

תקציר

בנישוב רוחות, חזקות, בעונת החורף, נפגעים לעתים, בצורה זו או אחרת, בתי-צמיחה רבים: יריעות פלסטיק נקרעות, עוגנים נשלפים, אלמנטים שונים נשברים, ובמקרים חמורים השלד כולו קורס. מטרת התכנית הנוכחית הנה מציאת דרכים להגברת עמידות בתי הצמיחה השונים ברוחות חזקות.

עמידות בתי-הצמיחה תלויה בגורמים רבים: צורת המבנה, חוזק השלד (הקונסטרוקציה), סוג וחוזק היריעה המכסה, החיבורים בין היריעה והשלד והחיבורים בין המבנה לקרקע וכמובן מהירות הרוח וכיוונה.

לשם קבלת דרכים ופתרונות נכונים להגברת עמידות החממות בפני רוחות חזקות, יש צורך לדעת את פירוס הכוחות של הרוח על המבנה ואת עוצמתם בחלקיו השונים. דבר זה מאפשר חישוב המאמצים והמומנטים בכל חלקיו וכן חישוב המאמצים ביריעה המכסה.

ידעת המאמצים והמומנטים מאפשרת לאתר נקודות חלשות בשלד ולתכנן בית-צמיחה יותר עמיד. ניתן לקבל את הנ"ל בשתי דרכים: 1. בדרך חישובית, למשל באמצעות תוכנת חישוב הנעזרת בשיטת האלמנטים הסופיים. 2. בדרך מעשית, באמצעות מדידת הכוחות הפועלים בפועל על מבנה החממה בשעת נשיבת רוח חזקה, ודרכם חישוב המומנטים, המאמצים וכו'.

בתכנית הנוכחית, הופעלו שתי הדרכים הנ"ל: א. הדרך החישובית - הוכן מודל, בתוכנת אלמנטים סופיים, ANSYS, לחישוב המאמצים, הכוחות והמומנטים בנקודות שונות בחממות בעלות גיאומטריות שונות. המודל הופעל על שני מודלים של מנהרות עבירות וכן על שתי צורות אופייניות של חממות - חממה עם גג בעל אלמנטים קשתיים וחממה עם גג דו-שיפועי, שניהם בקנה מידה של 1:1. על בתי-צמיחה אלו הופעלו (בהרצות מחשב) כוחות רוח בפריסה שנלקחה בשלב זה מתקנים בין-לאומיים. הבדיקות החישוביות נעשו במערכות דו ותלת ממדיות של אלמנטים סופיים ונתגלו מספר נקודות תורפה בבתי הצמיחה הנ"ל. באמצעות מודל חישובי זה הוספו למבנה ונבדקו אלמנטים שונים וכן חוזקו אלמנטים אחרים. לבסוף נתקבלו מספר דרכים מעשיות להגברת החוזק של נקודות התורפה הנ"ל.

ב. הדרך הניסויית - נבנו המודלים המעשיים, ז.א. הממשיים, הבאים: 1. קשת למדידת העברת הכוחות מהכיסוי לקונסטרוקציה (מודל דו-ממדי מוקטן של מנהרה עבירה), 2. מנהרה עבירה (מודל תלת-ממדי מוקטן) ו-3. מנהרה עבירה בקנ"מ 1:1, הכוללת 6 קשתות ברדיוס של 3 מ' כ"א ובעלת אורך של 15 מ'. המנהרה כוסתה בכיסוי גמיש והותקנו בה מערכות למדידת כוחות הרוח בנקודות שונות של הקשתות ובכיסוי עצמו. ליד החממה הוצב מד רוח הכולל גם מד כיוון.

בשני המודלים הממשיים המוקטנים הנ"ל, נתקבלו הכוחות והמאמצים הפועלים על הקונסטרוקציה. במנהרה העבירה הגדולה נתקבלו עד כה רק תוצאות מעטות ביחס להשפעת הרוח על הריאקציות של המבנה. עדיין אין תוצאות מעשיות לגבי השפעת הכיסוי הגמיש על המומנטים והכוחות הפועלים בקשתות, בגלל כניסה לעונה חסרת רוחות חזקות ובגלל בעיות באמצעי המדידה. נראה שיש להמשיך ולבדוק נקודה זו בחורף הקרוב.

בסיכום ניתן לאומר שבאופן כללי הבעיות בעמידות בתי הצמיחה מתרכזות באזורי החיבור שבין הקירות או ה"מרפסות" לגגות, בחוזק קורות ה"מרפסות" עצמן וכן בחיבורי בית הצמיחה לקרקע - עיגון העמודים, הסמנת היריעה בהיקף ועוד. יש בידנו כיום מודל חישובי שניתן באמצעותו להגיע לאופטימיזציה מבחינת החוזק של מבני בתי-צמיחה שונים.

המכון להנדסה חקלאית
המחלקה להנדסת הסביבה

הגברת החוזק הסטאטי והדינמי של מבני חממות
פרויקט מס. 459-2909-97

ד"ר מסכם לשנים 1995-97

מאת

ע. יקותיאל, י. קלינמן, ל. דובינסקי, ת. ברס וג. פלזנשטיין

תקציר

בנשוב רוחות חזקות, בעונת החורף, נפגעים לעתים, בצורה זו או אחרת, בתי-צמיחה רבים: יריעות פלסטיק נקרעות, עוגנים נשלפים, אלמנטים שונים נשברים, ובמקרים חמורים השלד כולו קורס. מטרת התכנית הנוכחית הנה מציאת דרכים להגברת עמידות בתי הצמיחה השונים ברוחות חזקות.

עמידות בתי-הצמיחה תלויה בגורמים רבים: צורת המבנה, חוזק השלד (הקונסטרוקציה), סוג וחוזק היריעה המכסה, החיבורים בין היריעה והשלד והחיבורים בין המבנה לקרקע וכמובן מהירות הרוח וכיוונה.

לשם קבלת דרכים ופתרונות נכונים להגברת עמידות החממות בפני רוחות חזקות, יש צורך לדעת את פירוס הכוחות של הרוח על המבנה ואת עוצמתם בחלקיו השונים. דבר זה מאפשר חישוב המאמצים והמומנטים בכל חלקיו וכן חישוב המאמצים ביריעה המכסה.

ידיעת המאמצים והמומנטים מאפשרת לאתר נקודות חלשות בשלד ולתכנן בית-צמיחה יותר עמיד. ניתן לקבל את ה"ל בשתי דרכים: 1. בדרך חישובית, למשל באמצעות תוכנת חישוב הנעזרת בשיטת האלמנטים הסופיים. 2. בדרך מעשית, באמצעות מדידת הכוחות הפועלים בפועל על מבנה החממה בשעת נשיבת רוח חזקה, ודרכם חישוב המומנטים, המאמצים וכו'.

