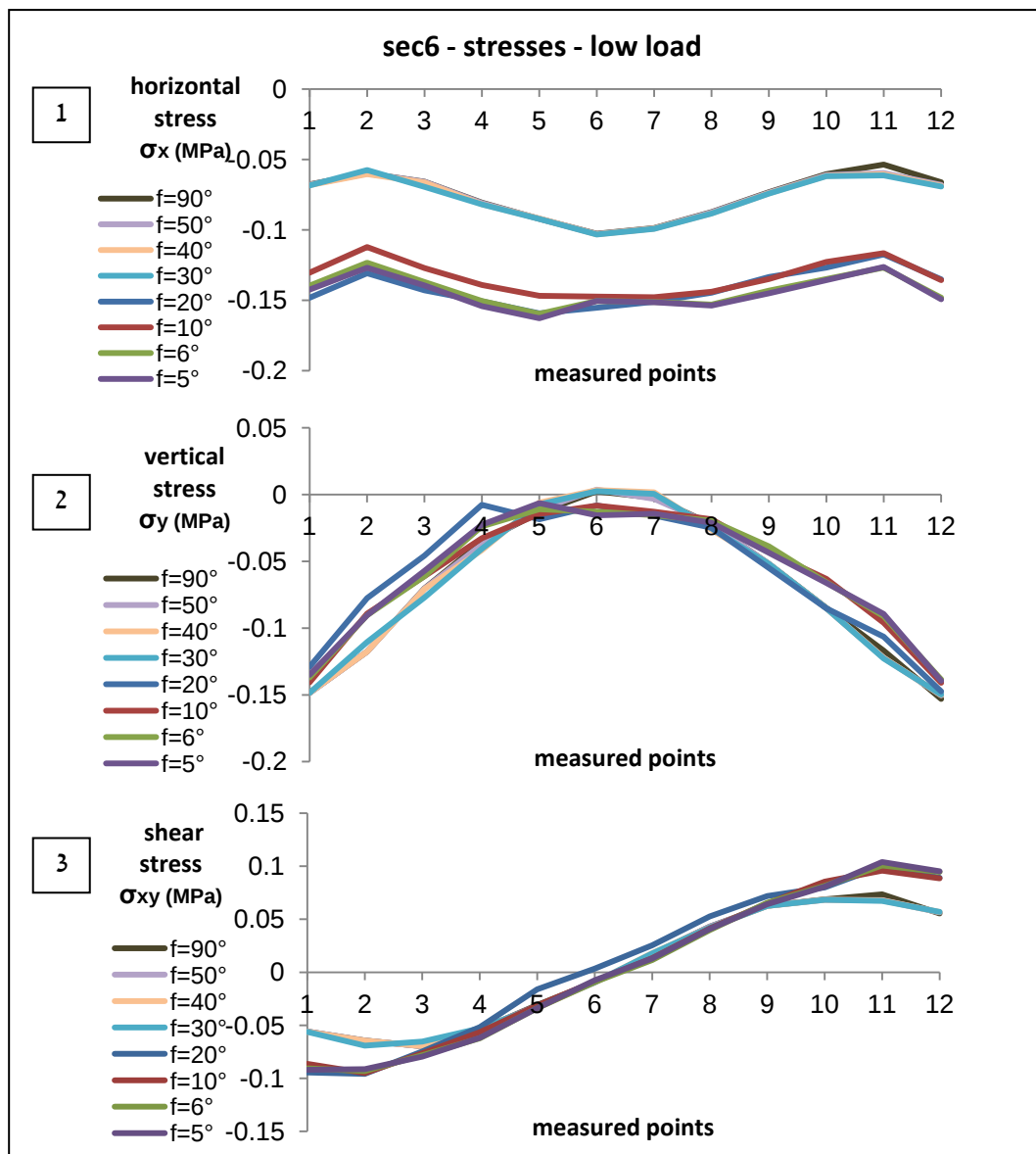


תרשים 4.17: גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 30° . 2. זווית חיכוך $10^\circ-30^\circ$. 3. זווית חיכוך קטנות מ- 10° .



תרשים 4.18: גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 30° . 2. זווית חיכוך 30° - 10° . 3. זווית חיכוך קטנות מ- 10° .

- התזוזה האופקית בזווית חיכוך 5-6 גדולה באופן משמעותי ביותר מהתזוזות בזווית חיכוך הגדולות מעשר מעלות ומגיעה לתזוזה של 84 מ"מ בבלוק 4 בזווית חיכוך של 5° . בזווית הגדולות מעשר מעלות התזוזות אינן משמעותיות וקטנות מ-0.3 מ"מ.
- בזווית חיכוך הקטנות מ- 30° אין חוקיות ברורה וחלק מהבלוקים אף עולים כלפי מעלה. התזוזה המקסימלית מתרחשת בבלוק מס' 4 בזווית חיכוך של 5° והיא יורדת כלפי מטה 179 מ"מ.



תרשים 4.19: גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה

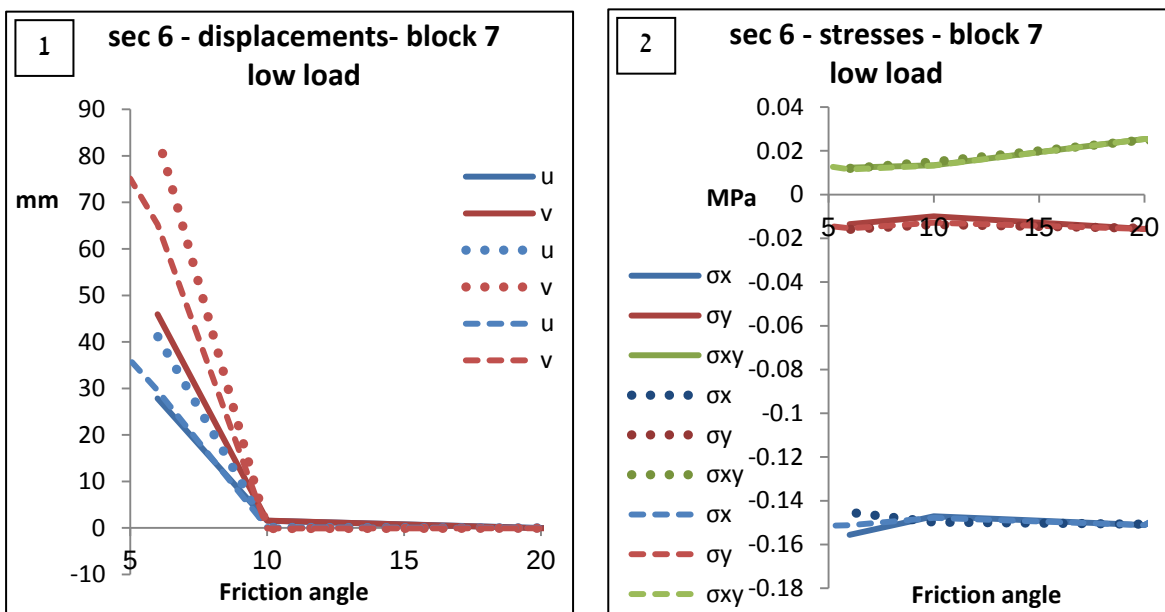
- ניתן לראות כי כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים ומאמץ הגזירה והמאמץ האנכי מקסימליים בבלוקים הקיצוניים.
- במרכז הקמרון שינוי זווית החיכוך כמעט ולא משפיע על מאמצי הגזירה. בעוד שבשלושת הבלוקים הקיצוניים מכל צד הקטנת זווית החיכוך מגדילה את מאמץ הגזירה עד פי 2.

4.2.2. השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך

התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס בשתי הרעידות הוא $f=6^\circ-90^\circ$. מבחינת התוצאות נראה שהתייצבות הקמרון מיד בסוף הרעידה קרובה מאוד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה והגרפים של תוצאות התזוזות והמאמצים דומים מאוד לגרפים שראינו בסעיפים האחרונים עם שינויים קלים.

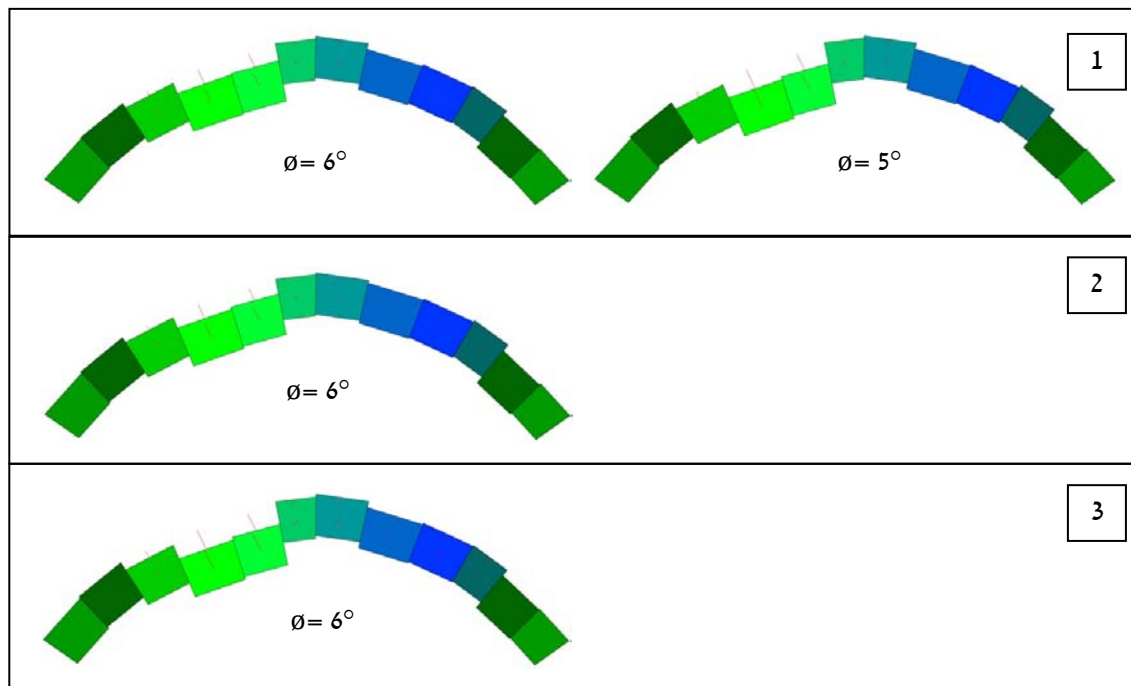
ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו עם הרעידות קשורים ביכולת העמידה של הקמרון גם בזווית חיכוך הנמוכה ביותר ובשינויים בערכי וכיווני התזוזות בזווית החיכוך הקטנות. נסכם את התוצאות באמצעות תרשים 4.20 שמציג את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 7 (בלוק המפתח), בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידות אדמה. נראה את השתנות התזוזות והמאמצים רק בזווית החיכוך הקטנות בהם נראים שינויים כתוצאה מפעילות רעידות האדמה.



תרשים 4.20: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

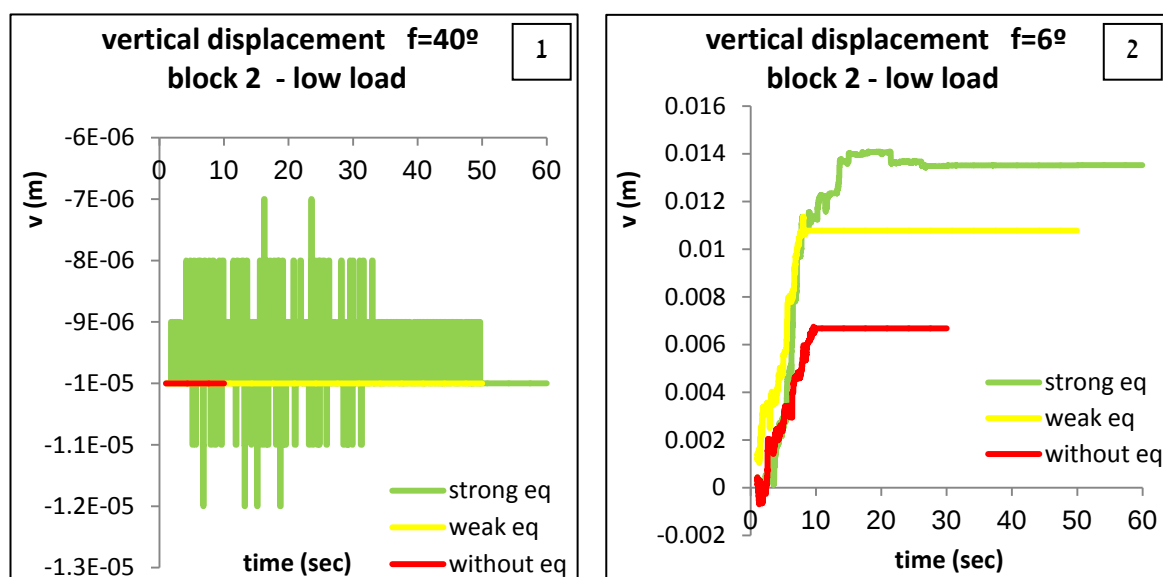
הגרפים הנ"ל מהווים מעין סיכום לתזוזות המאמצים המתפתחים בבלוקים, כאשר מופעלים על הקמרון העומסים הנמוכים, וניתן לראות כי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, אינן גורמות לשינוי בתזוזות ובמאמצים המתפתחים בבלוקים בזווית חיכוך הגדולות מ- 10° . בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° נראים פערים קטנים מאוד בערכי המאמצים ופערים משמעותיים יותר בתזוזות.

בתרשים 4.21 ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות בזווית החיכוך הקטנות ביותר בהן הקמרון נותר יציב ואינו קורס, בתלות במצב רעידת האדמה.

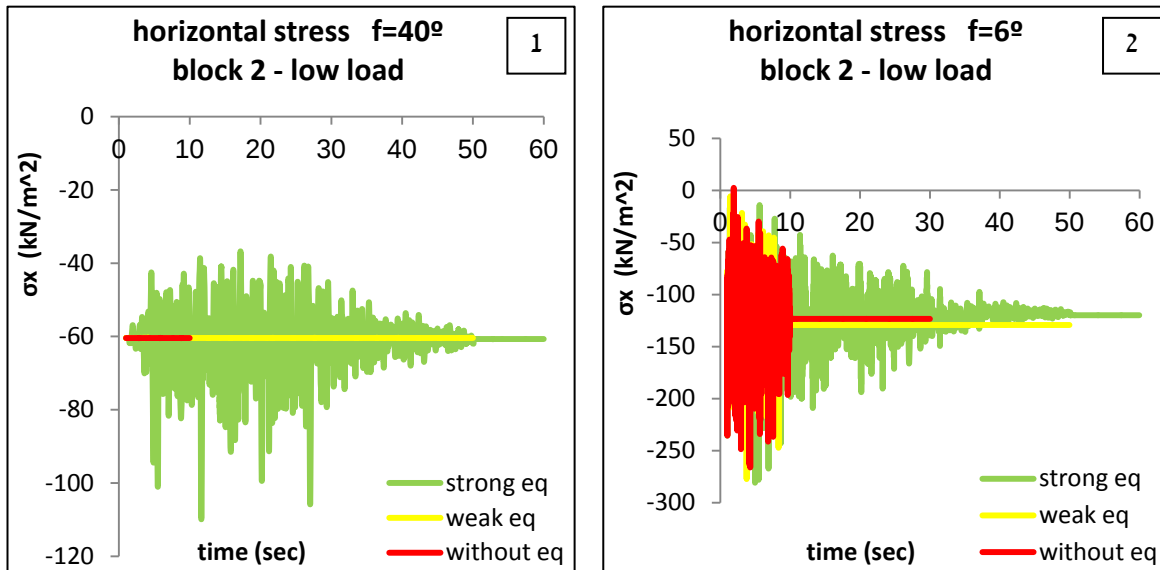


תרשים 4.21: תזוזות הבלוקים בשינוי זווית החיכוך הקטנות בהן הקמרון אינו מתמוטט. 1. ללא הפעלת רעידת אדמה. 2. לאחר רעידת אדמה חלשה. 3. לאחר רעידת אדמה חזקה.

יש לזכור כי התוצאות הנ"ל מתייחסות למאמצים הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשינויים במאמצים המתרחשים תוך כדי פעילות רעידת האדמה. בגרפים הבאים (תרשימים 4.22-4.23) נראה את השינויים המתרחשים במאמצים האופקיים ובתזוזות האנכיות בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית חיכוך של 40° ו- 6° .



תרשים 4.22: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 6° .



תרשים 4.23: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 6°

ניתן לראות בתרשימים 4.22-4.23 כי בזמן פעילות רעידת האדמה בשתי זוויות החיכוך, המאמצים מתייצבים בסוף הרעידות על ערכים מאד קרובים, וההבדל במאמצים מתרחש רק בהפעלת הרעידה החזקה, בה הקמרון מתייצב רק בסופה והמאמצים משתנים לכל אורך פעילות הרעידה, בניגוד למצב של רעידה חלשה או ללא רעידה כלל, בו הקמרון מתייצב מיד.

בשונה מהמאמצים, בזווית חיכוך של 6° , התזוזות הסופיות עליהן מתייצב הקמרון שונות משמעותית בכל שלושת המצבים.

בזווית חיכוך של 6° בכל שלושת המצבים, ללא רעידה, רעידה חלשה ורעידה חזקה, לוקח זמן למאמצים ולתזוזות בקמרון להתייצב, כאשר הוא מתייצב הכי מהר בהפעלת הרעידה החלשה. נראה כי ההתייצבות האיטית קשורה לזווית החיכוך הנמוכה ולא לפעילות רעידת האדמה.

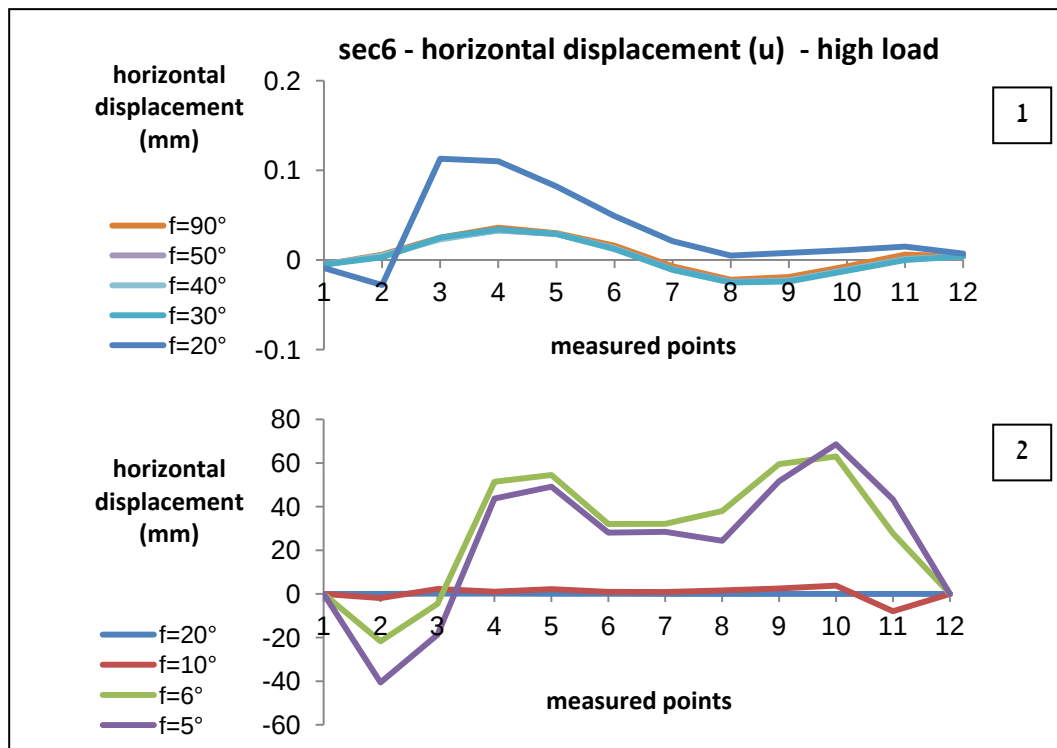
4.2.3. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה

הגרפים הבאים (תרשימים 4.24-4.26) מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר הפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים. טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=5^\circ-90^\circ$, אך יש לציין כי ישנם מצבים בהם במודל הקמרון עבר דפורמציות גדולות מאד ואינו מתמוטט, אך סביר להניח שבמציאות קמרון עם דפורמציות כה גדולות לא ישאר יציב לאורך זמן.