בתכנית הנוכחית, הופעלו שתי הדרכים ה"ל: א. הדרך החישובית - הוכן מודל, בתוכנת אלמנטים סופיים, ANSYS, לחישוב המאמצים, הכוחות והמומנטים בנקודות שונות בחממות בעלות גיאומטריות שונות. המודל הופעל על שני מודלים של מנהרות עבירות וכן על שתי צורות אופייניות של חממות - חממה עם גג בעל אלמנטים קשתיים וחממה עם גג דו-שיפועי, שניהם בקנה מידה של 1:1. על בתי-צמיחה אלו הופעלו (בהרצות מחשב) כוחות רוח בפריסה שנלקחה בשלב זה מתקנים בין-לאומיים. הבדיקות החישוביות נעשו במערכות דו ותלת ממדיות של אלמנטים סופיים ונתגלו מספר נקודות תורפה בבתי הצמיחה ה"ל. באמצעות מודל חישובי זה הוספו למבנה ונבדקו אלמנטים שונים וכן חוזקו אלמנטים אחרים. לבסוף נתקבלו מספר דרכים מעשיות להגברת החוזק של נקודות התורפה ה"ל.

ב. הדרך הניסויית - נבנו המודלים המעשיים, ז.א. הממשיים, הבאים: 1. קשת למדידת העברת הכוחות מהכיסוי לקונסטרוקציה (מודל דו-ממדי מוקטן של מנהרה עבירה), 2. מנהרה עבירה (מודל תלת-ממדי מוקטן) ו3. מנהרה עבירה בק"מ 1:1, הכוללת 6 קשתות ברדיוס של 3 מ' כ"א ובעלת אורך של 15 מ'. המנהרה כוסתה בכיסוי גמיש והותקנו בה מערכות למדידת כוחות הרוח בנקודות שונות של הקשתות ובכיסוי עצמו. ליד החממה הוצב מד רוח הכולל גם מד כיוון.

בשני המודלים הממשיים המוקטנים ה"ל, נתקבלו הכוחות והמאמצים הפועלים על הקונסטרוקציה. במנהרה העבירה הגדולה נתקבלו עד כה רק תוצאות מעטות ביחס להשפעת הרוח על הריאקציות של המבנה. עדיין אין תוצאות מעשיות לגבי השפעת הכיסוי הגמיש על המומנטים והכוחות הפועלים בקשתות, בגלל כניסה לעונה חסרת רוחות חזקות ובגלל בעיות באמצעי המדידה. נראה שיש להמשיך ולבדוק נקודה זו בחורף הקרוב.

בסיכום ניתן לאומר שבאופן כללי הבעיות בעמידות בתי הצמיחה מתרכזות באזורי החיבור שבין הקירות או ה"מרפסות" לגגות, בחוזק קורות ה"מרפסות" עצמן וכן בחיבורי בית הצמיחה לקרקע - עיגון העמודים, הסמנת היריעה בהיקף ועוד. יש בידנו כיום מודל חישובי שניתן באמצעותו להגיע לאופטימיזציה מבחינת החוזק של מבני בתי-צמיחה שונים.

1. מבוא

לעתים, בנשוב הרוחות החזקות של החורף, נפגעים בתי-צמיחה רבים. בדרך כלל נקרעות היריעות המכסות את המבנים ולפעמים נשברים חלקים שונים אך במקרים קיצוניים קורס המבנה כולו.

הרוח הנושבת גורמת לעומסים על מבני החממה התלויים במהירותה ובגיאומטריה של המבנה. בתקנים הבינלאומיים קיימים נתונים של מקדמי-כוחות הרוח לגבי מבנים שונים, כולל חממות. אלא שהתקנים מתייחסים לגגות בעלי כיסויים קשיחים (זכוכית, פוליקרבונט וכו') ולא לגבי כיסויים גמישים כגון פוליאתילן וכו'. בכיסוי גמיש הכוחות הנוצרים עקב הרוח והמועברים למבנה, הנם שונים באופיים ובמיקומם מאלה של הכיסוי הקשיח. לדוגמא, הכיסוי הגמיש מתרומם באזור שיא הגג עקב כוחות יניקה שיוצרת הרוח, ומתנתק משלד החממה באזור זה. כתוצאה מכך הכוחות הנוצרים בכיסוי עצמו מועברים לשלד החממה בעיקר במקומות החיבור של היריעה לשלד בניגוד למה שקורה בכיסוי הקשיח, הצמוד בכל המקומות לשלד.

כאמור רוב תקני בתי הצמיחה מתייחסים לכיסוי המבנה כאל חומר קשיח. ריצרדסון וויסטגיט (1986) ורוברטסון ואוקסי (1992) מאנגליה ואחרים, טוענים שגישה זו לא נכונה. בכיסוי גמיש, הנהוג בבתי צמיחה רבים בעולם, כוחות הרוח המועברים דרכו לקונסטרוקציה שונים מאלו שבכיסוי קשיח, ולכן את החישובים יש לערוך בהתאם למקדמי כיסוי גמיש.

במוסדות מחקר שונים בעולם חוקרים את נושא העברת הכוחות בכיסוי גמיש ומטפלים בהכנת מקדמי חישוב מתאימים למקרה זה.

ידעת הפירוס הנכון מאפשרת ביצוע חישובי מאמצים ומומנטים בכל חלקי המבנה וכן חישוב המאמצים ביריעה המכסה. ניתן יהיה לאחר מכן לחזק נקודות תורפה ולתכנן קונסטרוקציות אופטימליות לחממות.

גורמים רבים קובעים את עמידות או חוזק המבנה: צורתו הכללית, חוזק השלד, מבנה יריעת או חומר הכיסוי, חוזקו, צורת חיבור המבנה לקרקע ועוד.

בעיה אחרת היא המורכבות של בית הצמיחה. שלד בית הצמיחה מורכב מאלמנטים רבים (קשתות, מוטות, קורות ועמודים) המחברים זה לזה בצורות שונות. נוסף לכך הכל מכוסה ביריעות גמישות המחברות בצורות שונות. חישוב כולל של הקורה בבית הצמיחה, בנשוב רוח חזקה, הוא דבר מסובך.