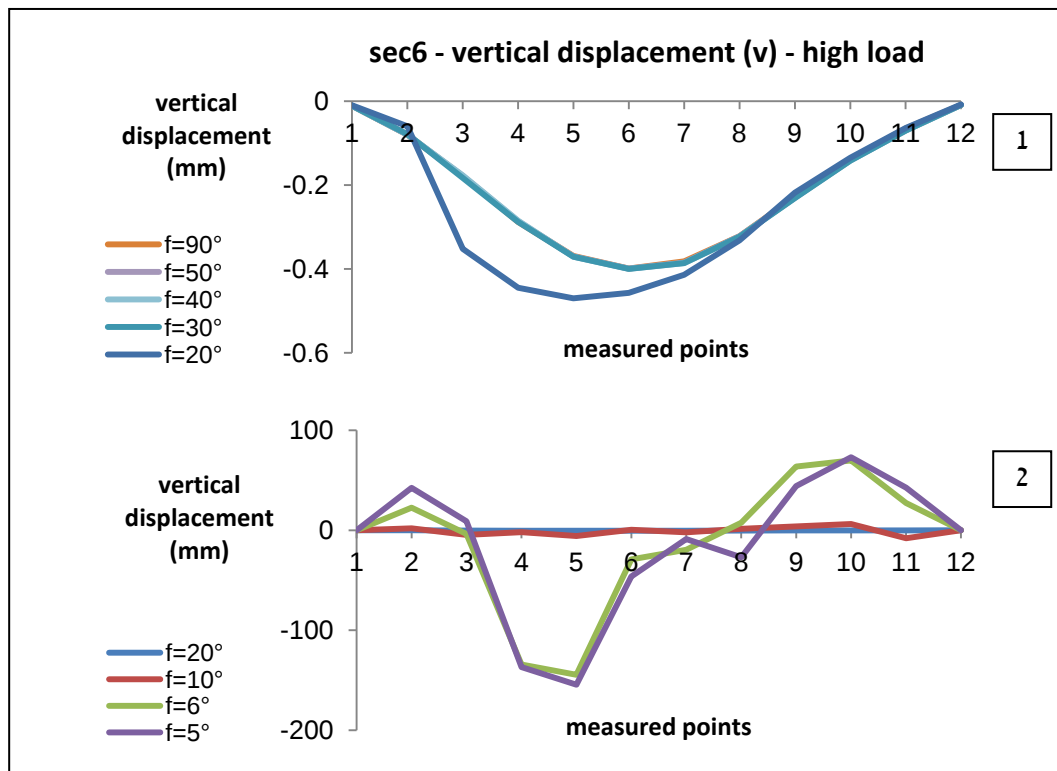
בזוויות $30^\circ-90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית וישנם שינויים מינוריים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

בזוויות $10^\circ-30^\circ$ החוקיות וסימטריית המאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה וישנה גדילה משמעותית במאמץ האופקי ושינויים קלים יותר במאמץ הגזירה שגדל בבלוקים הקיצוניים ובמאמץ האנכי שגדל מעט בבלוקים המרכזיים. התזוזות גדולות באופן משמעותי ומאבדות את הסימטריה והחוקיות הקיימת בזווית חיכוך גדולות יותר.

בזוויות חיכוך הקטנות מ- 10° ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות באופן משמעותי. יחד עם זאת, נעלמת הסימטריה והחוקיות בהתנהגות התזוזות. החוקיות והסימטריה במאמצים נשמרת וישנם שינויים קלים במאמצים, אך ללא חוקיות מסוימת.

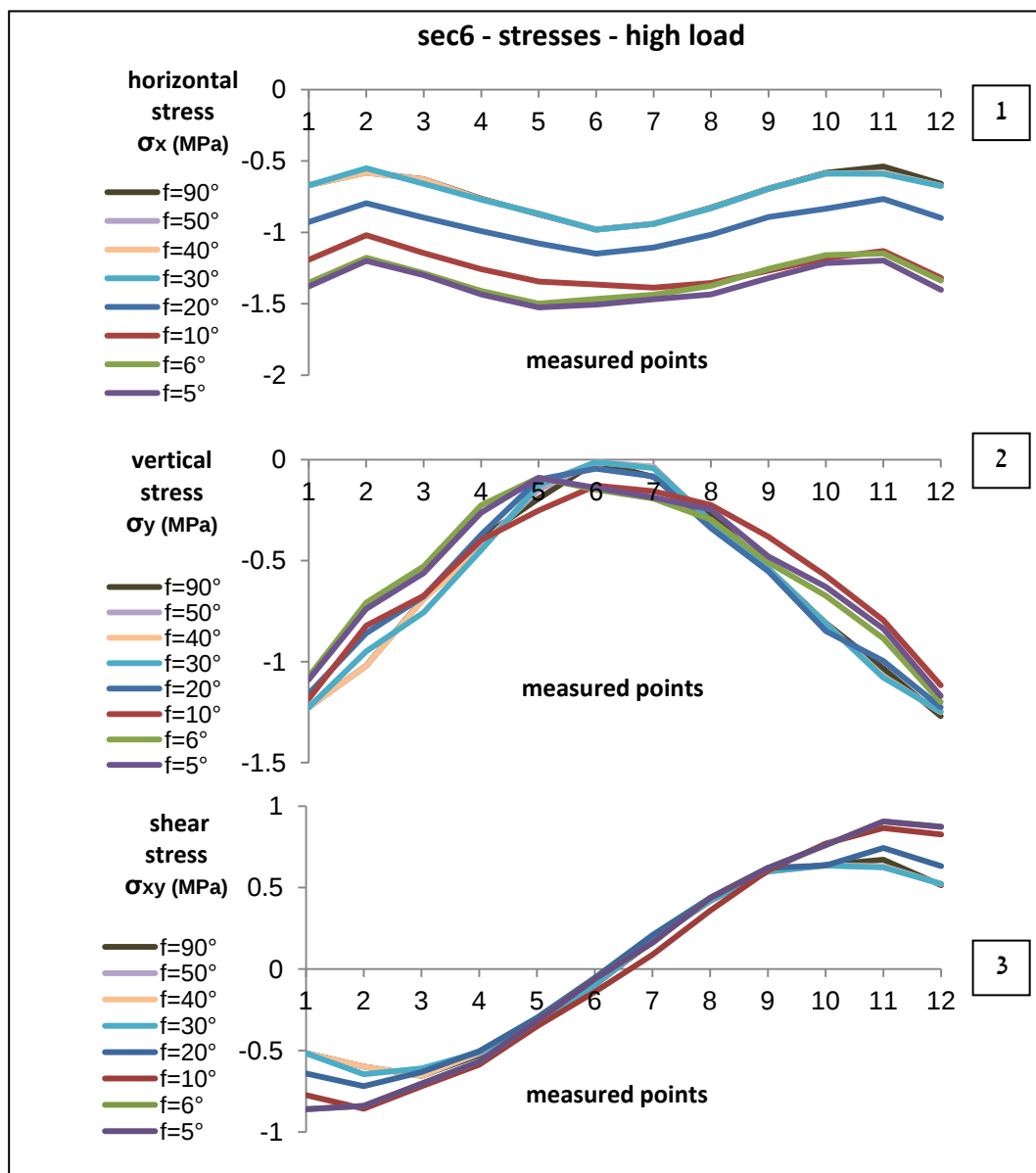


תרשים 4.24: גרף דפורמציה אופקית כנגד זוויות חיכוך. 1. זוויות חיכוך גדולות מ- 20° . 2. זוויות חיכוך קטנות מ- 20°



תרשים 4.25: גרף דפורמציה אנכית כנגד זוויות חיכוך. 1. זוויות חיכוך גדולות מ- 20° . 2. זוויות חיכוך קטנות מ- 20°

- התזוזה האופקית בזווית חיכוך 5° - 6° גדולה באופן משמעותי ביותר מהתזוזות בזווית חיכוך הגדולות מעשר מעלות ומגיעה לתזוזה של 69 מ"מ בבלוק 10 בזווית חיכוך של 5° . בזווית הגדולות מעשרים מעלות (כולל) התזוזות אינן משמעותיות וקטנות מ- 0.1 מ"מ. בשונה ממצב עמיסה נמוך, בו התזוזות בזווית חיכוך של עשר מעלות אינן משמעותיות וקטנות מ- 1 מ"מ, במצב עמיסה גבוה מגיעות התזוזות בזווית חיכוך של עשר מעלות ל- 8 מ"מ.
- התזוזה האנכית המקסימלית מתרחשת בבלוק מס' 5 בזווית חיכוך של 5° והיא יורדת כלפי מטה 154 מ"מ.



תרשים 4.26: גרף מאמץ כנגד זווית חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה

- ניתן לראות כי כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים ומאמץ הגזירה והמאמץ האנכי מקסימליים בבלוקים הקיצוניים. (תרשים 4.26-1,2)
- במרכז הקמרון שינוי זווית החיכוך כמעט ולא משפיע על מאמצי הגזירה. בעוד שבשלושת הבלוקים הקיצוניים מכל צד הקטנת זווית החיכוך משנה את מאמץ הגזירה. (תרשים 4.26-3)

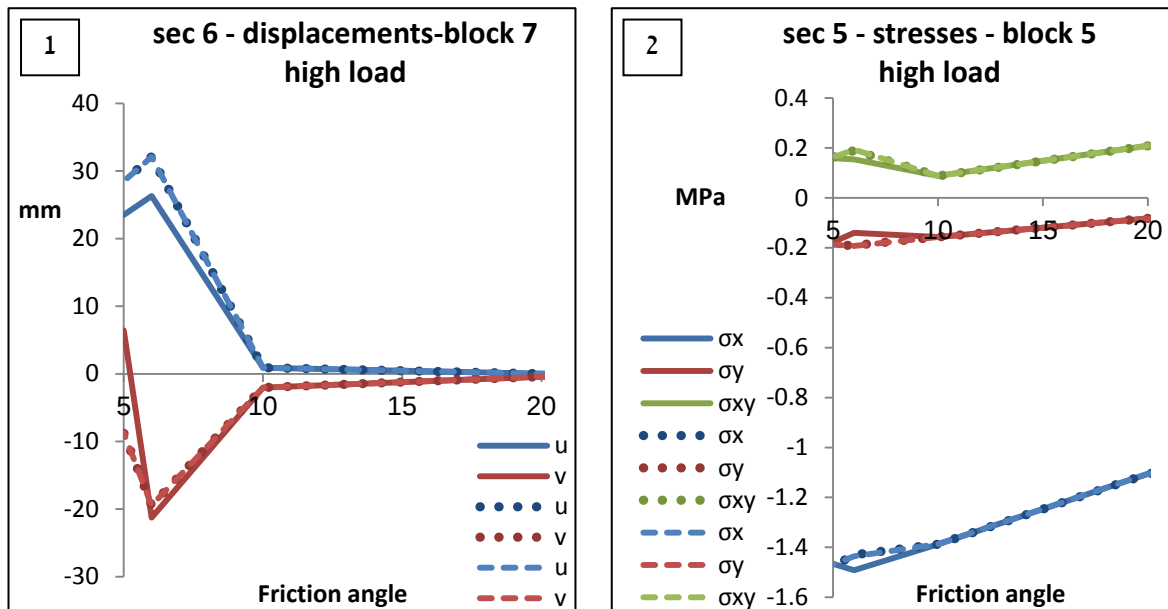
4.2.4. השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה

התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס בשתי הרעידות הוא $f=5^\circ-90^\circ$. מבחינת התוצאות נראה שמצב הקמרון בהתייצבותו מיד בסוף שתי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, קרוב מאד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה, והגרפים של תוצאות התזוזות והמאמצים דומים מאד לגרפים שראינו בסעיפים הקודמים. ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו בסוף הרעידות, בערכי וכיווני התזוזות בזווית החיכוך הקטנות.

נסכם את התוצאות באמצעות הגרפים הבאים שמראים את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 7 (בלוק המפתח), בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידות אדמה. (תרשים 4.27)

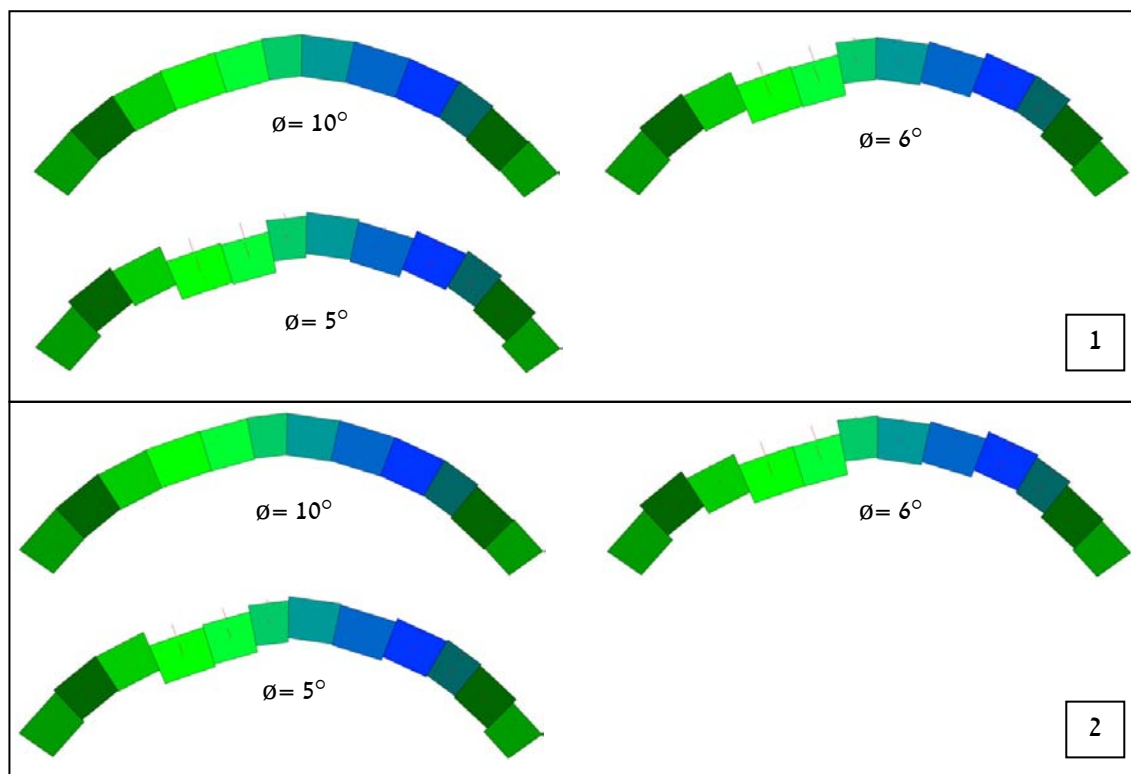
נראה את השתנות התזוזות והמאמצים רק בזווית החיכוך הקטנות בהם נראים שינויים כתוצאה מפעילות רעידות האדמה.



תרשים 4.27: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 7. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

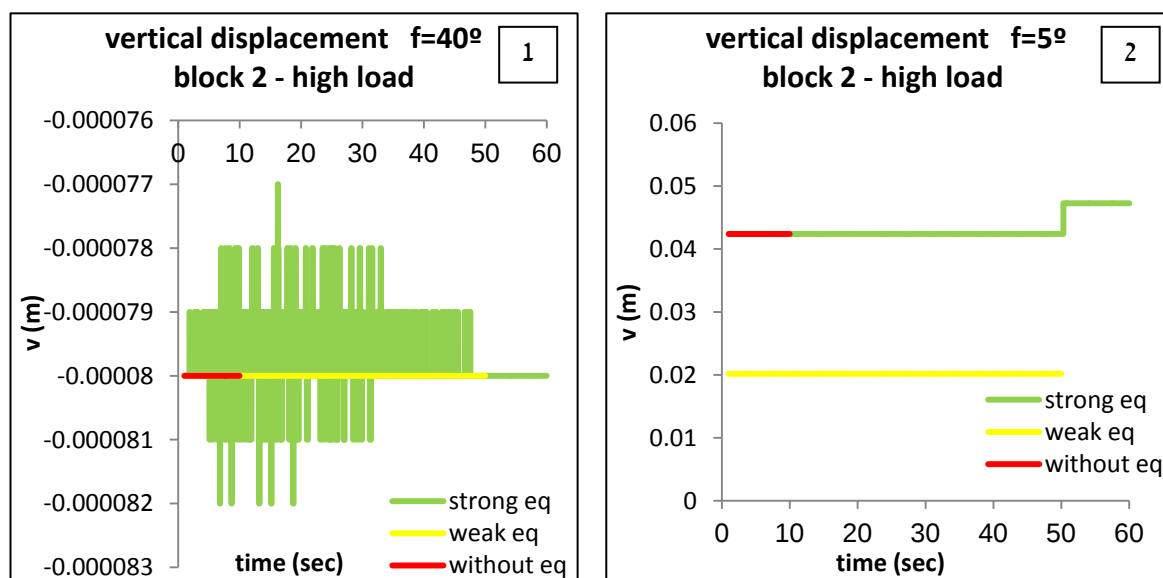
הגרפים הנ"ל מהווים מעין סיכום לתזוזות המאמצים המתפתחים בבלוקים, כאשר מופעלים על הקמרון העומסים הגבוהים, וניתן לראות כי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, אינן גורמות לשינויים בתזוזות ובמאמצים המתפתחים בבלוקים בזווית חיכוך הגדולות מ- 10° . בעוד שבזווית חיכוך הקטנות מ- 10° נראים פערים קטנים מאד בערכי המאמצים, ופערים משמעותיים יותר, בתזוזות, אך יש לשים לב שהפערים הם בעיקר בין מצב של רעידה חלשה למצב של רעידה חזקה או ללא רעידה כלל.

בתרשים 4.28 ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות ואת צורת התייצבות הבלוקים במצב של רעידה חלשה וללא רעידה כלל. לא מופיע התרשים של מצב הקמרון עם רעידה חזקה מכיוון שהוא דומה מאד למצב ללא רעידה.

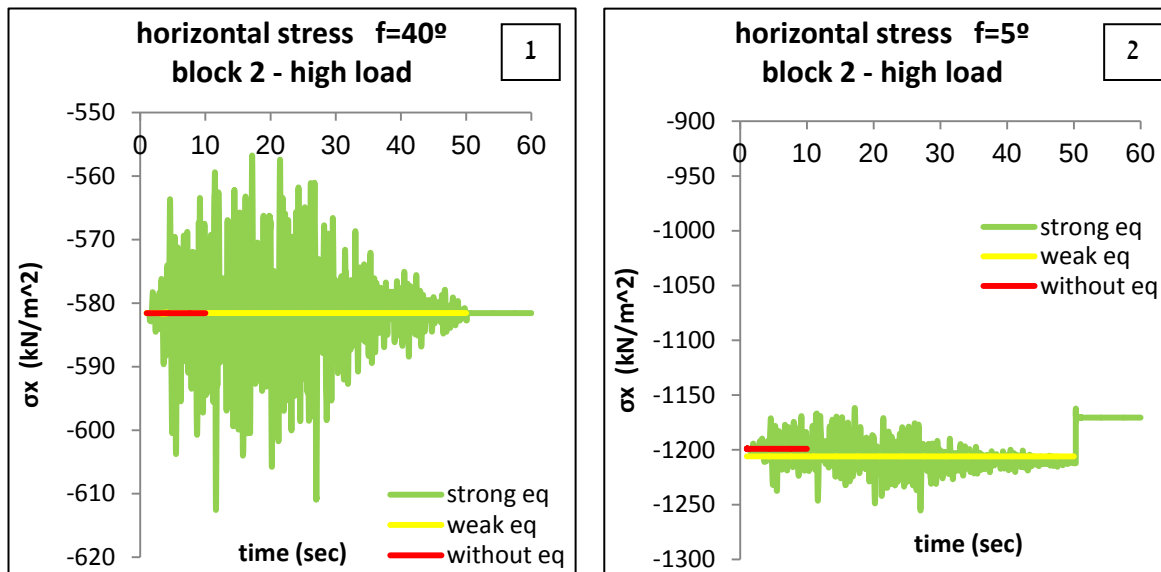


תרשים 4.28: תזוזות הבלוקים בשינוי זווית חיכוך. 1. ללא הפעלת רעידת אדמה. 2. לאחר רעידת אדמה חלשה.

יש לזכור כי התוצאות הנ"ל מתייחסות למאמצים הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשינויים במאמצים המתרחשים תוך כדי פעילות רעידת האדמה. בגרפים הבאים נראה את השינויים המתרחשים במאמצים בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית החיכוך השונות. (תרשימים 4.29-4.30)



תרשים 4.29: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40°. 2. זווית חיכוך של 5°.



תרשים 4.30: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 5° .

ניתן לראות כי בזמן פעילות רעידת האדמה בזווית חיכוך של ארבעים מעלות אין הבדל משמעותי בין מצב התזוזות והמאמצים ללא רעידת אדמה לבין מצב המאמצים בהפעלת רעידת אדמה חלשה, וכי בשני המקרים הקמרון מתייצב מיד, בניגוד למצב המאמצים והתזוזות בהפעלת הרעידה החזקה, בו יש שינויים משמעותיים במאמצים ובתזוזות המתפתחים בבלוקי האבן תוך כדי הרעידה, ורק בסוף פעילות הרעידה מצב המאמצים מתייצב ומתנהג בדומה למצב המאמצים ללא רעידה או עם רעידה חלשה.

בזווית חיכוך של חמש מעלות התנהגות המאמצים והתזוזות משתנה ומתייצבת על ערכים שונים בסוף פעילות הרעידות.

4.2.5. מסקנות

בכל מצבי העמיסה ובכל מצבי רעידות האדמה שינוי זווית החיכוך לא גורם לשינויים בערכי התזוזות והמאמצים בזווית חיכוך הגדולות מ- 40° . מתחת ל- 40° מעלות נראה כי ככל שזווית החיכוך קטנה, התזוזות גדולות ובהתאמה גם המאמץ האופקי. בזווית אלה ישנם גם שינויים קטנים במאמץ האנכי ובמאמץ הגזירה ביחס הפוך, זאת אומרת שכאשר המאמץ האנכי יורד מאמץ הגזירה עולה ולהפך. בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° אין חוקיות ברורה בשינוי ערכי התזוזות והמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.

נראה כי לרעידות האדמה יש השפעה על התזוזות והמאמצים המתרחשים בבלוקים רק בשינויי המאמצים והתזוזות תוך כדי הרעידה החזקה או בזווית חיכוך מאד קטנות, והשינויים המשמעותיים מתרחשים בעקבות שינויי העומסים. אך גם שינויים אלה אינם גורמים לחוקיות שונה בהתנהגות המאמצים והתזוזות, אלא בערכי המאמצים.

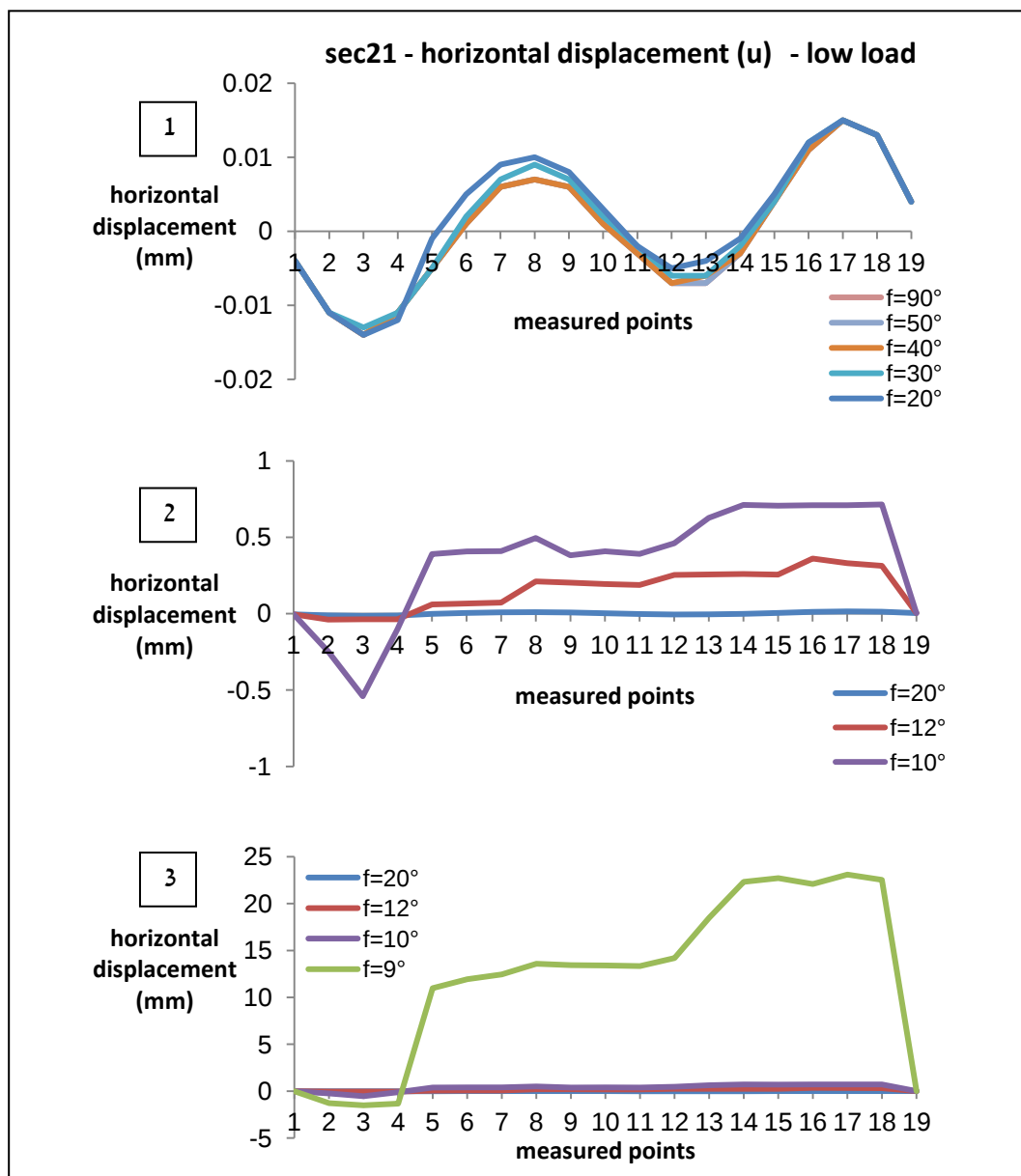
נסכם את ההבדלים המשמעותיים בין שני מצבי העמיסה מיד בסיום פעילות רעידות האדמה, כאשר העומסים הנקודתיים על הבלוקים במצב העמיסה הגבוה גדולים בממוצע פי 12.8 מאשר במצב העמיסה הנמוך.

- 0 המאמצים האופקיים, האנכיים ומאמצי הגזירה המקסימליים המתפתחים בבלוקים במצב עמיסה גבוה, גדולים בממוצע פי 8-9 ממצב העמיסה הנמוך.
- 0 במצב של עומסים גבוהים, נראות תזוזות משמעותיות כבר בזווית חיכוך של 10° , בשונה ממצב עמיסה נמוך שם את התזוזות רואים רק בזווית חיכוך הקטנות מ- 10° .
- 0 התזוזות ההאופקיות והאנכיות של הבלוקים בזווית חיכוך הגדולה מ- 10° גדולות יותר במצב עמיסה גבוה, כאשר מתחת ל- 10° , אין חוקיות מסויימת.
- מאמצי הלחיצה המקסימליים הנוצרים במרכזי הבלוקים אינם מתקרבים לתסבולת הלחיצה של אבני הקמרון ומגיעים למאמץ לחיצה מקסימלי של 1.5 מגפ"ס.
- אמנם קמרון 6 פחות שטוח מקמרון 5, אך עדיין רחוק מלהיות חביתי ולכן עדיין עובר עומס אופקי משמעותי לקירות האנכיים עליהם נסמך הקמרון. בשונה מקמרון 5, מאמצי הלחיצה האנכיים המקסימליים (בקצוות הקשת) קרובים מאוד בערכיהם למאמצי הלחיצה האופקיים המקסימליים.

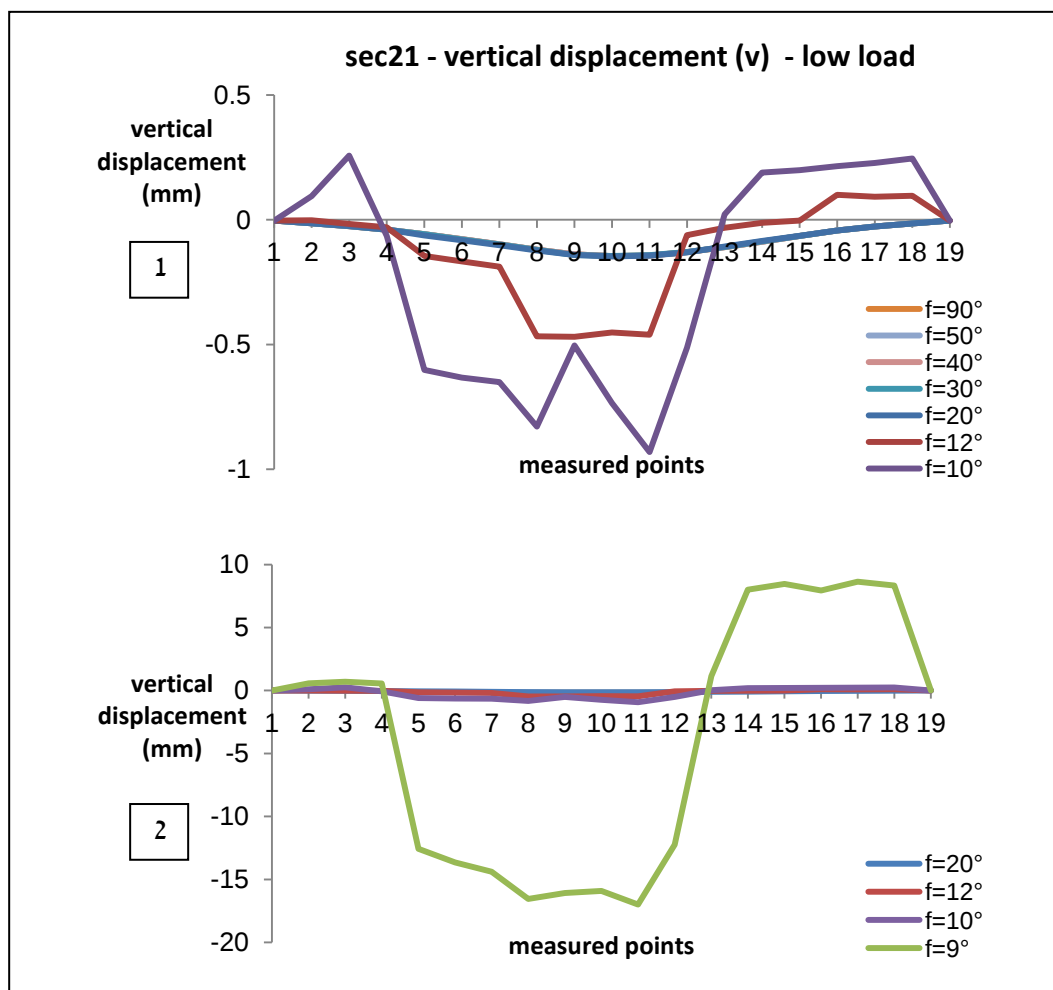
4.3. קמרון 21

4.3.1. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה נמוך

הגרפים הבאים מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר הפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים. (תרשימים 4.31-4.33). טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=9^\circ-90^\circ$. בזוויות $40^\circ-90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית ואין שינויים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך. בזוויות $20^\circ-40^\circ$ החוקיות וסימטריית התזוזות והמאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות האופקיות גדלות במקצת, אך התזוזות האנכיות והמאמצים אינם משתנים. בזווית חיכוך הקטנות מ- 12° הסימטרייה במאמצים נשמרת ויש שינוי זעיר במאמץ האופקי, אך ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות מאד ונעלמת הסימטריה.



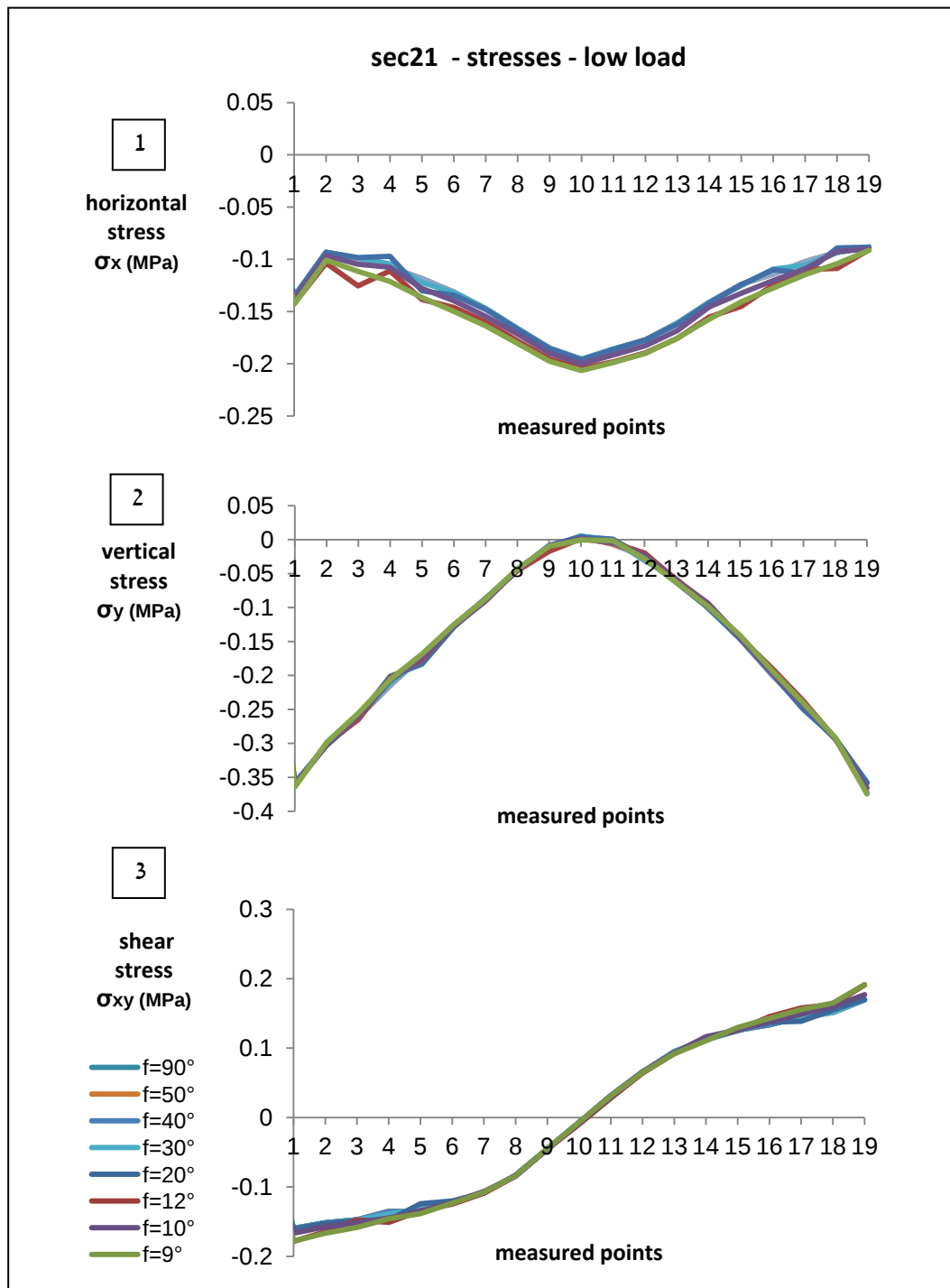
תרשים 4.31: גרף דפורמציה אופקית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 20° . 2. זווית חיכוך בטווח $10^\circ-20^\circ$. 3. זווית חיכוך קטנות מ- 20° .



תרשים 4.32: גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית חיכוך. 1. זווית חיכוך גדולות מ- 10° . 2. זווית חיכוך קטנות מ- 20°

- התזוזה האופקית בזווית חיכוך של 9° גדולה באופן משמעותי מהתזוזות בזווית חיכוך הגדולות מעשר מעלות ומגיעה לתזוזה של 23 מ"מ בבלוק 17. בזווית הגדולות מעשר מעלות התזוזות אינן משמעותיות ומגיעות ל- 0.7 מ"מ. (תרשים 4.31)

- התזוזה האנכית בזווית חיכוך של 9° גדולה באופן משמעותי מהתזוזות בזווית חיכוך הגדולות מעשר מעלות ומגיעה לתזוזה של 17 מ"מ בבלוק 11. בזווית הגדולות מעשר מעלות התזוזות אינן משמעותיות וקטנות מ- 1 מ"מ. (תרשים 4.32)



תרשים 4.33: גרף מאמץ כנגד זוויות חיכוך. 1. מאמץ אופקי. 2. מאמץ אנכי. 3. מאמץ גזירה

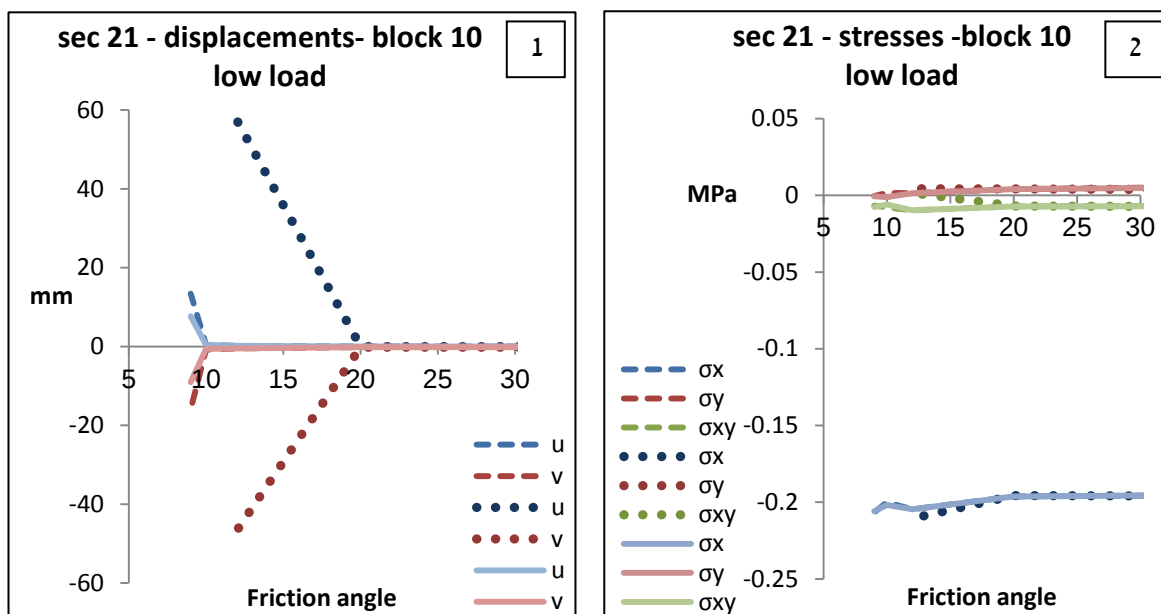
ניתן לראות בתרשים 4.33 כי כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים והמאמץ האנכי והגזירה המקסימלי מתפתח בבלוקי הקיצוניים ומתאפס במרכז הקמרון.