המחייב שימוש באמצעי חישוב מיוחדים. לשם הגברת עמידות החממות בפני רוחות חזקות יש צורך, אם כן, לדעת בראש וראשונה את פירוס כוחות הרוח על המבנה ואת עצמתם בחלקיו השונים. קבלת הכוחות והמאמצים בחלקי השלד השונים ובכיסוי עצמו - כאשר נושבת רוח - אפשרית בשתי דרכים:

1. בדרך חישובית, באמצעות תוכנות חישוב מיוחדות ושימוש במקדמי עומס רוח הלקוחים מהתקנים הנ"ל.
 2. בדרך מעשית, היינו באמצעות מדידת הכוחות הפועלים בפועל על מבנה החממה בשעת נשיבת רוח חזקה.
- מטרת העבודה הנוכחית הייתה למצוא דרכים להגברת עמידות בתי צמיחה על סוגיהם השונים ברוחות חזקות. לשם כך נעשה שימוש בשתי הדרכים שהוזכרו

לעיל: פיתוח מערכת- מחשב לחישוב הכוחות, המומנטים, המאמצים וכו' והקמת בית-צמיחה שיכלול מתקני מדידה שונים.

2. מהלך העבודה

העבודה כללה שני שלבים עיקריים שבחלק מהזמן נעשו במקביל:
א. פיתוח תוכנית חישוב ובדיקתה. מציאת נקודות תורפה במבני בתי צמיחה שונים ודרכים לחיזוקן.
ב. הקמת בית-צמיחה ניסויי הכולל אמצעי מדידה. בדיקת הכוחות הפועלים בחלקי השונים בשעת נשיבת רוח.

3. תוכנית אלמנטים סופיים לחישוב חוזק בתי-צמיחה

תכנית החישוב שפותחה מבוססת על תוכנת אלמנטים סופיים ANSYS. תוכנת ANSYS מאפשרת חישובי חוזק, חישובי זרימה וכו' לגבי מערכות סטאטיות או דינמיות. בשיטת האלמנטים הסופיים כל חלק מחולק לאלמנטים קטנים הקשורים זה לזה בצמתים (NODS). על הצמתים מפעילים, בשלבים, כוחות או לחצים ומחשבים את התזוזות, המומנטים והמאמצים בכל אלמנט וצומת. לאחר מספר הרצות מקבלים את הקורה בחלק עצמו. ניתן לבצע חישובים גם במספר חלקים הקשורים זה לזה.

תכנית החישוב הנ"ל כוללת בתוכה אפשרות לחשב את התזוזות, הכוחות, מומנטי הכפיפה והמאמצים הפועלים על מבני חממות בעלי צורות גיאומטריות שונות (מנהרות עבירות, חממות גמלוניות וחממות עם גגות קשתיים).

הכוחות החיצוניים העיקריים הפועלים על החממה הם כוחות הרוח, אבל גם לברד, ובמידה מסוימת למי הגשם, יש תפקיד בהעמסת מבנה החממה, ויש להביאם בחשבון.

התוכנית מאפשרת ביצוע חישובים במודלים דו-ממדיים (במישור) ותלת-ממדיים (במרחב) בעזרת מחשב. באמצעותה ניתן לקבוע את הכוחות והמאמצים באלמנטים השונים של חממות בעלות גג עם כיסוד קשיח או גמיש, בהתאם למקדמי עומסי הרוח שבהם משתמשים.

כדי לתת תשובה לגבי החוזק של מבנה חממה מסוימת ועמידותו בתנאי מזג אוויר קיצוניים בתכנית האלמנטים הסופיים, יש להזין לתכנית הנ"ל את הנתונים הבאים:

- א. הגיאומטריה של מבנה החממה - מידות אורך, רוחב, גובה, צורת הגג וכו'.
- ב. תכונות האלמנטים השונים המרכיבים את שלד החממה - סוג החומר של כל אלמנט, מודול יאנג שלו, מומנט האינרציה, אורך, רוחב וכו'.
- ג. תכונות חומר הכיסוי - סוג החומר (פוליאטילן, P.V.C, פוליקרבונט וכו'), עוביו, ומודול יאנג שלו.

התוכנה שפותחה מאפשרת לבצע אנליזה דו-ממדית ואנליזה תלת-ממדית. לאחר הזנת הנתונים הנ"ל, יש להחליט אם המודל יתאר חלק מסויים של מבנה החממה, כגון גמלון בודד, ואז אפשר יהיה להשתמש באנליזה הדו-ממדית או שהמודל יתאר את המבנה כולו ואז ניתן להפעיל אנליזה תלת-ממדית. השלב הבא הנו לבנות את השריג של האלמנטים המרכיבים את המבנה. ככל שהמודל יהיה מורכב מיותר אלמנטים (ובהכרח גם מנקודות צומת רבות יותר) תוצאות האנליזה תהיינה יותר מדויקות.

אך למחשב יש מגבלות של זמן חישוב וגודל זכרון, ויש על כן למצוא את המודל האופטימלי לכל מקרה ומקרה.

בשלב האחרון יש להפעיל על הצמתים המתאימים את הכוחות הרלוונטיים - כוחות הרוח, עומס הברד או עומס ההדליה וכו'. הבעיה העיקרית הנה כוחות הרוח. לפי התקנים יש לתכנן את החממות להחירות רוח של 120 עד 150 קמ"ש.

3.1 אימות התוכנית במודל הדו-ממדי

לאחר פיתוח תוכנית החישוב כך שתתאים לחממות נערכה בדיקת השוואה בין התוצאות המתקבלות בה לתוצאות המתקבלות בצורה מעשית במעבדה. הבדיקה נערכה לגבי מודל דו-ממדי מוקטן של מנהרה עבירה (קשת).

בציור מס. 1 a מופיעה הסכימה של מודל האלמנטים הסופיים לגבי הקשת הנ"ל, על הצמתים השונים שבו. החלק שעוטף את הקשת מבחוץ הוא כבל שמייצג כיסוי אלסטי. הצמתים של הקשת ושל הכבל מחוברים ביניהם בחיבור מיוחד הנקרא - GAPELEMENT. אלמנט חיבור זה מאפשר העברת לחצים או כוחות רק בכיוון אחד. אם לדוגמא הרוח גורמת ליניקה המרחיקה את היריעה (במקרה זה הכבל) מקשת המבנה - לא יועברו כוחות בין הצמתים. באם הרוח גורמת, בקטע אחר של הקשת, ללחץ, לחץ זה כן יועבר בין הצמתים. ז.א. אלמנט מיוחד זה מאפשר חישובים ביריעות גמישות.