4.3.2. השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה נמוך

התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס ברעידה החלשה הוא $f=9^\circ-90^\circ$, וברעידה החזקה הוא $f=13^\circ-90^\circ$.

מבחינת התוצאות נראה שהתייצבות הקמרון מיד בסוף הרעידה קרובה מאד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה, כאשר יש פער גדול יותר בין המצב ללא רעידה וברעידה לעומת הרעידה החזקה. ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו עם הרעידות קשורים ביכולת העמידה של הקמרון גם בזווית חיכוך הנמוכה ביותר ובשינויים בערכי וכיווני התזוזות בזווית החיכוך הקטנות. נסכם את התוצאות באמצעות הגרפים הבאים שמראים את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 10, בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידות אדמה. (תרשים 4.34) בזווית הגדולות מ- 30° כמעט ואין השפעה לשינוי זווית החיכוך על התזוזות והמאמצים, אז נראה את השתנות הערכים רק בזווית הקטנות מזווית זו.



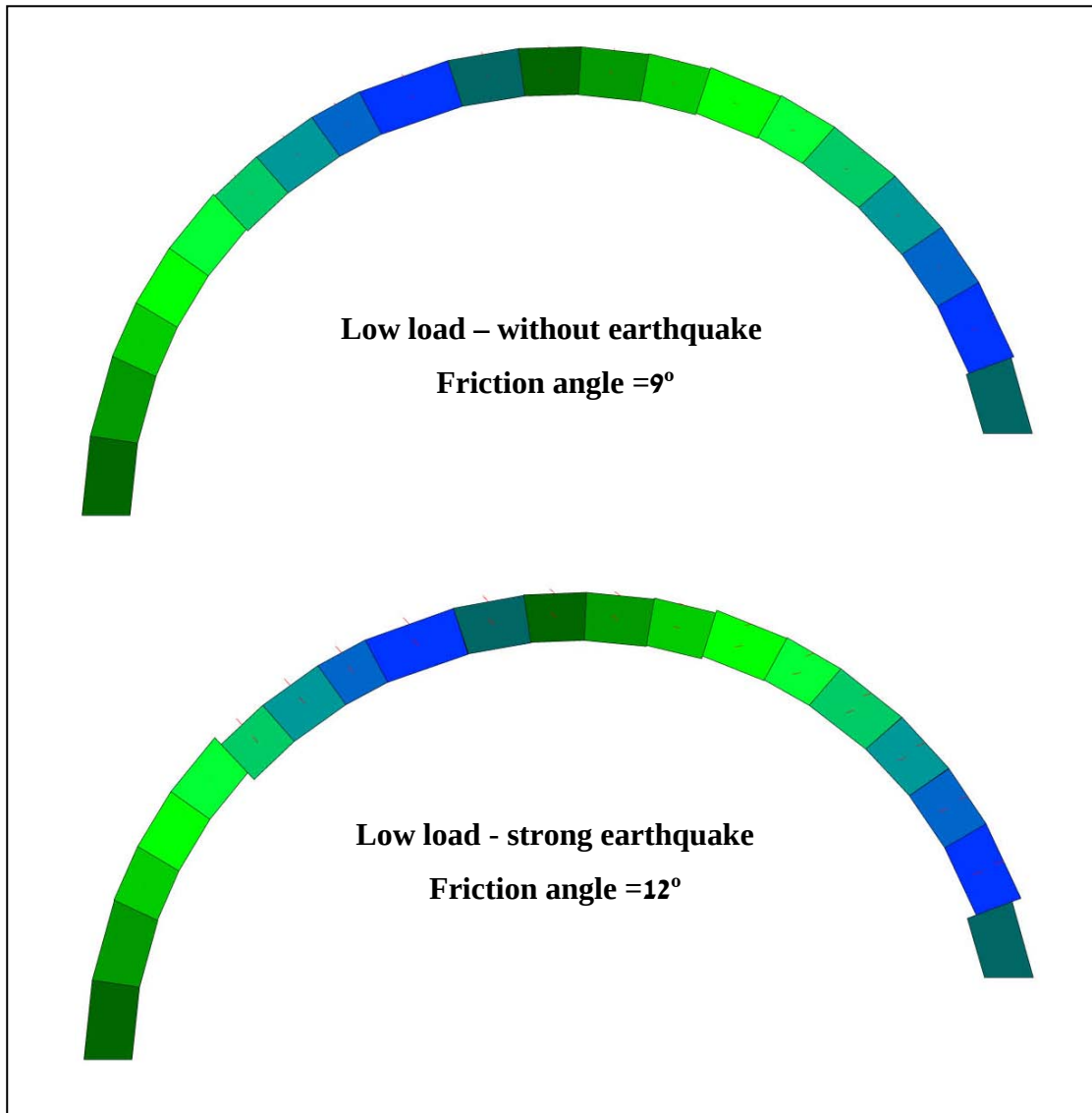
תרשים 4.34: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

בדומה לקמרונות 5,6 הפערים בין המצבים השונים הקשורים לפעילות רעידת האדמה מתרחשים רק בזווית החיכוך הקטנות.

ניתן לראות שגם בתזוזות וגם במאמצים ההבדלים המשמעותיים הם בין המצב של הרעידה החזקה לבין המצבים ללא הרעידה ועם הרעידה החלשה. מלבד זה שברעידה החזקה הקמרון מתמוטט בזווית הקטנות מ- 12° ובשאר המצבים הוא מתמוטט רק בזווית הקטנות מ- 9° , התזוזות שמתרחשות לפני ההתמוטטות הרבה יותר גדולות במצב של הרעידה החזקה.

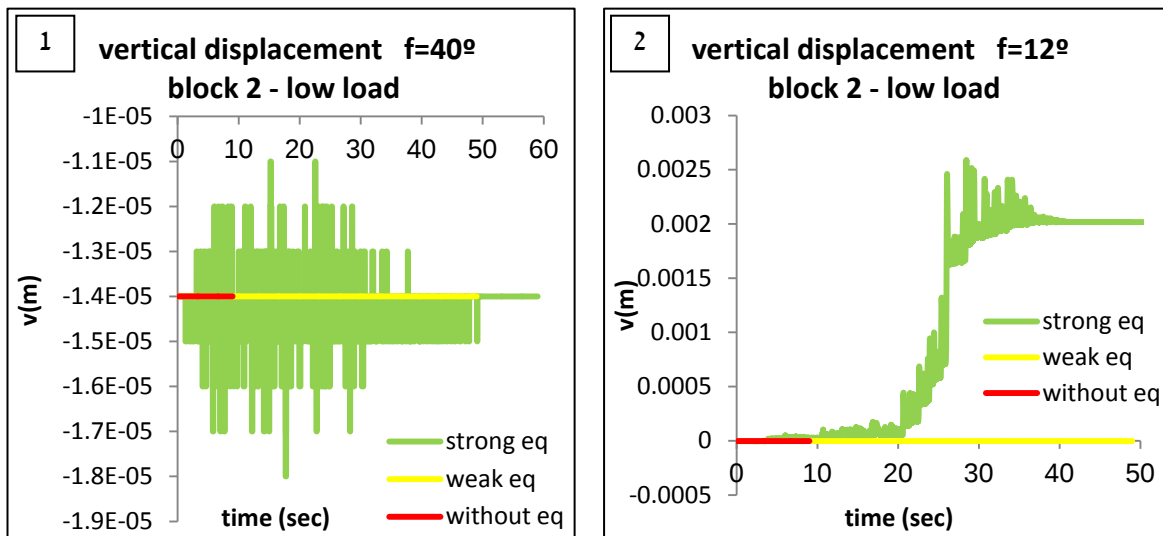
בכל המצבים הקטנת זווית החיכוך גורמת לתזוזות גדולות יותר, אך בשונה מקמרונות 5,6 שינוי זווית החיכוך כמעט ולא משפיע על המאמצים והם נשארים זהים בקירוב בכל זווית חיכוך בה עומד הקמרון.

בתרשים 4.35 ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות ואת צורת התייצבות הקמרון בזווית החיכוך הקטנות ביותר בהן הקמרון נותר יציב ואינו קורס, בתלות במצב רעידת האדמה. לא מופיע מצב הקמרון בסיומה של רעידה חלשה מכיוון שמצב הקמרון בסיומה של רעידה חלשה דומה מאד למצבו ללא רעידה כלל.

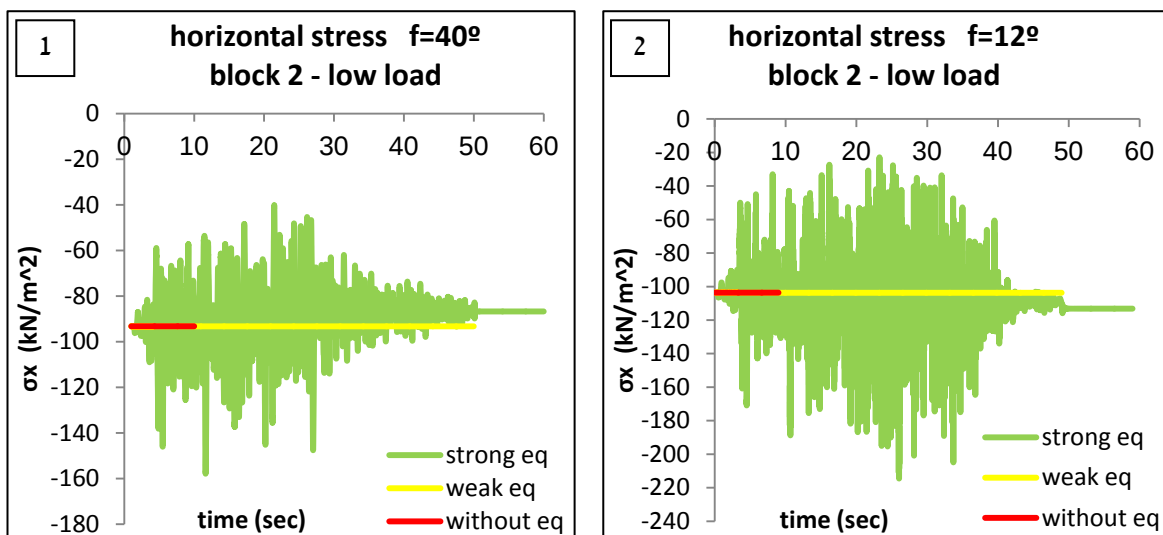


תרשים 4.35: תזוזות הבלוקים בזווית חיכוך הקטנה ביותר בה הוא עומד, ללא רעידת אדמה ועם רעידת אדמה חזקה

יש לזכור כי התוצאות הנ"ל מתייחסות למאמצים ולתזוזות הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשוניים במאמצים המתרחשים תוך כדי פעילות רעידת האדמה. בגרפים הבאים (תרשימים 4.36-4.37) ניתן לראות את הדפורמציות הסופיות בזווית החיכוך הקטנות ביותר בהן הקמרון נותר יציב ואינו קורס, בתלות במצב רעידת האדמה. נראה את השוניים המתרחשים במאמצים האופקיים ובתזוזות האנכיות בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית החיכוך השונות, כאשר זווית החיכוך הנמוכה נקבעה לפי הזווית חיכוך הנמוכה ביותר בה הקמרון עומד במצב של רעידה חזקה.



תרשים 4.36: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבולק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 12°



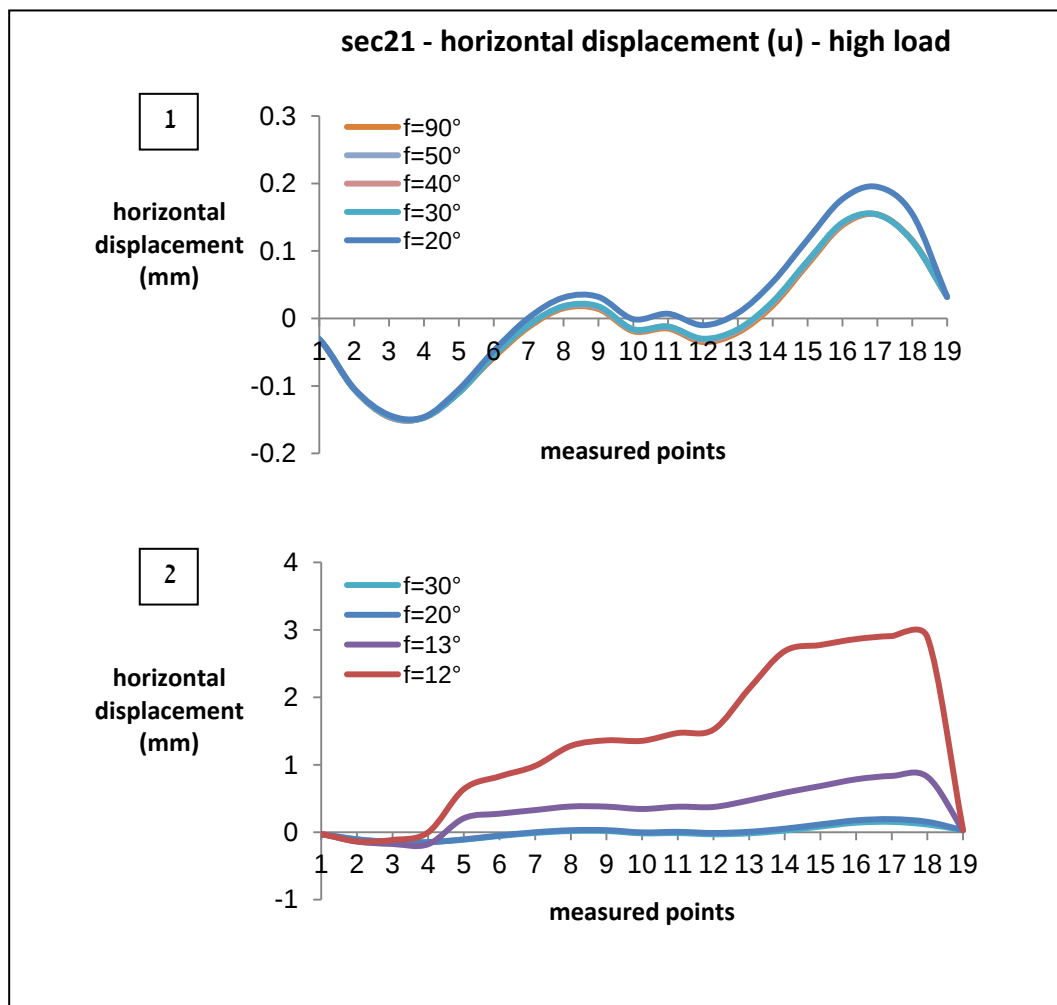
תרשים 4.37: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבולק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 12°

לשינוי בזווית החיכוך השפעה גדולה על ערכי התזוזות. בשני מצבי החיכוך, במצב ללא רעידה וברעידה חלשה התזוזות מתייצבות מיד, בעוד שברעידה החזקה הן מתייצבות רק לקראת סוף פעילות הרעידה. בזווית החיכוך הגבוהה ערכי התזוזות מתייצבים לבסוף על אותו ערך בכל מצבי הרעידה, ואילו בזווית החיכוך הנמוכה התזוזה במצב של רעידת האדמה החזקה גדולה יותר מאשר במצב ללא רעידה וברעידה חלשה.

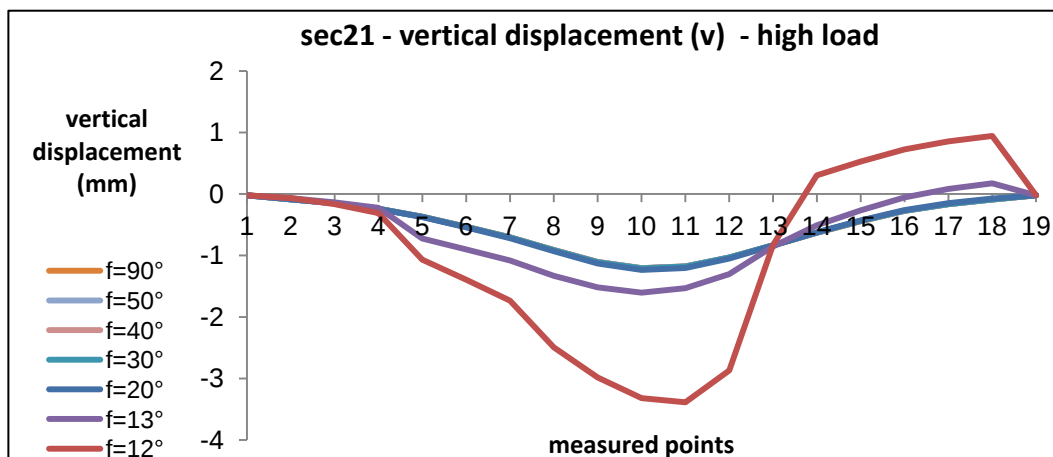
לשינוי בזווית החיכוך יש השפעה קטנה על ערכי המאמצים, אך התנהגות המאמצים בשני המצבים דומה, כאשר במצב ללא רעידה וברעידה החלשה, המאמצים מתייצבים מיד על אותו ערך בעוד שברעידה החזקה המאמצים מתייצבים על ערך קצת שונה ורק בסוף פעילות הרעידה.

4.3.3. השפעת שינוי זווית החיכוך במצב עמיסה גבוה

הגרפים הבאים מתארים את הדפורמציות והמאמצים שהתקבלו במרכז כל בלוק בסוף זמן ההרצה, כאשר הפרמטר היחיד ששונה מהרצה להרצה הוא זווית החיכוך בין הבלוקים. (תרשימים 4.38-4.42).
 טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס הוא $f=12^\circ - 90^\circ$.
 בזוויות $40^\circ - 90^\circ$ התזוזות והמאמצים מתנהגים בצורה חוקית וסימטרית ואין שינויים בתזוזות ובמאמצים עקב שינוי זווית החיכוך.
 בזוויות $20^\circ - 40^\circ$ החוקיות וסימטריית התזוזות והמאמצים נשמרת וככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות האופקיות גדלות במקצת, אך התזוזות האנכיות והמאמצים אינם משתנים.
 בזוויות חיכוך הקטנות מ- 13° הסימטרייה במאמצים נשמרת ויש שינוי זעיר במאמץ האופקי, אך ככל שזווית החיכוך קטנה התזוזות גדלות מאוד ונעלמת הסימטריה.