ידיעת פירוס כוחות הרוח מעל קשת מנהרה עבירה מאפשר להכניס לתוכנית החישוב שפותחה את מקדמי הכוח הדרושים (בסימן חיובי ללחץ ובסימן שלילי ליניקה). ניתן אז לחשב את פילוג המאמצים והמומנטים בכל נקודות הקשת וכן את הריאקציות במקום חיבור הקשת לאדמה וכן את הכוח בכיסוי (= בכבל). כמוכר לעיל, כדי לאמת את תוכנית החישוב שפותחה - נערך ניסוי מעבדתי: נבנה מודל דו-ממדי של מנהרה עבירה הכולל קשת מפס מתכת, המייצג צינור מתכת, שעליו מונח כבל, המייצג את היריעה הגמישה, ראה ציור מס. 1 b. שני מדי עומס מדדו את הריאקציות של הקשת ומד עומס נוסף מדד את המתח בכבל. כוח מרוכז הופעל כלפי מעלה במרכז החלק העליון של הכבל כדי לייצג כוח יניקה של רוח.

כוח מרוכז כזה הופעל גם במערכת של האלמנטים הסופיים.

נוסף לכך נערכה אנליזה תאורטית לחישוב המתח בכבל והריאקציות. בציור מס. 2 מופיעות סכימת החישוב וההנחות השונות שנעשו.

לא ניתן לחשב בחישוב ישיר את נקודת הניתוק בין הכבל לקשת בשעת הפעלת כוח אנכי במרכז, מאחר שהכוח גורם גם להתארכות הכבל - כדי להתגבר על בעיה זו נעשה "חישוב הפוך" - הונחה נקודת ניתוק ולפיה חושבו שאר הגורמים.

3.1.1 תוצאות הניסוי הדו-ממדי

בציור מס. 3 מופיעות התוצאות של הניסוי המעבדתי, של החישוב התיאורטי ושל החישוב בשיטת האלמנטים הסופיים. הן בחישוב התיאורטי והן בחישוב באלמנטים סופיים הוזנה החיכוך שבין הכבל ופס המתכת היוצר את הקשת, דבר המסביר מדוע הגרפים שלהם יותר גבוהים מאשר הגרף שנתקבל במעבדה. הקו של החישוב התיאורטי גבוה משל חישוב האלמנטים הסופיים כי הונח בו שהקשת קשיחה. באופן מעשי, בניסוי המעבדה, הקשת הנה גמישה. כך גם בחישוב באלמנטים הסופיים.

מהתוצאות שנתקבלו נראה שתוכנית החישוב באלמנטים סופיים שפותחה מאפשרת גם חישוב של מערכות בתי-צמיחה דו-ממדיות אחרות, כפי שנראה בדוגמא שבציור מס. 4.

בדוגמא זו מוראה פילוג מומנטי הכפיפה בבית-צמיחה של שלושה מפתחים עם גג קשתי. פירוס מקדמי כוחות הרוח נלקח מתקן 1982ASAE.

3.2 אימות התכנית במודל תלת-ממדי

דגם של מנהרה עבירה של שלוש קשתות כוסה ביריעת פלסטיק והופעלה עליו יניקה (לחץ שלילי) בחלק העליון באמצעות מגבה מכונית וכרית, ראה ציור מס. 5. נמדדו התזזזות בנקודות שונות על פני הכיסוי (ציור מס. 6). פעולה דומה (הפעלת יניקה בחלק העליון) נעשתה במודל תלת-קשתי במחשב, באמצעות תכנית האלמנטים הסופיים הנ"ל. נבחרה יניקה שהפעילה תזזזה שווה בשיא המנהרה.

3.2.1 תוצאות המודל התלת-ממדי

בציור מס. 7 מופיעה דוגמא של התזוזה בכל נקודה במודל המעבדה (מוכפלת בשלוש) ובציור מס. 8 תוצאות פיזור תזוזות הצמחים בתכנית האלמנטים הסופיים במנהרה עבירה באותו גודל. שתי רצועות, אחת מכל מודל נלקחו ממרכז המרווח שבין הקשתות, לשם השוואה של התזוזות עקב היניקה (לחץ כלפי מעלה). ראה ציור מס. 9.

בציור מס. 10 נראית ההשוואה בין שתי הרצועות, בשתי רמות של לחץ עילי. היה צפוי קו ישר בשני המקרים אך נתקבלו קוים גליים יתכן בגלל הקשר הקשיח בין היריעה לקשתות עצמן המשפיע על מה שקורה ברווח בין הקשתות או בגלל האי-ליניאריות של התזוזה של הכיסוי הגמיש בפעול עליו לחץ עילי.

מהגרפים נראה שתוצאות החישוב באלמנטים הסופיים, שכללו GAPELEMENT, הן בהתאמה טובה עם תוצאות ניסוי המעבדה.

סיכום נושא תכנית החישוב של האלמנטים הסופיים והשוואת התוצאות בו לתוצאות במודלים מוקטנים מופיע במאמר -

ANALYSIS OF FORCES ACTING DUE TO STRONG WIND LOADS ON STRUCTURE AND COVER OF A WALK-IN TUNNEL

שנמסר בכנס של בתי צמיחה ב- 5-12-96, בצמוד לתערוכת אגריטק.

3.3 שימושים בתכנית האלמנטים הסופיים

3.3.1 חישוב תזוזות במבנה

דוגמא לפילוג התזוזות במנהרה עבירה בק"מ מלא בשעת נשיבת רוח (פיזור כוחות לפי תקן ASAE 288.3) ניתן לראות בציור מספר 11. ציור מס. 12 מראה את התזוזות באחת הקשתות הנ"ל וציור מס. 13 מראה את פילוג המומנטים באותה קשת.

3.3.2 חישוב השפעת מהירות הרוח על פרמטרים שונים של מנהרה עבירה בציורים מס. 14, 15 ו- 16 מופיעות דוגמאות של תוצאות חישוב השפעת מהירות הרוח על התזוזות המכסימליות בקשתות ובכיסוי, על המומנטים המכסימליים בצד הרוח ובצד הנגדי ובריאקציות של הקשתות.

3.3.3 דוגמא לחישובים בשני מודלים של בתי-צמיחה

לצורך החישובים נבחרו שתי צורות אופייניות של חממות - חממה עם גג בעל אלמנטים קשתיים וחממה עם גג בעל אלמנטים ישרים, גג דו-שיפועי. (ראה ציור מס. 17). הכוונה הייתה לבדוק חממות אופייניות "סינתטיות" ולא חממות קיימות מסחריות, שאין לנו עניין לבדוק אלא להצביע באופן כללי על נקודות חשובות בתכנון קונסטרוקציות לחממות.

על המודלים הנ"ל הופעלו (בהרצות מחשב) כוחות רוח בפריסה שנלקחה, בשלב זה, מתיקני עומסי רוח בין לאומיים.