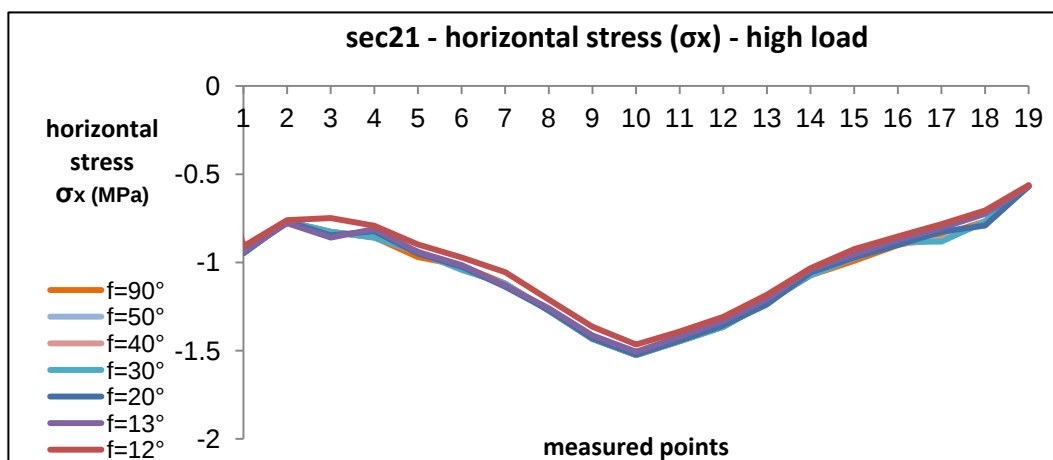
תרשים 4.38: גרף דפורמציה אופקית כנגד זוויות חיכוך. 1. זוויות חיכוך גדולות מ- 20° . 2. זוויות חיכוך קטנות מ- 30°



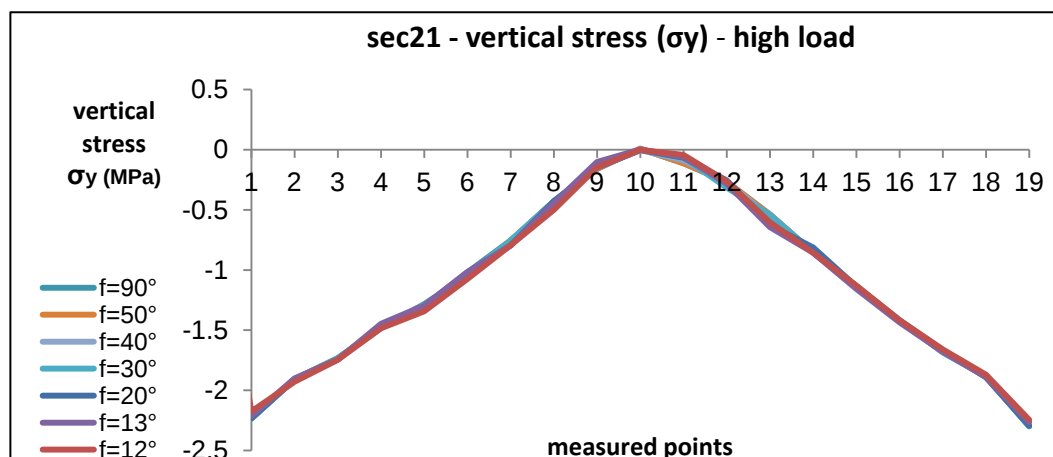
תרשים 4.39: גרף דפורמציה אנכית כנגד זווית החיכוך

- התזוזה האופקית המקסימלית מתרחשת בבלוק 18 ומגיעה ל- 3 מ"מ. התזוזות הנראות לעין מתרחשות רק בזווית של 12° ובכל זווית החיכוך הגדולות מזווית זו התזוזות אינן מגיעות ל- 1 מ"מ. (תרשים 4.38)

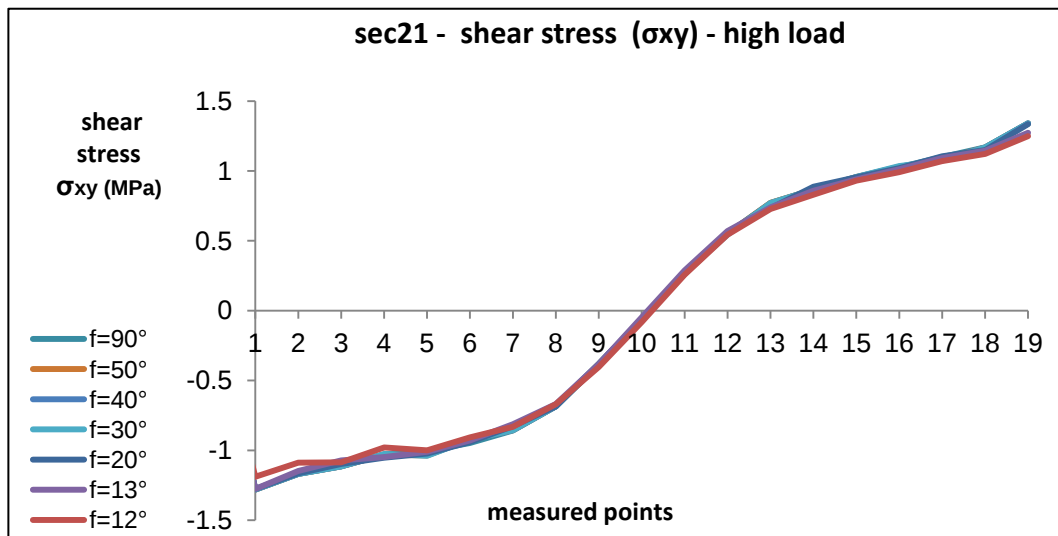
- התזוזה האנכית המקסימלית מגיעה לתזוזה של 3 מ"מ בבלוק 11. (תרשים 4.39)



תרשים 4.40: גרף המאמץ האופקי כנגד זווית החיכוך



תרשים 4.41: גרף המאמץ האנכי כנגד זווית החיכוך



תרשים 4.42: גרף מאמץ הגזירה כנגד זווית החיכוך

- ניתן לראות כי כל הבלוקים במצב לחיצה, כאשר המאמץ האופקי המקסימלי מתפתח בבלוקים האמצעיים והמאמץ האנכי והגזירה המקסימלי מתפתח בבלוקי הקיצוניים ומתאפס במרכז הקמרון. (תרשימים 4.40-4.42)

4.3.4 השפעת שינוי זווית החיכוך והפעלת רעידות אדמה במצב עמיסה גבוה

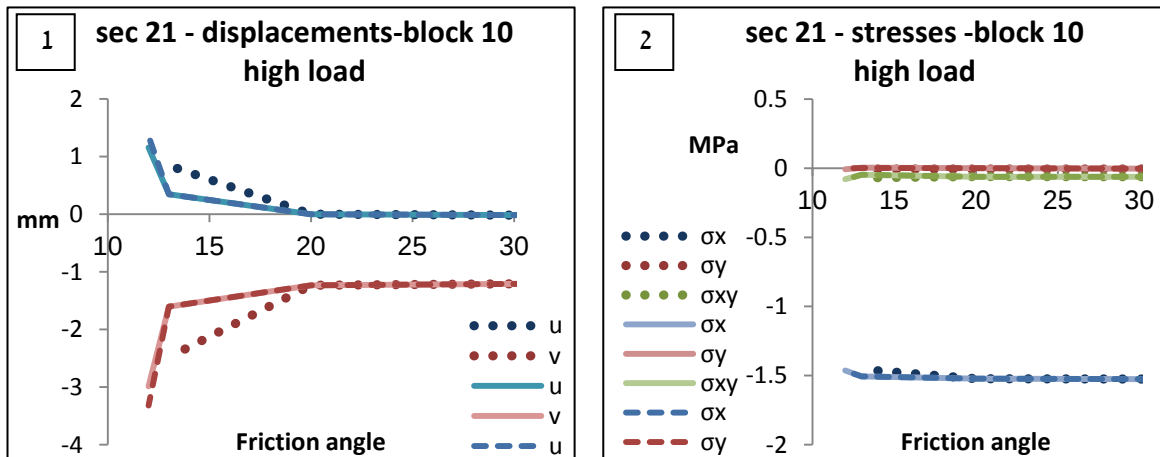
התוצאות שהתקבלו הן הדפורמציות והמאמצים שפועלים על הבלוקים מיד בתום פעילות רעידת האדמה.

טווח זווית החיכוך בו הקמרון נותר על מקומו ואינו קורס ללא רעידה וברעידה חלשה הוא $f=12^\circ-90^\circ$, וברעידה חזקה $f=13^\circ-90^\circ$.

מבחינת התוצאות נראה שמצב הקמרון בהתייבבותו מיד בסוף שתי רעידות האדמה, החלשה והחזקה, קרוב מאד למצבו ללא הפעלת רעידת האדמה, והגרפים של תוצאות התזוזות והמאמצים דומים מאד לגרפים שראינו בסעיפים הקודמים. ההבדלים העיקריים בין מצב הקמרון ללא רעידה לבין מצבו בסוף הרעידות, בערכי התזוזות בזווית החיכוך הקטנות, ובזווית החיכוך הקטנה ביותר בה הוא אינו קורס.

נסכם את התוצאות באמצעות תרשים 4.43 שמראה את שינויי התזוזות והמאמצים בבלוק האמצעי, בלוק מספר 10, בתלות בשינוי בזווית החיכוך ובהפעלת רעידת אדמה.

בזוויות הגדולות מ- 30° כמעט ואין השפעה לשינוי זווית החיכוך על התזוזות ועל המאמצים, אז נראה את השתנות הערכים רק בזוויות הקטנות מזוויות זו.



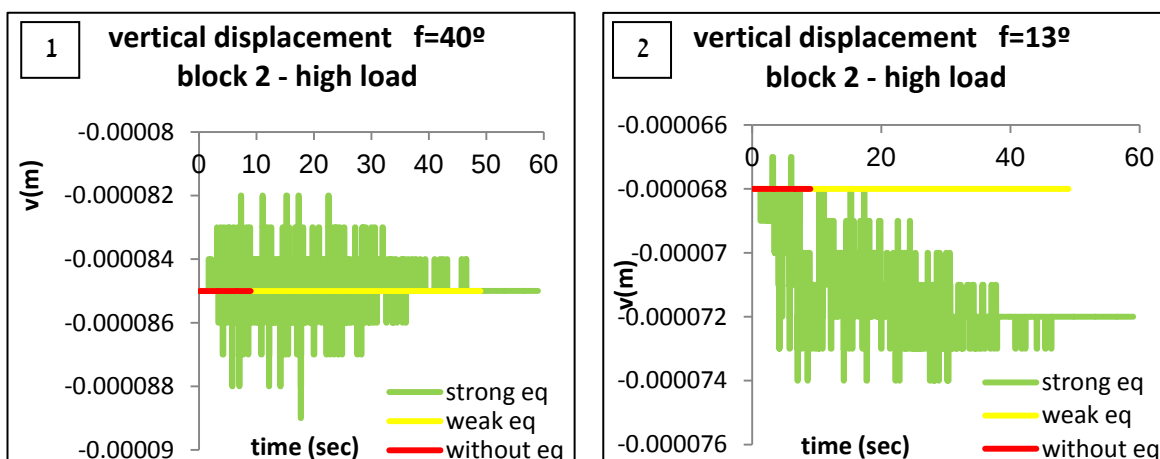
תרשים 4.43: 1. גרף תזוזות כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10, הבלוק האמצעי (בלוק המפתח). 2. גרף מאמצים כנגד זווית החיכוך בבלוק מספר 10. במקווקו - ללא רעידת אדמה, קו רציף - רעידת אדמה חלשה, נקודות - רעידת אדמה חזקה.

בדומה למצב העמיסה הנמוך ולקמרונות 5,6, הפערים בין המצבים השונים הקשורים לפעילות רעידת האדמה מתרחשים רק בזווית החיכוך הקטנות.

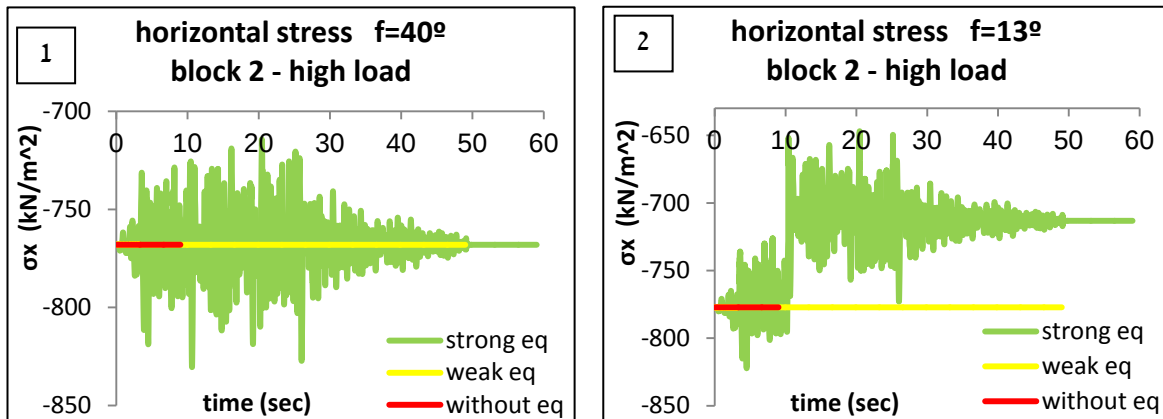
ניתן לראות שגם בתזוזות וגם במאמצים ההבדלים המשמעותיים הם בין המצב של הרעידה החזקה לבין המצבים ללא הרעידה ועם הרעידה החלשה. ברעידה החזקה הקמרון מתמוטט בזווית הקטנות מ- 13° ובשאר המצבים הוא מתמוטט רק בזווית הקטנות מ- 12° .

בכל המצבים הקטנות זווית החיכוך מתחת ל- 30° . גורמת לתזוזות גדולות יותר, אך בשונה מקמרונות 5,6 שינוי זווית החיכוך כמעט ולא משפיע על המאמצים והם נשארים זהים בקירוב בכל זווית חיכוך בה עומד הקמרון.

התוצאות הנ"ל מתייחסות למאמצים הקיימים בבלוקים מיד בסיום פעילות רעידת האדמה ואינן מתייחסות לשינויים במאמצים ובתזוזות המתרחשים תוך כדי פעילות רעידת האדמה. בתרשימים 4.44-4.45 נראה את השינויים המתרחשים במאמצים ובתזוזות בבלוק מספר 2 תוך כדי פעילות רעידות האדמה בזווית החיכוך השונות, כאשר זווית החיכוך הנמוכה נקבעה לפי הזווית חיכוך הנמוכה ביותר בה הקמרון עומד במצב של רעידה חזקה.



תרשים 4.44: גרף תזוזה אנכית לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 13° .



תרשים 4.45: גרף מאמץ אופקי לאורך זמן בבלוק מספר 2. 1. זווית חיכוך של 40° . 2. זווית חיכוך של 13°

ניתן לראות כי בסיום פעילות רעידת האדמה, בזווית החיכוך הגדולה (40°), התזוזות והמאמצים מתייצבים על אותו ערך, וההבדל בערכי התזוזות מתרחש רק תוך כדי פעילות הרעידה החזקה, בה הקמרון מתייצב רק בסופה והתזוזות והמאמצים משתנים לכל אורך פעילות הרעידה, בניגוד למצב של רעידה חלשה או ללא רעידה כלל, בו הקמרון מתייצב מיד. בזווית החיכוך הנמוכה (12°), במצבים ללא רעידה ועם רעידה חלשה ערכי התזוזות והמאמצים מתייצבים על אותו ערך, אך בהתייצבות התזוזות והמאמצים בסוף הרעידה החזקה ישנו פער משמעותי בערכי התזוזות והמאמצים.

4.3.5. מסקנות

בכל מצבי העמיסה ובכל מצבי רעידות האדמה שינוי זווית החיכוך לא גורם לשינויים בערכי התזוזות והמאמצים בזווית חיכוך הגדולות מ- 30° . מתחת ל- 30° מעלות נראה כי ככל שזווית החיכוך קטנה, התזוזות גדלות, אך בשונה מקמרונות 5,6 שינוי זווית החיכוך כמעט ואינו משפיע על המאמצים, לרבות המאמץ האופקי. הפעלת הרעידה החזקה גורמת לשינויים משמעותיים במאמצים ובתזוזות תוך כדי פעילות הרעידה והקמרון מתמוטט בזווית חיכוך גדולות יותר מאשר הזווית בו הוא נותר יציב במצב ללא רעידה ועם רעידה חלשה.

למרות השינויים שהוזכרו לעיל עקב הפעלת רעידות האדמה השונות, השינויים המשמעותיים מתרחשים בעקבות שינויי העומסים. אך גם שינויים אלה אינם גורמים לחוקיות שונה בהתנהגות המאמצים והתזוזות, אלא בערכי המאמצים.

נסכם את ההבדלים המשמעותיים בין שני מצבי העמיסה מיד בסיום פעילות רעידות האדמה, כאשר העומסים הנקודתיים על הבלוקים במצב העמיסה הגבוה גדולים במוצע פי 8.5 מאשר במצב העמיסה הנמוך.

- במצב עמיסה גבוה ישנן תזוזות אופקיות ואנכיות קטנות מאד (עד 3.5 מ"מ) גם בזווית החיכוך הקטנה ביותר בה עומד הקמרון (13°), לעומת התזוזות במצב העמיסה הנמוך בו התזוזות המקסימלית מגיעות לעשרות מ"מ, אך בזווית חיכוך נמוכה יותר (9°).

- המאמצים האופקיים והאנכיים המקסימליים המתפתחים בבלוקים במצב עמיסה גבוה, גדולים במוצע פי 6-8 ממצב העמיסה הנמוך.

מאמצי הלחיצה המקסימליים הנוצרים במרכזי הבלוקים אינם מתקרבים לתסבולת הלחיצה של אבני הקמרון ומגיעים למאמץ לחיצה מקסימלי של 2.4 מגפ"ס.

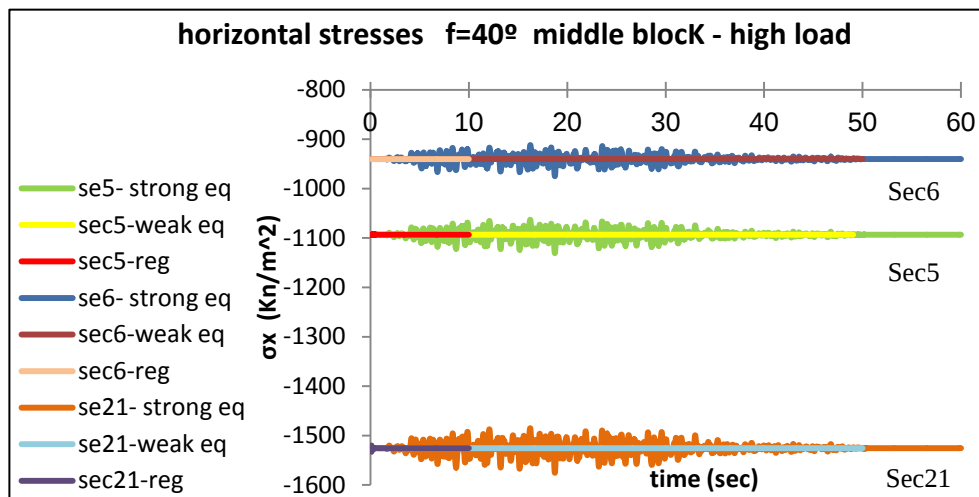
המאמץ המקסימלי הקיים בעקבי הקמרון הוא אנכי והוא גדול בערך פי 2 מהמאמץ האופקי וממאמץ הגזירה שדומים בערכם. העומס הגדול שעובר לקירות הוא עומס אנכי.