תוצאות עיקריות

בציור מס. 18 מופיעות התזוזות בחממה דו-ממדית במהירות רוח של 120 קמ' לשעה. ובציור מס. 19 מופיע פילוג המאמצים בחממה הנ"ל. המאמצים במרפסת גדולים בהרבה מהמותר (למעלה מ- 22 קג' לממ"ר, בעוד שהמאמץ המותר הוא רק 14 קג' לממ"ר).

בציור מס. 20 ניתן לראות שהוסף מוט במקביל לקרקע לחיזוק המרפסת. המאמץ המכסימלי ירד לבין 16 ל 19 קג' לממ"ר, עדיין מעל למותר.

בציור מס. 21 ניתן לראות פתרון אחר - ממרכז מוט המרפסת הורד מוט לתחתית העמוד הראשון דבר המקטין את תזוזת מוט המרפסת. המאמץ המכסימלי ירד לכ- 10 קג' לממ"ר, מאמץ מותר.

בציור מס. 22 מופיעה החממה הנ"ל עם מספרי חלק מהצמחים. על החממה מופעל עומס רוח לפי התקן הנ"ל, (150 קמ' לשעה). בסבלא המצורפת לציור מופיעים כוחות הראקציות בעמודי החממה. בצומת מספר 132, בסיס מוט המרפסת מופיעים הכוחות המכסימליים, למעלה מאלף קג' בכיוון אופקי ובכיוון אנכי, בעוד שבשאר העמודים הכוחות יותר קטנים. בציור מס. 23 מופיעות הראקציות בצומת הנ"ל במהירויות רוח שונות.

מהחישובים הנ"ל נראה שאין לזלזל בכוחות הפועלים על עמודי הקף החממה, בעיקר כאשר ישנן מרפסות, ויש לדאוג לעיגון מתאים.

3.3.4 מודל של מנהרה עבירה לבחינת השפעת מהירות הרוח על חלקי המבנה
בהתאם לנאמר לעיל, הוכן מודל של אלמנטים סופיים, ב-ANSYS, לגבי מנהרה עבירה שמידותיה זהות למידות של המנהרה העבירה שתוכננה לניסויי השדה (ראה להלן). המנהרה שהוקמה כוללת שש קשתות כדי למנוע אפקטים צדדיים על הקשתות הפנימיות. המודל החישובי מתייחס לארבע הקשתות הפנימיות. נערכו מספר הרצות של המודל ודוגמא של תוצאות החישוב באנסיס, מופיעה בציורים הבאים (ציורים מס. 24, 25 ו-26)
נתוני החישוב היו הנתונים הבאים:

מהירות הרוח - 60 קמ"ש. מקדמי עומס הרוח - לפי התקן האמריקאי. קוטר הקשתות - 6 מ'. קוטר חיצוני של צינור הקשתות - 33.5 מ"מ. שטח - 304 מ"מ². מומנט אינרציה - 35736 מ"מ⁴ ברביעית. מודול יאנג - 21000 קג/ממ"ר. מרווח בין הצמחים במודל - 9 מעלות (= 20 חלוקות).
עובי חומר הכיסוי - 0.18 מ"מ. מודול יאנג של החומר - 50 ק"ג/ממ"ר.
הקצוות של הכיסוי במודל, מחוברים בצורה קשיחה לקשתות הקיצוניות ולקרע.

המרווח בין צמחי ה-GAPE ELEMENT הוא 0.1 מ"מ והאלמנט הנו ללא חיכוך.

4.4 בנית-צמיחה ניסויי לבדיקת הכוחות הפועלים בשעת נשיבת רוח.
רוב העוסקים בחקר ההשפעה של כוחות הרוח על מבנים קלים, ממליצים לעשות ניסוי מסכם בקנה מידה אמיתי, ולא להסתמך רק על ניסויים בדגמים מוקטנים. לכן תוכנן ניסוי שדה במנהרה עבירה ממשית, למדידת כוחות הרוח, פרישתם והעברתם אל הקשתות דרך היריעות הגמישות ואל הקרקע דרך הקשתות. המנהרה תוכננה במקביל להכנת תכנית החישוב הנ"ל באלמנטים סופיים. המנהרה כוללת 6 קשתות ברדיוס של 3 מ' כ"א. אורכה 15 מ'. (ראה סכמת המנהרה בציור מס. 36).
המנהרה הוקמה בשטחי המכון להנדסה חקלאית בבית-דגן במקום שהממוצע השנתי של מהירות הרוח הוא די נמוך. הכוונה הייתה להעביר את המנהרה למקום יותר "רוחני" בגמר הניסויים המוקדמים.
המנהרה כוסתה בכיסוי גמיש (סולריג) והותקנו בה מערכות למדידת כוחות הרוח. הרגשים הוצבו בנקודות שונות של הקשתות וכן בכיסוי עצמו. ליד החממה הוצב מד רוח הכולל גם מד כיוון. בציורים מס. 27 עד 35 מופיעים השלבים של הקמת המנהרה. בציור מס. 36 מופיעה תכנית הצבת הרגשים בקשתות המנהרה.
לאיסוף נתוני הרגשים ונתוני מהירות הרוח וכיוונה הותקנו במנהרה שלוש מערכות איסוף: שתי מערכות תוצרת חב' קמפבל ומערכת אחת שפותחה במכון להנדסה חקלאית. המערכת כוללת כרטיס A TO D רב ערוצים, דוגמים אלקטרוניים ומחשב לאיסוף הנתונים. בציור מס. 37 מופיעה סכימת החיבורים בין הרגשים השונים ואוגרי הנתונים הנ"ל.

כשהוחל שלב הניסויים המעשיים הוחלט לאסוף נתונים רק מרוחות שמעל 10 מ/שנ ומכיוון כללי מערב (אזימוט 270+45 מעלות). בשלב מסוים (רוח חזקה מעל כ- 50 קמ"ש) נבעו פרצות ביריעת הכיסוי, מעל שניים שלושה גלגילוני מדי העומס, והיה צורך לתקן את הדבר. למניעת הבעיה, הפתרון שנוסה היה הצמדת לוחות

אלומיניום בין הגלילונים והיריעה כך שהגלילונים יעבירו את כוחות הרוח מבלי לפגום במדידה ומבלי שהיריעה תקרע (עקב ריכוז מאמצים).
פתרון זה לא עזר ומומנטי כפיפה שפעלו על הגלילונים שבשו את הקריאות.
כיום מנסים פתרון אחר : במקום גלילונים, הוצמדו למדי העומס כדורים.
הכדורים נעים בקלות ע"ג משטחי האלומיניום שהוזכרו לעיל ומעבירים את כוחות היריעה למדי הכוח ללא כוחות לוואי.
הניסויים בקיץ הופסקו בגלל מהירויות רוח נמוכות מדי. הניסויים ימשכו בבא החורף.

סיכום

1. מטרות המחקר לתקופת הד"ח
לפתח תכנית מחשב באלמנטים סופיים לחישוב הכוחות, המאמצים והמומנטים במודלים של בתי צמיחה בשעת פעולת כוחות הרוח עליהם. לגלות באמצעות תוכנית זו נקודות תורפה בחממות ולמצוא דרכים לחזקן.
לחקור את פרוס הכוחות על פני מנהרה עבירה בגודל 1:1 בשעת נשיבת רוחות חזקות. פיתוח מודל סימולציה של השפעת כוחות הרוח על מבנה בעל כיסוי גמיש בעל אותו מבנה, בתוכנית האלמנטים הסופיים, והשוואת התוצאות שבמודל לתוצאות הניסוי שבשטח.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הד"ח
פותח מודל אלמנטים סופיים המאפשר קביעת הכוחות והמאמצים באלמנטים השונים של חממות בעלות גג עם כיסוי קשיח וגמיש. נערכו ניסויים במודלים מוקטנים שאימותו את התוצאות שנתקבלו בתכנית ה"ל. התכנית הורצה לגבי מודלים סינתטיים של בתי צמיחה בעומסי רוח שונים. נמצאו נקודות תורפה בעיקר ב"מרפסות" של החממות ונמצאו דרכים לחזקן.
הוקמה מנהרה עבירה בגודל ממשי (ק"מ 1:1) והותקנו בה מכשירי מדידה: מדי-עומס, מדי-עיבור, מדי רוח ומד כיוון רוח. הוחל באיסוף נתונים אך נתגלו תקלות במדי הכוח. התקלות תוקנו אך הדבר דחה את הניסויים לעונת הקיץ בה מהירויות הרוח נמוכות. הניסויים ימשכו בחורף הבא.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו
נראה שניתן לצפות מראש מהם הכוחות, המאמצים ומומנטי הכפיפה המתפתחים בשלד של מבנה קמור וארוך (מנהרה עבירה) ובבתי צמיחה אחרים באמצעות המודל המתמטי שפותח (תכנית האלמנטים הסופיים). מקדמי פעולת כוחות הרוח נלקחים כיום מהתקנים הקיימים, אך נראה שעם גמר הניסויים בחממה הממשית, נקבל נתונים יותר מעודכנים לגבי המקדמים לגג גמיש.
4. הבעיות שונתרו לפתרון ו/או השינויים במהלך העבודה
בגלל בעיות שונות נדחה המשך הניסויים במנהרה העבירה לחורף (ראה לעיל).
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע?
ניתנה הרצאה בכנס בין לאומי לבתי צמיחה שנתקיים בבית-דגן ב- 5-12-96. הנושא היה ANALYSIS OF FORCES ACTING DUE TO STRONG WIND LOADS ON STRUCTURE AND COVER OF A WALK-IN TUNNEL.

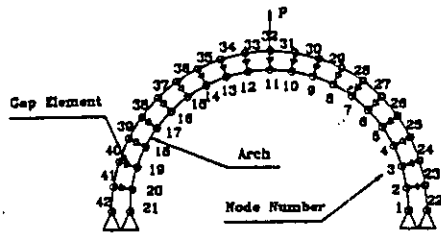


Fig. 1.a. Finite element model of test sample.

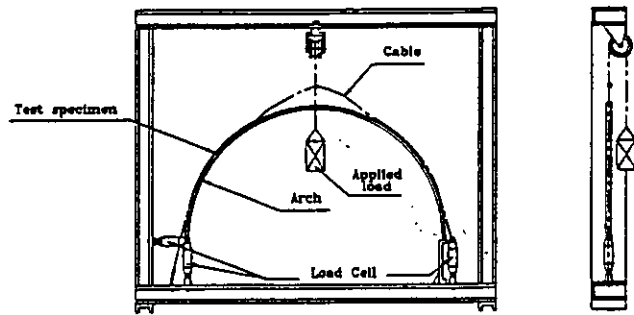


Fig. 1.b. Test configuration.

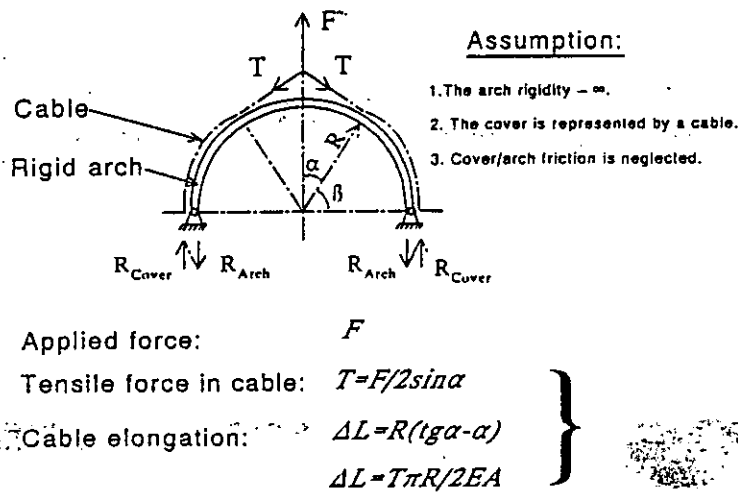


Fig. 2. Theoretical analysis of the structure behaviour under lifting load (2D Static Model).

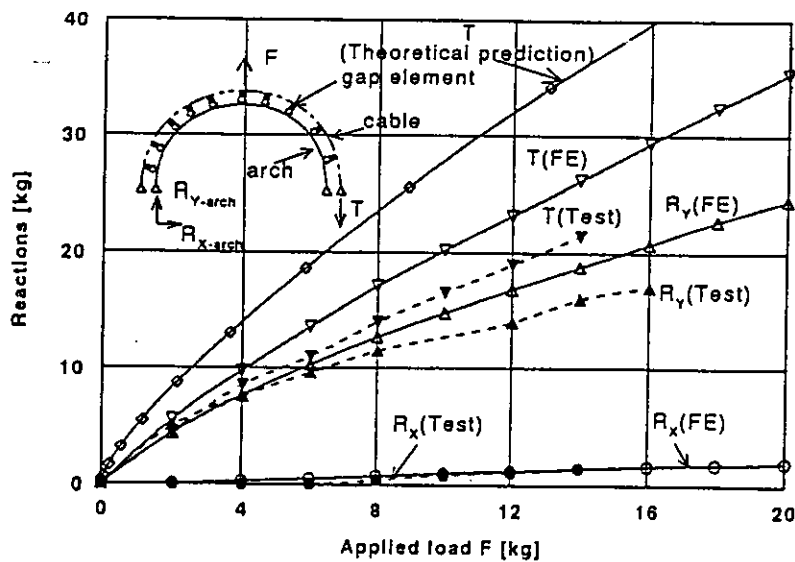


Fig. 3. Reactions vs. applied load.