5. דיון

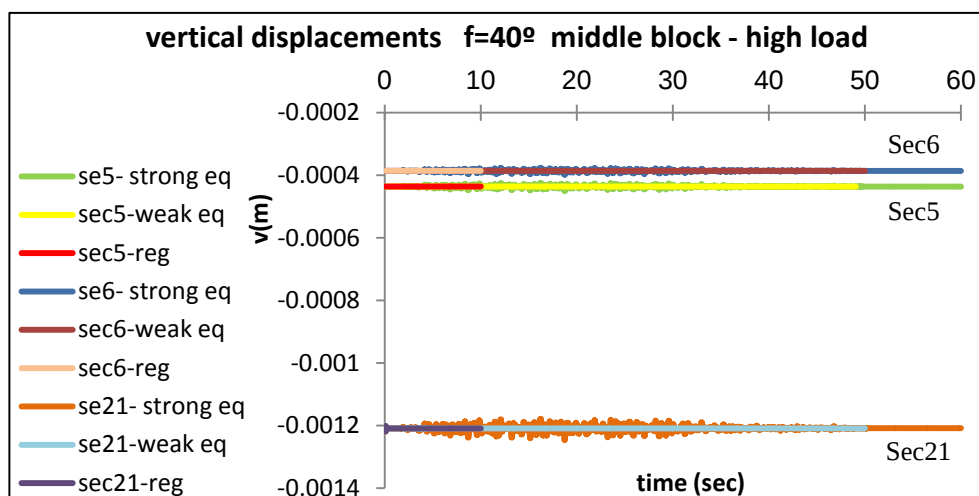
5.1. דיון בתוצאות

5.1.1. השפעת רעידות האדמה על ערכי התזוזות והמאמצים

ראינו בפרק התוצאות ובמסקנות של כל אחד משלושת הקמרונות כי לרעידות האדמה יש השפעה על התזוזות והמאמצים המתרחשים בבלוקים רק בזווית חיכוך מאד קטנות, או בהפעלת הרעידה החזקה בה יש שינויים גדולים בערכי התזוזות והמאמצים תוך כדי הרעידה. אך כאשר הקמרון מתייצב הוא מתייצב על ערכים קרובים מאד למצב ללא רעידה כלל וברעידה חלשה, מלבד שינויים קלים בזווית חיכוך נמוכות מאד. מדברים אלה ניתן להסיק כי הגורמים העיקריים המשפיעים על התזוזות והמאמצים המתפתחים באבני הקמרון הם העומסים הפועלים על הקמרון וזווית החיכוך בין האבנים. בתרשימים 5.1-5.2 ניתן לראות את השינויים המתרחשים בערכי המאמצים האופקיים והתזוזות האנכיות בבלוקי המפתח בזווית חיכוך של ארבעים מעלות תוך כדי רעידת האדמה החזקה, ואת ההתייצבות הסופית שדומה להתייצבות במצב הרעידה החלשה וללא רעידה כלל.



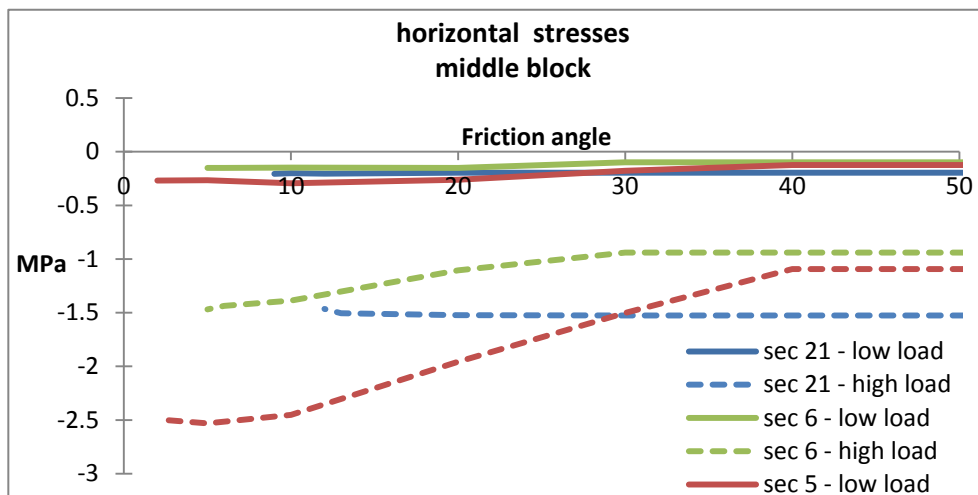
תרשים 5.1: גרף מאמצים אופקיים בבלוק המפתח (האמצעי) בזווית חיכוך של 40° בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידות האדמה



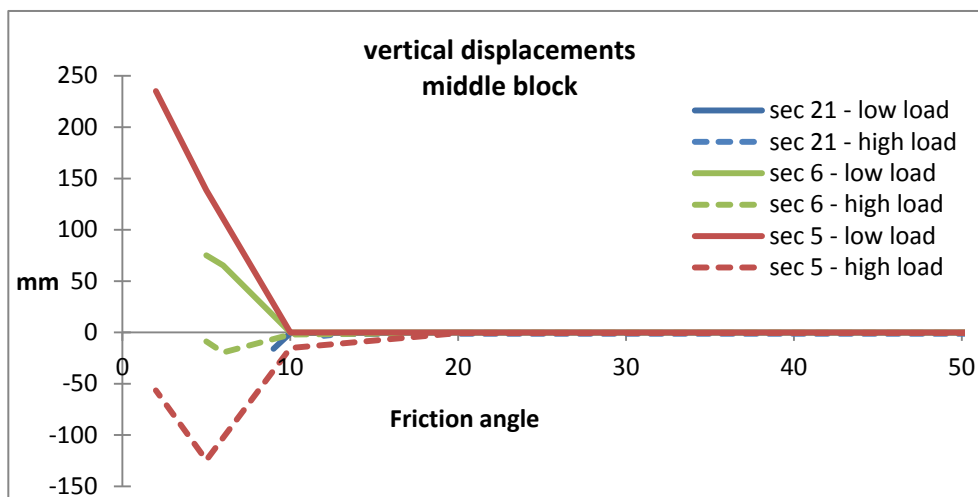
תרשים 5.2: גרף תזוזות אנכיות בבלוק המפתח (האמצעי) בזווית חיכוך של 40° בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידות האדמה

5.1.2. השפעת שינוי זווית החיכוך על ערכי התזוזות והמאמצים

בכל מצבי העמיסה ובכל מצבי רעידות האדמה שינוי זווית החיכוך לא גורם לשינויים בערכי התזוזות והמאמצים בזווית חיכוך הגדולות מ- 40° . מתחת ל- 40° מעלות נראה כי ככל שזווית החיכוך קטנה, התזוזות גדלות ובהתאמה גם המאמץ האופקי, למעט בקמרון 21 בו אין שינוי בערכי המאמץ האופקי בשינוי זווית החיכוך. רק בזווית חיכוך הקטנות מ- 12° - 10° מתרחשות תזוזות הנראות לעין שגדלות ככל שזווית החיכוך קטנה ויחד עם זאת נעלמת החוקיות הברורה בהתנהגות התזוזות. הסימטריה במאמצים נשמרת, אך השינויים בערכיהם קטנים וגדלים וקטנים ללא חוקיות ברורה. כפי שניתן לראות בתרשימים 5.3-5.4 המדגימים את האמור לעיל על בלוקי המפתח של הקמרונות בזווית חיכוך ובמצבי עמיסה שונים.



תרשים 5.3: גרף מאמצים אופקיים בבלוק המפתח (האמצעי) כנגד זווית החיכוך בשני מצבי העמיסה.



תרשים 5.4: גרף תזוזות אנכיות בבלוק המפתח (האמצעי) כנגד זווית החיכוך בשני מצבי העמיסה.

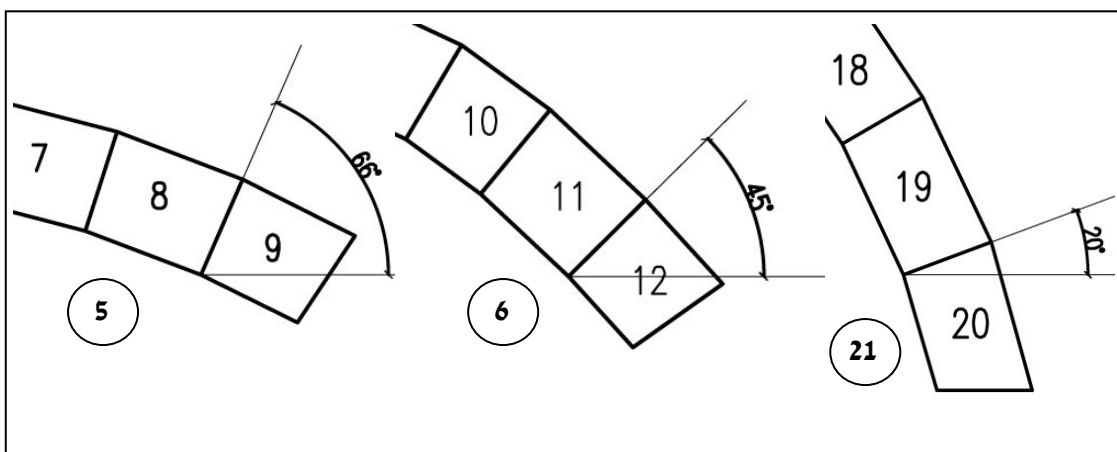
5.1.3. השפעת גיאומטריית הקמרון על ערכי התזוזות והמאמצים

בתרשים 5.3 ניתן לראות שקמרון 21 שמפתחו גדול פי 1.75 ועומסיו גדולים פי 2 מקמרון 5 במצב עמיסה גבוה, מגיע בבלוק האמצעי למאמץ לחיצה אופקי הזהה למאמץ הלחיצה האופקי בבלוק האמצעי של קמרון 5 בזווית חיכוך של 30° , וככל שזווית החיכוך קטנה המאמץ בבלוק האמצעי של קמרון 21 נשאר זהה ואילו המאמץ בבלוק האמצעי של קמרון 5 הולך וגדל ומגיע למאמץ הגדול פי 1.6 מזה הקיים בבלוק האמצעי של קמרון 21.

מסקנה נוספת העולה מתוך תוצאות המחקר היא השפעת זווית קווי המפגש בין הבלוקים על המאמצים המתפתחים בבלוקים בשינוי זווית החיכוך. הקטנת זווית החיכוך בקמרונות 5,6, שהם שטוחים יחסית, גורמת לתזוזות, לנעילת הקמרון ובהתאמה להגדלת מאמץ הלחיצה האופקי בבלוקים. התופעה מתרחשת בקמרון 5 בצורה המשמעותית ביותר ובקמרון 6, אך בקמרון 21 אין שינוי כלל במאמץ האופקי עם שינוי זווית החיכוך. צורת קמרון 21 היא חצי מעגלית, קו הלחיצה ממוקם בצורה טובה, ולכן במצב התחלתי הבלוקים נעולים כמעט לחלוטין, ולא משנה מהי זווית החיכוך ביניהם. יחד עם זאת ברגע שזווית החיכוך קטנה יחסית בשילוב עם מאמץ אופקי בבלוקים הקיצוניים שגורם לדחף אופקי מספיק גדול, הבלוק שליד הבלוק המקובע מחליק החוצה והקמרון מתמוטט. ולכן קמרון 21 אינו עומד בזווית חיכוך קטנות מאד (זווית החיכוך הקטנה ביותר בה הוא עומד במצב עמיסה נמוך היא 9° ובמצב עמיסה גבוה 12°) ואינו יכול לחוות תזוזות גדולות מאד כמו קמרון 6 שמתמוטט בזווית חיכוך של 5-6 מעלות וקמרון 5 שמתמוטט בזווית של 1-2 מעלות אך חווים שינויים של עשרות עד מאות מ"מ.

נראה שהסיבה לתזוזה של הבלוק שליד הבלוק הקיצוני המקובע נובעת מכך שהזווית בין הבלוקים הקיצוניים בקמרון 21 היא קטנה ואין סמך אופקי בגובה הזה שימנע את החלקת הבלוק מהקמרון בזווית חיכוך מאד נמוכות, כמו שקורה בקמרונות 5,6 שזווית המפגש של הבלוקים הקיצוניים גדולה יותר והמפגש ביניהם מהווה את הסמך האופקי. (תרשים 5.5)

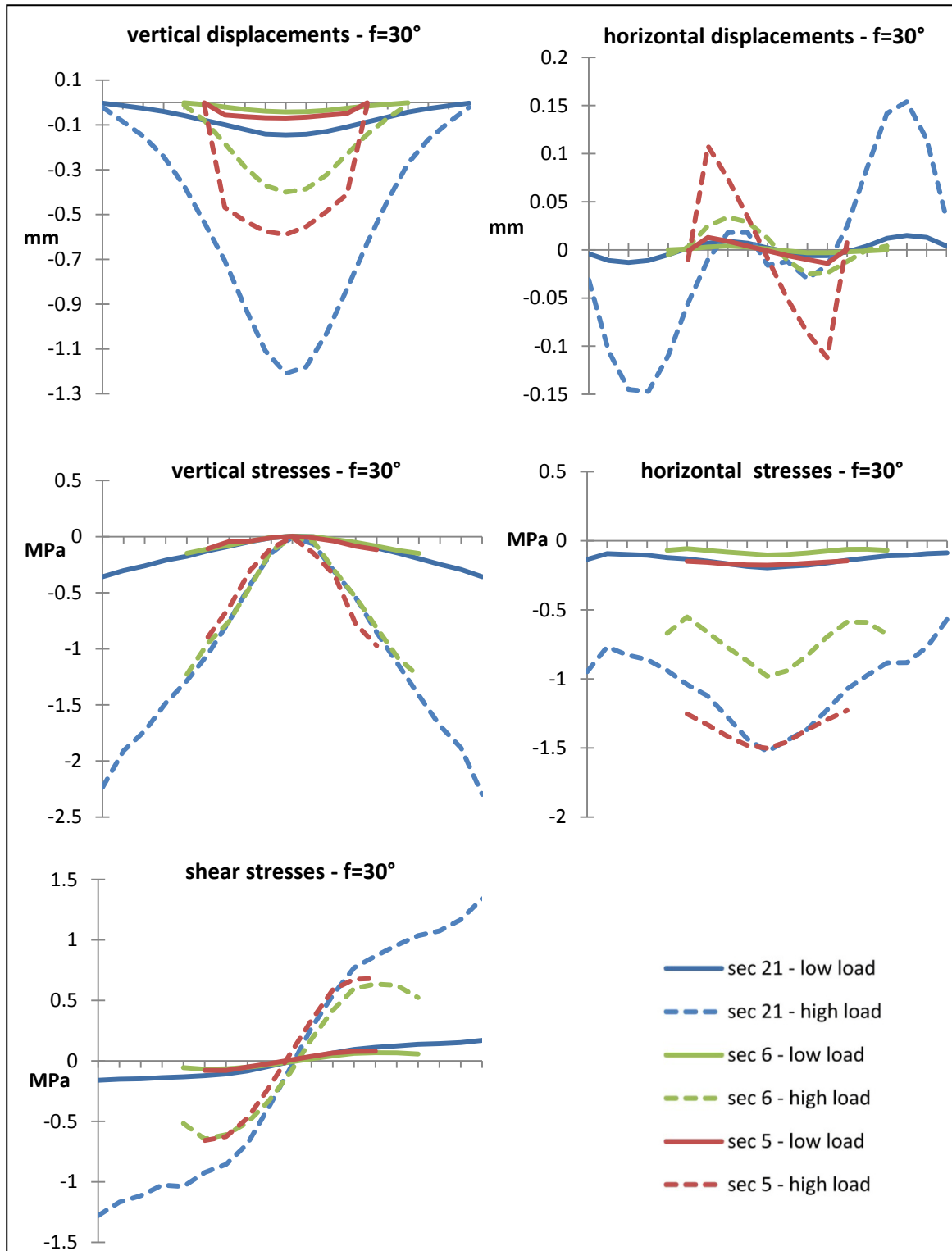
שילוב של זווית חיכוך קטנה מספיק עם דחף אופקי גדול מספיק יגרמו להחלקת הבלוק שליד הבלוק המקובע ולכן מצב העמיסה משפיע על זווית החיכוך הנמוכה ביותר בה עומד הקמרון במקרה של קמרון 21, בעוד שבקמרונות 5,6 מצב העמיסה אינו משפיע באופן משמעותי על זווית החיכוך הקטנה ביותר בה עומד הקמרון.



תרשים 5.5 : זווית קו המפגש בין הבלוקים הקיצוניים בקמרונות השונים

הדיון בתוצאות יתמקד בהבדלי התזוזות והמאמצים בין הקמרונות השונים. ההשוואה הפשוטה היא בין קמרונות 5 ו-6 מכיוון שהמפתח שלהם והעומסים הפועלים עליהם דומים מאד ולכן אפשר לבדד את השפעת הגיאומטריה על התזוזות והמאמצים, בעוד שהמפתח של קמרון 21 גדול פי כ-1.6 ממפתח קמרון 6 ולכן העומסים במצב עמיסה גבוה אותם הוא נושא גבוהים פי כ-1.6 ובמצב עמיסה נמוך פי כ-2.5 מהעומסים אותם נושא קמרון 6.

התוצאות המוצגות בתרשים 5.6 הן מיד לאחר התייצבות הקמרון ללא הפעלה של רעידת אדמה, בזווית חיכוך של 30° , בה כל הקמרונות שומרים על חוקיות ברורה בערכי התזוזות והמאמצים וזו גם זווית חיכוך מציאותית ומתאימה לאבן גיר. מכיוון שבכל קשת (חתך קמרון) יש מספר בלוקים שונה, הנקודה המשותפת לשלושת הקשתות היא אבן המפתח האמצעית ולא מוזכרים מספרי הבלוקים, כמו שראינו בגרפים עד כה.



תרשים 5.6: השוואה בין התזוזות והמאמצים המתפתחים בכל קמרון במצבי העמיסה השונים בזווית חיכוך של 30° .

0 סיכום ההשוואה:

- השינויים הגדולים והמשמעותיים נוצרים עקב שינוי מצב העמיסה. במצב העמיסה הגבוה התזוזות והמאמצים הרבה יותר גדולים, מלבד בזווית חיכוך מאד קטנות בקמרונות 5,6 בהן התזוזות מאד גדולות בשני מצבי העמיסה. בקמרון 21 מצב העמיסה הגבוה גורם להתמוטטות הקמרון בזווית חיכוך גדולה יותר, מה שלא קורה בקמרונות 5,6.
- חשוב לציין, כי שינוי מצב העמיסה כמעט ואינו משפיע על החוקיות בהתפתחות המאמצים והתזוזות בקמרונות השונים.
- כל הבלוקים נמצאים המצב של לחיצה בכיוון אופקי ובכיוון אנכי.
- בקמרון 21 מתפתחות התזוזות הגדולות ביותר כל עוד מדובר בזווית חיכוך גבוהות, אך התזוזות שנוצרות קטנות מאד ולא ניתן לראות אותם בעין בלתי מזוינת. התזוזות הקטנות ביותר מתרחשות בקמרון 6 ולא בקמרון 5 שנושא עומסים קטנים יותר. נראה כי ככל שהקמרון חביתי יותר (פחות שטוח) הוא נתון פחות לתזוזות.
- התזוזות הגדולות ביותר מתרחשות בזווית חיכוך מאד קטנות בקמרונות 5,6, זווית בהן קמרון 21 כבר אינו עומד.
- ההבדלים בגיאומטריית הקמרונות מבחינת היחס בין רדיוס הקמרון למפתחו (רמת המעגליות של הקמרון) משפיעים בעיקר על ערכי התזוזות המקסימליות, על זווית החיכוך הקטנה ביותר בה עומד הקמרון ועל המאמץ האופקי המתפתח בבלוקים, וכך, קמרון 5 שנושא את העומסים הקטנים ביותר מפתח תזוזות ומאמצי לחיצה אופקיים גדולים ביותר, אך עומד בזווית החיכוך הקטנות ביותר.
- המאמצים האנכיים ומאמצי הגזירה המתפתחים בבלוקים זהים במרכזי הקמרונות השונים, אך מכיוון שערכיהם המקסימליים מתפתחים בבלוקים הקיצוניים, ככל שהמפתח גדול יותר המאמץ המתפתח בקצות הקמרונות גדול יותר ולכן המאמצים האנכיים ומאמצי הגזירה המקסימליים בקמרון 21 גבוהים בהרבה מאשר בקמרונות 5,6.

0 מאמצי הלחיצה המקסימליים המתפתחים באבני הקמרון אינם מתקרבים לתסבולת לחיצה של אבן גיר (30-250MPa).

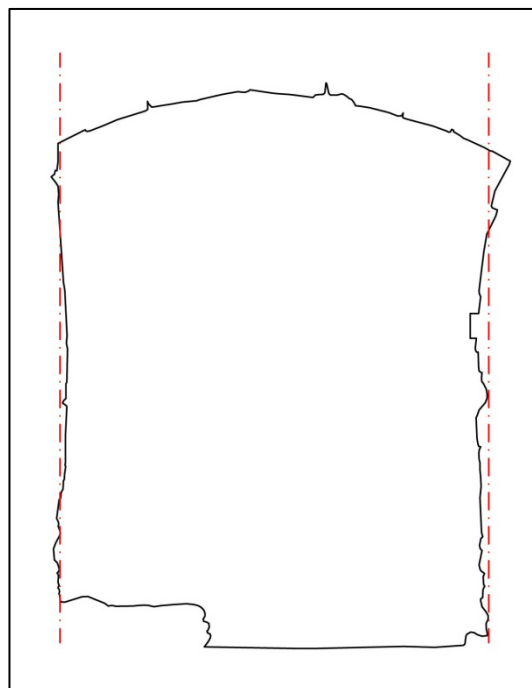
0 ככל שהקמרון מעגלי יותר הוא מפעיל עומסים אנכיים גדולים יותר ועומסים אופקיים גדולים פחות לסמכים.

5.1.4 הקשר בין התוצאות למפגעים הפיזיים הנראים בשטח

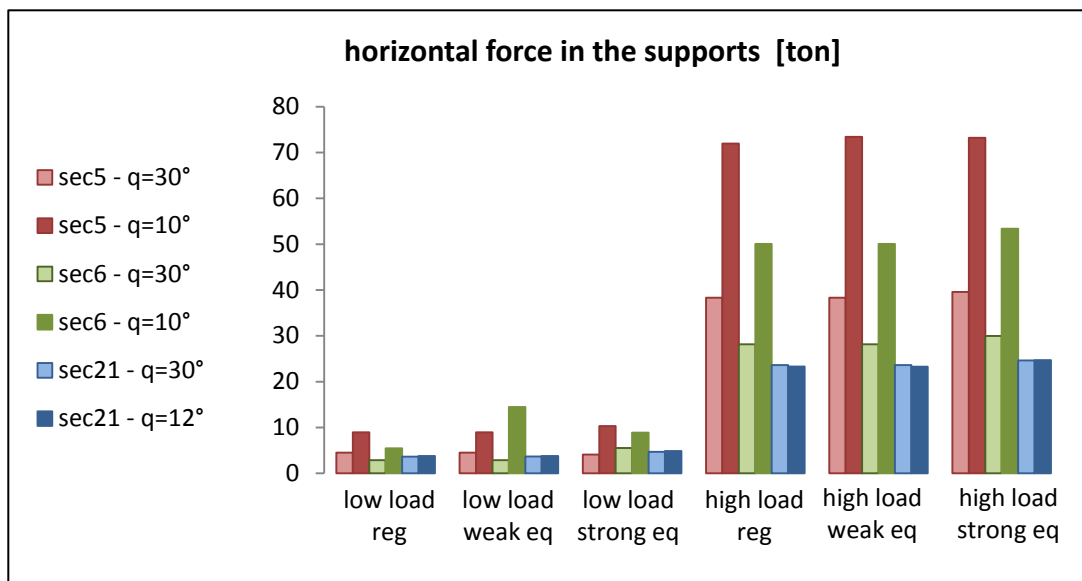
על פניו נראה כי קשת אבן היא מבנה מאד יציב, ולרעידות אדמה, במיוחד בארץ ישראל, שלא מתקרבות לעוצמת הרעידה החזקה שהופעלה בהדמיות, אין השפעה גדולה על יציבותן ואין סיבה למפגעים שנצפו בשטח, אך מהיכרות עם אזור המחקר ובפרט עם מקרי החקר ברור כי רעידות האדמה שהתרחשו בעבר גרמו לנזקים משמעותיים (ראה פירוט בפרק 1).

מה גרם למפגעים הפיזיים הנראים בשטח ומדוע תוצאות המחקר לא נותנות להם הסבר?

- 0 מכיוון שהמחקר מתבצע באמצעות הדמיות בשני מיימדים וחקירת הקמרונות נעשתה באמצעות חתך דו מימדי בצורת קשת, אין יכולת להבין מה גרם למפגעים שנצפו בשטח הקשורים בעומק הקמרון, כמו סדקי הפתיחה בכיוון צפון-דרום שהוא מימד העומק של הקמרונות.
- 0 שקיעה של אבנים מסויימות כמו שרואים בקמרון 21 לא נצפתה באף אחת מההדמיות של קמרון 21, אלא בקמרונות 5,6 בזווית חיכוך מאד נמוכות, ויש להניח שזה קשור לצורת בניית הקמרון בשונה מצורת בנייה של קשת עם שורה אחת של אבנים, כמו שנבנו המודלים בהדמיות. בקמרון, לכל אבן יש ממשק עם חמש אבנים לפחות, כאשר שתיים מהן בציר הקמרון, במקרה הנדון במימד העומק (צפון-דרום), והשאר בניצב לציר הקמרון (מזרח-מערב). בפעילות של רעידת אדמה מתרחשת תזוזה אופקית בכל הכיוונים ועל כן מתפתחים מאמצים בכל הכיוונים. מכאן שלכל אבני הבנייה המשיקות יש תפקיד באופן התזוזה של אבן בודדת בקמרון. הדמיה זו לא ניתן לבצע במודלים בשני מימדים.
- 0 ההנחה המשמעותית ביותר שעמדה בבסיס כל ההדמיות היא שהקשתות מוחזקות בנקודות עקבי הקמרון והבלוקים הקיצוניים אינם יכולים לזוז. וכך כאשר מפעילים רעידת אדמה התאוצה מופעלת בבלוקים עצמם כאשר הסמכים אינם זזים. במציאות הסמכים הם ראשי הקירות האנכיים עליהם יושב הקמרון ומעדויות בשטח ניתן לראות בברור כי בקמרונות 5,6 (ראה תרשים 5.7) ישנן דפורמציות משמעותיות בקירות האנכיים וברור כי הסמכים זזו במהלך רעידת אדמה או עקב אי יכולתם לעמוד בעומסים האופקיים הגבוהים הפועלים עליהם (ראה תרשים 5.8) עליהם. במקרה בו הסמכים של הקשת זזים, הקשת מתנהגת בצורה שונה לחלוטין מתוצאות ההדמיות וכל התזוזות של אבני הבנייה מושפעות מכך.



תרשים 5.7 : דפורמציות גדולות (עד 20 ס"מ) בקירות הנושאים את קמרון 5



תרשים 5.8: כח אופקי (טון) מקסימלי הפועל על הסמכים בשלושת הקמרונות בכל מצבי רעידת האדמה ובשתי זוויות חיכוך שונות: $\theta=10/12^\circ, \theta=30^\circ$

- 0 ההנחה בה העומס על הקמרון מפורס אחיד אינה תמיד נכונה, ולאורך השנים נבנים מבנים קרובים מאד לקמרון שיוצרים עליו עומסים נקודתיים. בנוסף, תופעת הנוזלות מעל הקמרונות שוטפת את מילוי האדמה וגורמת לחללים מעל אבני בנייה. מצב זה יוצר חוסר בשיווי משקל על הקמרון שמשפיע בהחלט על התזוזות והמאמצים המתפתחים באבני הבנייה.
- 0 מסתבר שההנחה הראשונית כי הסדקים הקיימים באבני הבנייה עצמן, נובעים ממאמצי לחיצה מאד גבוהים הנוצרים עקב עומסי בתי הרובע המוסלמי או עקב רעידת אדמה, אינה נכונה. מאמץ הלחיצה המקסימלי מבין כל ההדמיות שבוצעו נוצר בקמרון 5 בזמן רעידת אדמה חזקה והוא הגיע לכ- 6 מגפ"ס. מאמץ זה אינו מתקרב לתסבולת האבן ללחיצה שהיא 250-30 מגפ"ס.
- נראה כי הסדקים באבני הבנייה נובעים מריכוזי מאמצים שנוצרים משילוב של תזוזות חוזרות ונישנות של אבני הבנייה תוך כדי פעילות רעידת אדמה, עם חוסר בחומר מליטה או חומר מליטה שמתפורר בין אבני הבנייה וכך נוצר מגע נקודתי בין האבנים שמעביר את כל המאמץ בנקודה אחת וגורם לסדיקת האבן. עקב אי יכולת התוכנה להראות פירוס מאמצים בתוך כל בלוק, אין יכולת לראות מפגע זה בתוצאות ההדמיות.
- 0 ניתן להניח כי מכיוון שהקמרון בנוי כך שמכל צד במימד האורך של אבן הבנייה (ניצב לציר הקמרון, כיוון מזרח-מערב) יש יותר מאבן אחת, במצב של רעידה האבנים זזות באופן שונה ויוצרות מאמצי גזירה במרכז האבן (תרשים 5.9). בנוסף, יכול להיות שאבן זוה בצורה סיבובית ואז נוצר מגע בין פינה של אבן אחת עם מרכז האבן שלידה, וזה גורם לריכוז מאמץ גדול שעלול לסדוק את האבן.
- חומרי המליטה היוצרים מגע מלא בין אבני הבנייה ולעיתים גם יכולים לעמוד במאמצי מתיחה נשטפים עם השנים ויוצרים רווחים משמעותיים ושטחי מגע קטנים בין אבני הבנייה.
- בנוסף, מאמצי לחיצה הגבוהים מ- 2 מגפ"ס גורמים לריסוק חומר המליטה בין אבני הבנייה.

עקב אי יכולת התוכנה להראות פירוס מאמצים בתוך כל בלוק ולדמות את ממשק הבלוקים בעומק, אין יכולת לראות מפגע זה בתוצאות ההדמיות.



תרשים 5.9: סדיקה של אבני הבנייה בקמרון 5 כתוצאה מריכוזי מאמצים או מאמצי גזירה

0 יתכן כי ריסוק אבני הבנייה בעקבי הקמרון מתרחש בעקבות התפתחות מאמצי הגזירה הגדולים יחסית המתפתחים שם. ואף יכול להיות שקו הלחיצה בעקבי הקמרון מאד קרוב לפני האבן ולכן נוצר שם ריסוק. עקב אי יכולת התוכנה להראות פירוס מאמצים בתוך כל בלוק, אין יכולת לראות מפגע זה בתוצאות ההדמיות.

5.2. דיון בהיבט הנדסי - שימורי

ממצב קמרונו הגשר הגדול כיום ניתן להתרשם כי בהחלט מדובר במבנה יציב ומאסיבי שעבר מספר לא מועט של רעידות אדמה, וגם אם ניזוק המשיך למלא את תפקידו בעוד שהעומסים הפועלים עליו גדלים עם השנים.

אך חשוב לזכור כי הקמרונו אכן ניזוקו בעבר. אבני הבנייה התבלו, נחלשו ונסדקו והקמרונו איבדו אבני בנייה, נסדקו והתעוותו לאורך השנים, ועם כל הנתונים האלה צריך להיות בטוחים שהקמרונו יהיו מסוגלים להמשיך ולשאת את כל מה שמונח עליהם ולשמש כתקרה לכל מה שמצוי תחתם בזמן רעידת אדמה וקל וחומר באופן שוטף, ללא כל קשר לאסון טבע כזה או אחר.

מההדמיות ותוצאותיהן למדנו כי ישנם מספר גורמים המשפיעים על התפתחות המאמצים והתזוזות באבני הקמרון: גיאומטריית הקמרון, זווית החיכוך בין אבני הבנייה, מצבי עמיסה ופעילות רעידת אדמה. למדנו גם על מספר גורמים משמעותיים שאינם באים לידי ביטוי בהדמיות שבוצעו, אך משפיעים מאד על התנהגות מבנה קמרון: תזוזת הסמכים, ריכוזי מאמצים באבני הבנייה, שיווי משקל סטטי ונזילות.

בבואנו לטפל במבנה קמרון מאבן עלינו להתייחס לכל הגורמים המוזכרים לעיל ולנסות למזער את הנזקים הצפויים.

0 גיאומטריית הקמרון

גיאומטריית הקמרון לא ניתנת לשינוי, אך על פי הגיאומטריה הקיימת כל קמרון צריך לקבל טיפול שמתאים לנזקים הקיימים בו או הצפויים לו מאופן בנייתו וצורתו.

קמרונו חביתיים יותר, מנצלים את יכולת קירות האבן להעביר עומסים אנכיים גדולים לקרקע ובכך מצמצמים את הכח האופקי העובר לראשי קירות האבן ויוצר דפורמציות ללא סמכים אופקיים ראויים.

בנוסף, ממספר הדמיות שבוצעו על קמרון 21, כאשר הסמכים בשני צידי הקמרון לא באותו גובה, התקבל מצב בו הקמרון מתמוטט בזווית חיכוך גבוהות יחסית והוא הרבה פחות יציב ממצב של סימטריה בגובה הסמכים. מכאן שיש ליצור מצב של סימטריה ושיווי משקל במבנה הקמרונו. מצב זה ניתן לבצע באמצעות החדרת עוגנים לאבני הבנייה ושינוי הסכמה הסטטית של הקמרון.

0 תזוזת סמכים

בהתייחסות לתוצאות ההדמיות ניתן להסיק כי ברגע שהבלוקים הקיצוניים של הקמרונו אינם יכולים לזוז, יהיה קשה מאד לקמרונו להתמוטט. אמנם מתוצאות ההדמיות נראה כי קמרון 5 הוא הקמרון היציב ביותר שעומד בכל זווית חיכוך אפשרית ולמרות שמאמצי הלחיצה באבני הבנייה גבוהים יחסית, הם לא מתקרבים לתסבולת האבן ללחיצה. אך מאמצי הלחיצה האופקיים שמתפתחים באבנים עוברים כח אופקי גדול מאד לקירות האנכיים עליהם נסמך הקמרון, ולא תמיד יש סמך אופקי ראוי בצד השני שיכול לקבל אותם. במקרים כאלה כמו שרואים בחדרים 5,6 הקירות מתעוותים ואיתם גם הקמרון עצמו. ברור כי פעילות רעידת אדמה מגבירה את הכוחות האופקיים על הקירות ובמצב כזה קמרון אבן עלול להתמוטט לחלוטין.

בטיפול בקמרונו מסוג זה, ממולץ להוסיף תמיכות אופקיות לקירות האנכיים ובכך למנוע את התפתחות הדפורמציות בקירות האנכיים ואת תזוזת סמכי הקמרון.

תמיכות מסוג זה ניתן לבצע באמצעות מסגרות פלדה, בניית מימברנה מבטון בתחתית הקירות בשילוב מוטות מתיחה או לחיצה בעקבי הקמרון, או באמצעות החדרת עוגנים בתלות במה שנמצא מאחורי הקירות.

בכל מקרה יש לדאוג שקיר האבן יהיה עבה מספיק ושכל אבני הבנייה בו יעבדו כיחידה אחת. מצב זה מייצרים באמצעות טיפול שימורי באבני הבנייה, הזרקת חומרים מתאימים למילוי חללים בקיר ולעיתים אף מוטות מחומרים שונים לחיבור שני פני הקיר.

0 מצבי עמיסה

אמנם כיום אין שום יכולת לשלוט בעומסים הקיימים ושיתווספו בהמשך, אלא אם מדובר בקמרון שנמצא במפלס התחתון של מנהרות הכותל. אך ניתן לייצר עומס מפורס חלקי ושיווי משקל בעומסים הפועלים על הקמרון באמצעות מניעת חללים במילוי הקמרון.

עקב קיום נזילות בלתי פוסקות מעל הקמרונו וחדירת נוזלים לקמרונו עצמם, נשטף מילוי האדמה שקיים מעל הקמרונו ונוצרים חללים מעל אבני הקמרון שפוגעים בשיווי המשקל של העומסים. הדרך למנוע את הפגיעה בשיווי המשקל היא למלא את החללים בחומר נקבובי וקל יחסית שמסוגל להעביר את העומסים מלמעלה לאבני הקמרון ויחד עם זאת לאפשר לנוזלים לצאת.

0 זווית החיכוך בין אבני הבנייה

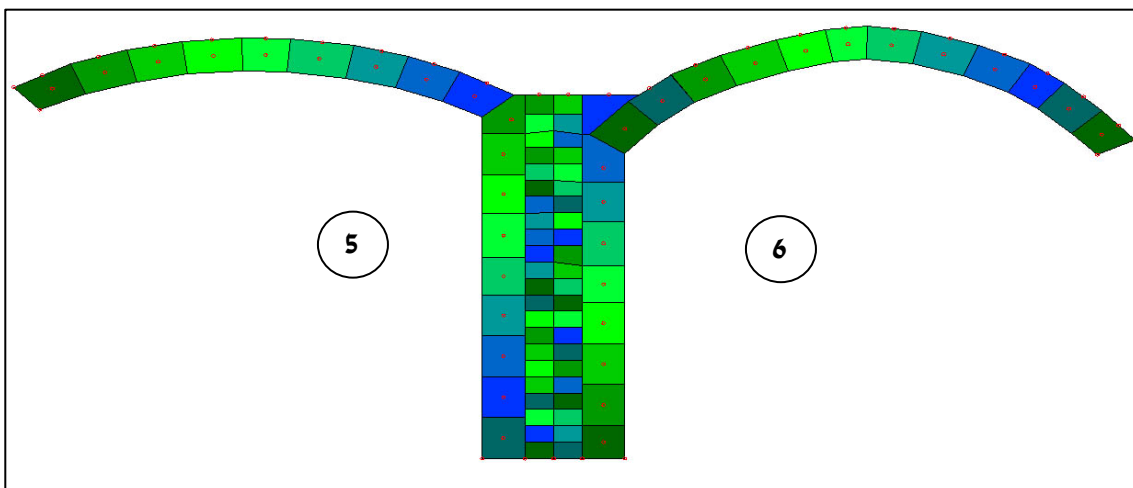
זווית החיכוך בין אבני הבנייה במבנים עתיקים מושגת באמצעות חומרי מליטה בין האבנים. מלכתחילה חומרי המליטה גורמים למעבר כוחות תקין, לחיבור, לגמישות ולהגנה על אבני הבנייה. חומרי המליטה מאד חלשים יחסית לאבני הבנייה ולכן במשך השנים הם נשטפים ומתבלים בעוד אבני הבנייה נשארות במקומן. בכדי לייצר זווית חיכוך מתאימה בין אבני הבנייה יש להקפיד על הימצאות חומרי מליטה חזקים מספיק בכל שטחי המגע בין אבני הבנייה.