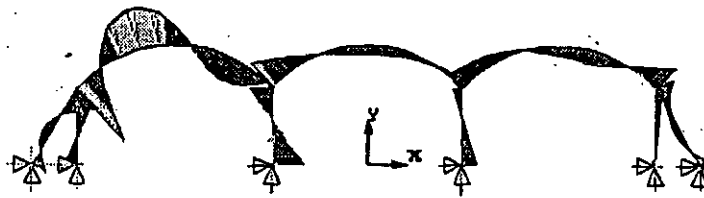


Fig. 4. An example of 2D-FE calculations of bending moment.

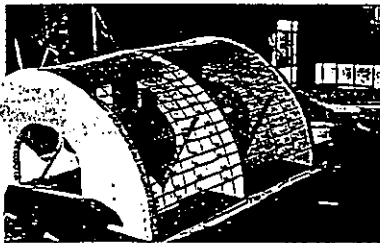


Fig. 5. The laboratory J-arch test specimen.

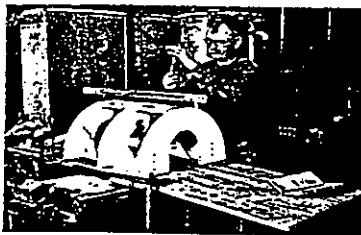


Fig. 6. Measuring the plastic cover displacement due to upward load.

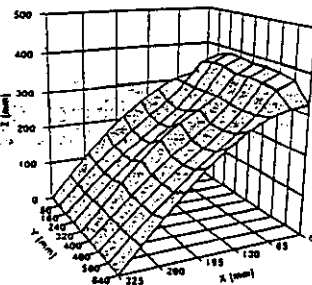


Fig. 7. Plastic cover displacement due to upward load.

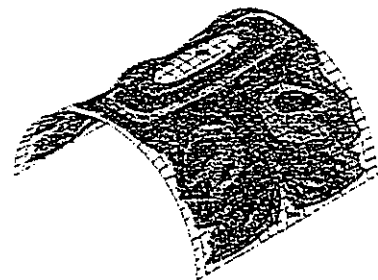


Fig. 8. FE Displacement of the test specimen.



Fig. 9. FE Displacement of one wing of the cover.

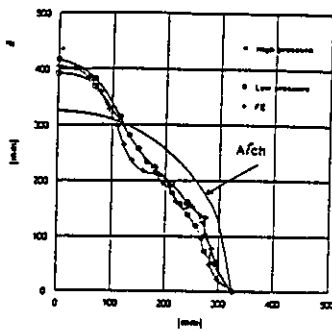


Fig. 10. Displacements along one strip of the cover.

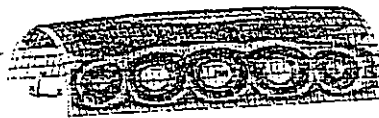


Fig. 11. An example of FE deformations of a full-scale tunnel cover due to wind loads. (Loads are according to US Standard).

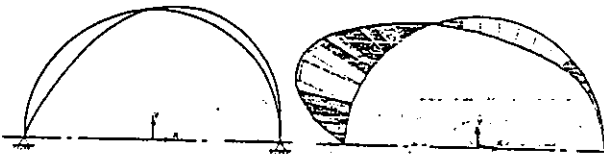


Fig. 12. An example of FE deformations of a plastic covered tunnel structure due to wind loads. (Loads are according to US Standard).

Fig. 13. An example of FE bending moment in the tunnel arch.

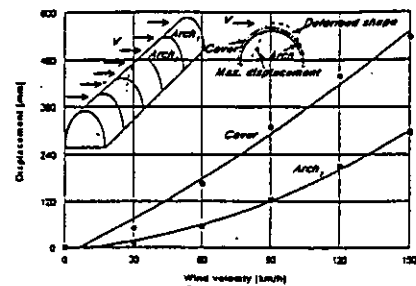


Fig. 14. Maximum displacements of the cover and the arch vs. wind velocity. (Loads are according to US Standard).

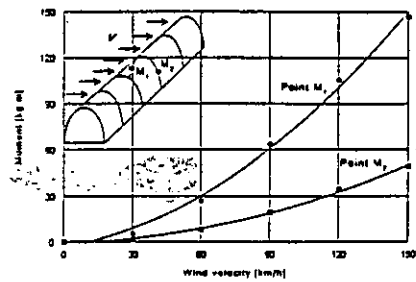


Fig. 15. Maximum bending moment in the arch vs. wind velocity. (Loads are according to US Standard).