0 ריכוז מאמצים באבני הבנייה

תופעת ריכוז המאמצים נובעת מתזוזה חוזרת של אבני הבנייה שנגרמת בעיקר בזמן רעידת אדמה, או עקב חוסר בשטח מגע מלא בין אבני הבנייה. אבני הבנייה אינן מסותתות ברמה מושלמת וכדי שהכוחות שעוברים בין אבני הבנייה יעברו באופן מלא דרך כל פני האבן דרוש שטח מגע מלא המושג באמצעות חומר מליטה. כאמור לעיל חומר המליטה לא תמיד מספיק חזק ועם השנים הוא מתבלה ונשטף. מתוצאות ההדמיות נראה שבכדי שחומר המליטה לא יתפורר עקב מאמצי לחיצה הגדולים מתסבולתו עליו להגיע לחוזק של 3 מגפ"ס. יחד עם זאת חומר המליטה צריך להיות נקבובי מספיק ולא חזק מדי, כדי למנוע את התרחשות תופעת התנדפות המים והתגבשות המלחים על אבני הבנייה. בנוסף, על חומר המליטה להיות נקבובי מספיק ולאפשר למים לצאת בקלות יחסית למניעת היקוות מים מעל פני הקמרון היוצרת לחצים גדולים על המבנה.

5.3. המשך עבודה

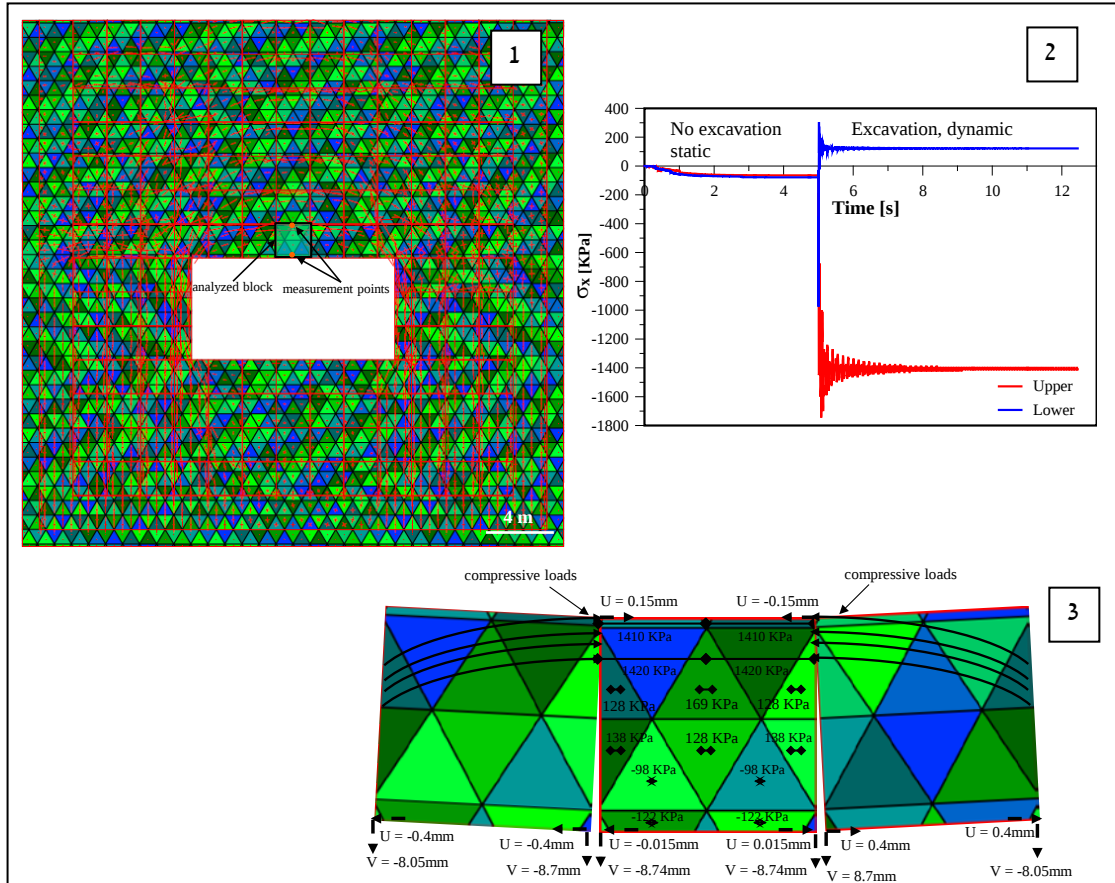
ניתן להעמיק את המחקר ולהגיע לתוצאות המתקרבות ומדמות את המציאות בצורה יותר טובה, אך הדבר דורש זמן מחקר נוסף ולעיתים גם יכולות טכנולוגיות שונות. המודלים שנבנו מדמים חלקית את המציאות בשטח. הגורמים העיקריים לחוסר התאמה של המודלים עם המציאות הם: העדר מימד העומק, העדר פירוס מאמצים בבלוקים, קביעת הסמכים בעקבי הקמרון ולא בתחתית הקירות עליהם נסמכים הקמרונות, ומשחק עם העומסים הפועלים על הקמרון. 0 בעבודה זו נבנה מודל המחבר את קמרונות 5 ו-6 (תרשים 5.10) במטרה להפעיל את תאוצת הקרקע ברעידת האדמה בבסיס הקיר המשותף. נושא רחב זה הינו נושא לעבודה נפרדת ולכן לא נידון בעבודה זו.



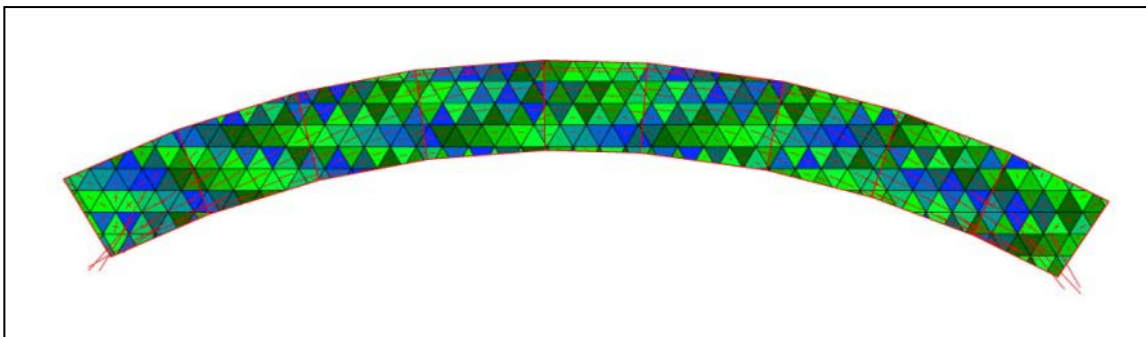
תרשים 5.10 : מודל של קמרונות 5 ו-6 כפי שנבנה ב-2D-DDA

0 העדר פירוס המאמצים בבלוקים אינו מאפשר לראות את מיקום קו הלחיצה בקשת ואת השינוי בפירוס המאמצים המתרחש עקב שינויי העומסים והגיאומטריה. בחינת היווצרות ריכוזי המאמצים באבני הבנייה יכולה ללמד הרבה על התנהגות הקמרון והגורמים לסדיקת האבנים.

המשך המחקר עם תוכנה בעלת יכולת ניתוח פיזור מאמצים כמו שיטת Numerical Manifold Method (NMM), תיתן הבנה מעמיקה ותמונה אמיתית יותר של התנהגות מבני אבן. (תרשימים 5.11,5.12)



תרשים 5.11: דוגמה לתוצאות הדמיה ב-NMM של התייצבות תקרת סלע מיד לאחר הוצאת חלק ממסת הסלע ויצירת חלל. 1. מיקום הבלוק הנבדק במרכז תקרת הסלע. 2. גרף התנהגות המאמצים האופקיים כנגד הזמן בבלוק הנבדק. 3. המאמצים האופקיים והתזוזות שהתפתחו בבלוק הנבדק. (Tal, Hatzor et al. 2014)



תרשים 5.12: דוגמה לנסיון ראשוני של הדמיה ב-NMM של קמרון 5. ניתן לראות את פירוס המאמצים בתוך כל בלוק.

0 העדר מימד העומק מחייב אותנו לבחון התנהגות קמרון אבן כקשת. בהרבה פרמטרים זה מדמה את מעבר הכוחות בקמרון, אך בכל זאת אבני הבנייה בקמרון משולבות באופן שונה מאשר בקשת ולכן מעבר הכוחות וכנראה שגם המפגעים מושפעים מכך. דוגמא קטנה שמראה את ההבדל בצורה הטובה ביותר היא מציאות בה חסרות אבני בנייה בקמרון והוא ממשיך לתפקד כרגיל ולשאת עומסים גבוהים מאד, בעוד קשת שמאבדת אבני בנייה מתמוטטת באופן מיידי.

היכולת למדל גורמים אלה ולהמשיך את המחקר תיתן הבנה מעמיקה יותר של התנהגות של קמרון אבן, במיוחד ברעידות אדמה, תאפשר טיפול הנדסי ושימורי מתאים יותר בקמרונות אבן עתיקים וכמובן תמזער נזקים מבניים בעתיד.

6. סיכום ומסקנות

בחקירה של מבנים שנבנו לפני כאלפיים שנה ועברו שינויים ותיקונים לאורך השנים כמו גם מספר רב של רעידות אדמה, בשילוב שינויי עומסים ונזילות קשות של חומרים שונים ואי ידיעה ברורה, גם כיום, של העומסים המדויקים ומיקומם הפועלים על מבנים אלו, ישנו קושי גדול בבניית מודלים המדמים את המציאות וכמובן מודלים שיכולים לנתח לאחור מה עבר על מבנים אלו והביא אותם למצב בו הם נמצאים כיום.

באזור הר הבית ובפרט בקמרונות הגשר הגדול, יש עדויות פיזיות רבות לנזקים מבניים שנגרמו ככל הנראה מפעילות של רעידות אדמה.

על מנת לייצב מבנה היסטורי במצבו הנוכחי וכמובן שעל מנת למנוע את קריסתו בזמן רעידת אדמה עתידית, יש להבין איך עוברים הכוחות במבנה ומהם הגורמים המשפיעים על התנהגותו.

על מנת להשיג הבנה בסיסית זו, נבנו שלושה מודלים המדמים שלושה קמרונות שונים במערכת הגשר הגדול במנהרות הכותל.

תוצאות ההדמיות שפכו אור על התנהגות של קשת אבן מבחינת תזוזות ומאמצים המתפתחים באבני הבנייה, אך יחד עם זאת לא נתנו אינדיקציה מספיק טובה על ההשפעה של פעילות רעידת אדמה על מבנים מסוג זה. הסיבה לכך נעוצה בעיקר בסימני שאלה רבים הקיימים בשטח בשילוב עם מגבלות תוכנת המידול, והתאמת הפרמטרים הקיימים במציאות לאפשרויות התוכנה.

הר הבית הוא המקום הקדוש ביותר ליהודים, והשלישי בקדושתו לאסלאם הסוני. ועל כן הוא מקום בעל רגישות דתית ופוליטית בינלאומית גבוהה מאד, והמתחם עמד ברקע לסכסוכים רבים בין יהודים וערבים לאורך השנים.

כשל מבני נקודתי וכמובן התמוטטות בקנה מידה גדול יותר עלולים לגרום, מלבד אפשרות הפגיעה באנשים הגרים מעל מתחם מנהרות הכותל ובמבקרים הרבים המצויים בתוכו, לכאוס פוליטי ובטחוני גדול מאד.

בשל כך, לעמידות המבנים ההיסטוריים באזור זה, הבנויים בעיקר ממבני קמרונות, חשיבות גדולה יותר מכל מקום אחר.

ההבנה העמוקה יותר של התנהגות קמרון אבן מאפשרת את שיפור הטיפול ההנדסי והשימורי שניתן למבנים מסוג זה. וכמובן שתמזער את נזקי רעידת האדמה הבאה.

מקורות ספרותיים

- און, א', & וקסלר-בדולח, ש'. (2010). קשת וילסון והגשר הגדול בימי הבית השני ובתקופה הרומית לאור חפירות חדשות. (ה' גבע, עורך) *קדמוניות* (140), 109-122.
- בהט, ד'. (2000). *אטלס כרטא הגדול לתולדות ירושלים*. ירושלים, ישראל: כרטא.
- בהט, ד'. (2003). *מנהרות הכותל המערבי*. הקרן למורשת הכותל המערבי, משרד הבטחון.
- בן-יוסף, ס'. (1980). *מדריך ישראל: יהודה* (כרך ט). (ס' בן-יוסף, עורך) ירושלים, ישראל: כתר, משרד הבטחון.
- גבירצמן, ז', & זסלבסקי, י'. (2009). *מפת האזורים החשודים בהגברות שתית חריגות: דברי הסבר, דו"ח לועדת ההיגוי להערכות לרעידות אדמה עבור ת"י 413*.
- המכון הגיאולוגי הישראלי. אוחזר מתוך www.gsi.gov.il
- המכון הגיאופיזי לישראל. מתוך דברי הסבר למפת תאוצות השיא לתקן הישראלי 413, אוחזר מתוך www.gii.co.il
- מכון התקנים הישראלי (מת"י). (2004). ת"י 413: תכן עמידות מבנים ברעידת אדמה (מפת היישובים ב-ג"ת 2).
- סולומון, א'. (2011). המראה מתחת לקשת: האם קשת וילסון היא מימי הבית השני? (א' ברוך, א' לוי-רייפר, & א' פאוסט, עורכים) *חידושים בחקר ירושלים* (17), עמ' 287-309.
- סנה, ע', & אבני, י'. (2011). ירושלים, מפה גיאולוגית של ישראל 50,000: 1: (ii-11).
- רובין, ר'. (2000). *ספר ירושלים: תקופת המקרא*. (ש' אחיטוב, & ע' מזר, עורכים) ירושלים: יד יצחק בן צבי.
- שפירא, א'. (2008). *סיכוני רעידת אדמה במדינת ישראל*. אוחזר מתוך היערכות לרעידת אדמה, המרכז למיפוי ישראל: www.eqred.gov.il

- Amiran, D., Arie, E. and Turcotte, T. (1994). Earthquakes in Israel and Adjacent Areas: Macroseismic Observations since 100 B.C.E. *Isr. Explor J.*, 44(3-4), 260-305.
- Bakun-Mazor, D., et al. (2009). Modeling mechanical layering effects on stability of underground openings in jointed sedimentary rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2): 262-271.
- Bao, H., Yagoda-Biran, G., and Hatzor, Y. H. (in press). Site response analysis with two-dimensional numerical discontinuous deformation analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Beer M. and Meek J. L. Design curves for roofs and hanging-walls in bedded rock based on Voussoir beam and plate solutions. *Trans Instn Min. Metall.* 1982; 91 (A):18-22.

- Ben-Menahem, A. (1991). Four thousand years of seismicity along the dead sea rift. *J. Geophys. Res.*, 96(B12), 20,195-20,216.
- Bicanic, N., Stirling, C. and Pearce, C. J. (2003). Discontinuous modelling of masonry bridges. *Computational Mechanics*, 31(1 - 2), 60-68.
- Blasi, C. and Foraboschi, P. (1994). Analytical approach to Collapse Mechanisms of Circular Masonry Arch. *J. Struct. Eng.*, 120(8), 2288-2309.
- Boothby, T. E., Domalik, D. E. and Dalal, V. A. (1998). Service load response of masonry arch bridges. *J. Struct. Eng, ASCE*, 124(1), 17-23.
- Brady B. H. G. and Brown E. T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, 2004
- Clemente, P. (1998). Introduction to dynamics of stone arches. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 27, 513-522.
- De Luca, A., Giordano, A. and Mele, E. (2004). A simplified procedure for assessing the seismic capacity of masonry arches. *Engineering Structures*, 26(13), 1915-1929.
- Evans W. H. The strength of undermined strata. *Trans. Inst. Min. Metal*. 1941; 50:475-500
- Heyman, J. (1982). *The Masonry Arch*, Ellis Horwood Limited, Chichester
- Hooke, R. (1675). *A description of helioscopes, and some other instruments*. London.
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 283-353.
- Kamai, R. and Y. H. Hatzor (2008). Numerical analysis of block stone displacements in ancient masonry structures: a new method to estimate historic ground motions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32: 1321-1340.
- Law, H. K. and Lam, I. P. 2003. Evaluation of seismic performance for tunnel retrofit project. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 129, 575-589.
- MacLaughlin, M. M. and Doolin, D. M. (2005). Review of validation of the Discontinuous Deformation Analysis (DDA) method. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 29.
- Shi, G.-h. (1988). Discontinuous Deformation Analysis – a new numerical method for the statics and dynamics of block system [Ph.D. thesis]: Berkeley, University of California
- Shi, G.-H. (1993). *Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis*, Computational Mechanics Publication, Southampton, UK

- Shi, G.-h. and Goodman, R. E. (1989). The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 13, 131-158.
- Sinopoli, A., Corradi, M. and Foce, F. (1997). Modern formulation for preelastic theories on masonry arches. *J. Engrg. Mech, ASCE*, 123(3), 204.
- Sofianos I. Analysis and design of an underground hard rock Voussoir beam roof. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1996; 33 (2):153-166.
- Tal, Y., Y. H. Hatzor and X.-T. Feng (2014). An improved numerical manifold method for simulation of sequential excavation in fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 64: 116 – 128.
- Tsesarsky, M. and M. L. Talesnick (2007). Mechanical response of a jointed rock beam – Numerical study of centrifuge models. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(8): 977-1006.
- Tsesarsky, M. and Y. H. Hatzor (2006). Tunnel roof deflection in blocky rock masses as a function of joint spacing and friction - A parametric study using discontinuous deformation analysis (DDA). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(1): 29-45.
- Vilnay, O. and Cheung, S.-S. (1986). Stability of Masonry Arches. *J. Struct. Eng, ASCE*, 112(10), 2185-2199.
- Vilnay, O. (1988). Dynamic behavior of three-voussoir arch. *J. Struct. Eng, ASCE*, 114(5), 1173-1186.
- Yagoda-Biran, G. and Hatzor, Y.H., 2010. Constraining paleo PGA values by numerical analysis of overturned columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39: 462-472.
- Young, R. M.-C. (1996). Discontinuous Deformation Analysis Programs, version 96, User's manual.
- Zaslavsky, Y. and Shapira, A. (2000). Experimental study of topographic amplification using the Israel seismic network. *Jouranl of Earthquake Engineering*, 4(1), 43-65.