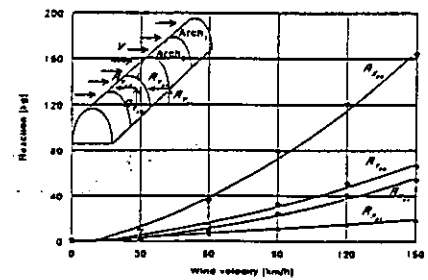
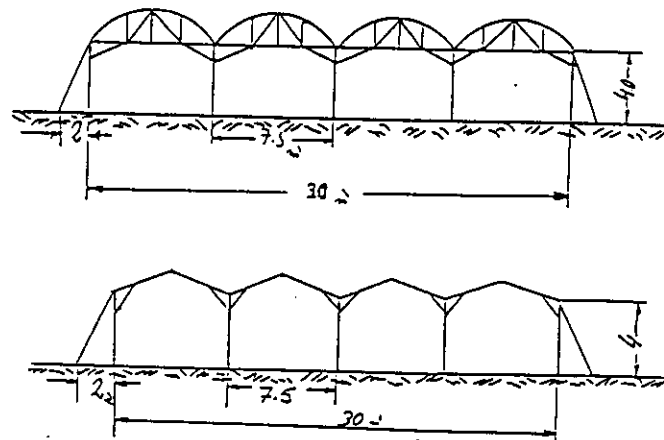
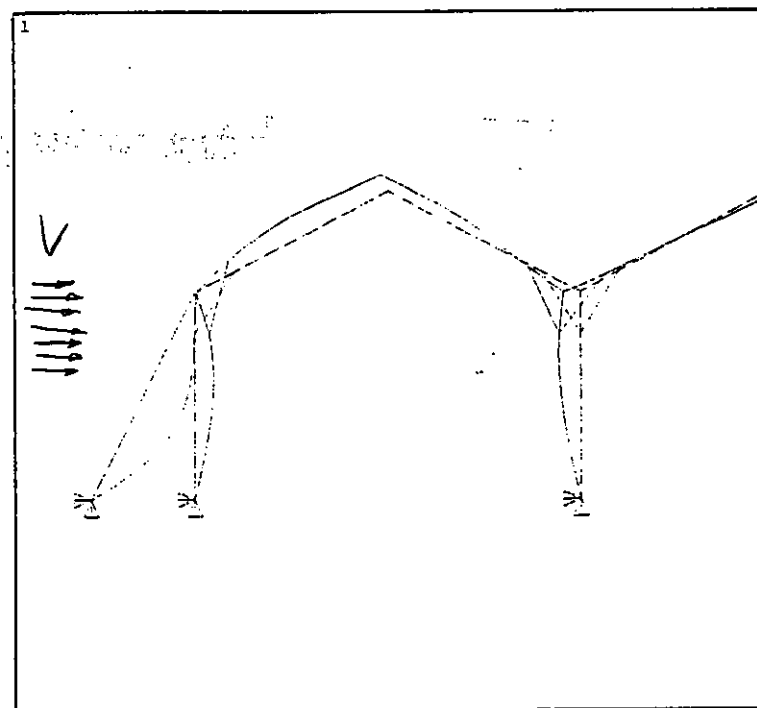
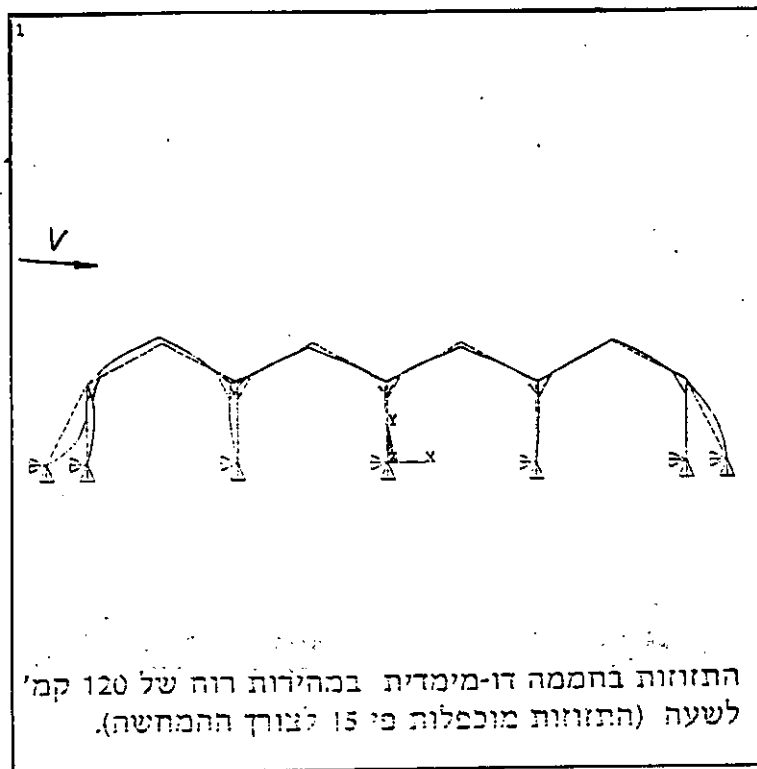


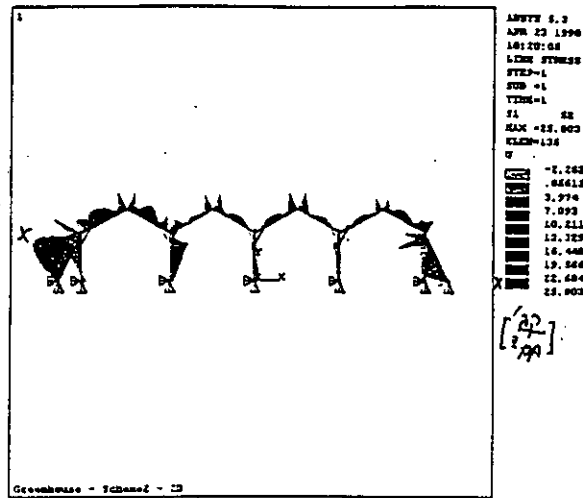
Fig. 16. Arch reactions vs. wind velocity. (Loads are according to US Standard).



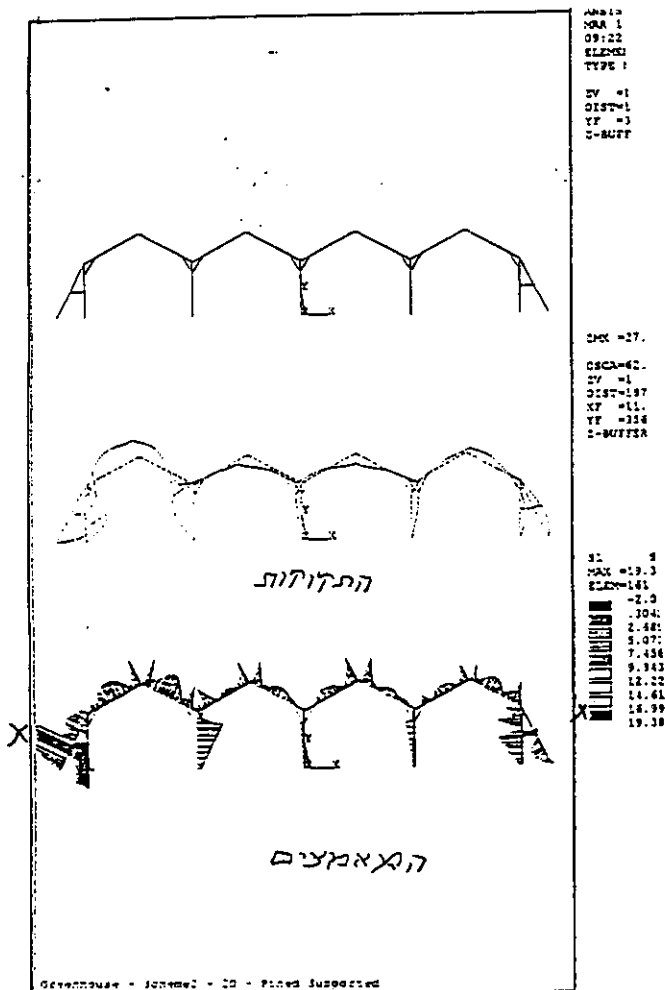
ציור מס. 17. דגמי חתמות
לצורך חישוב החוצק



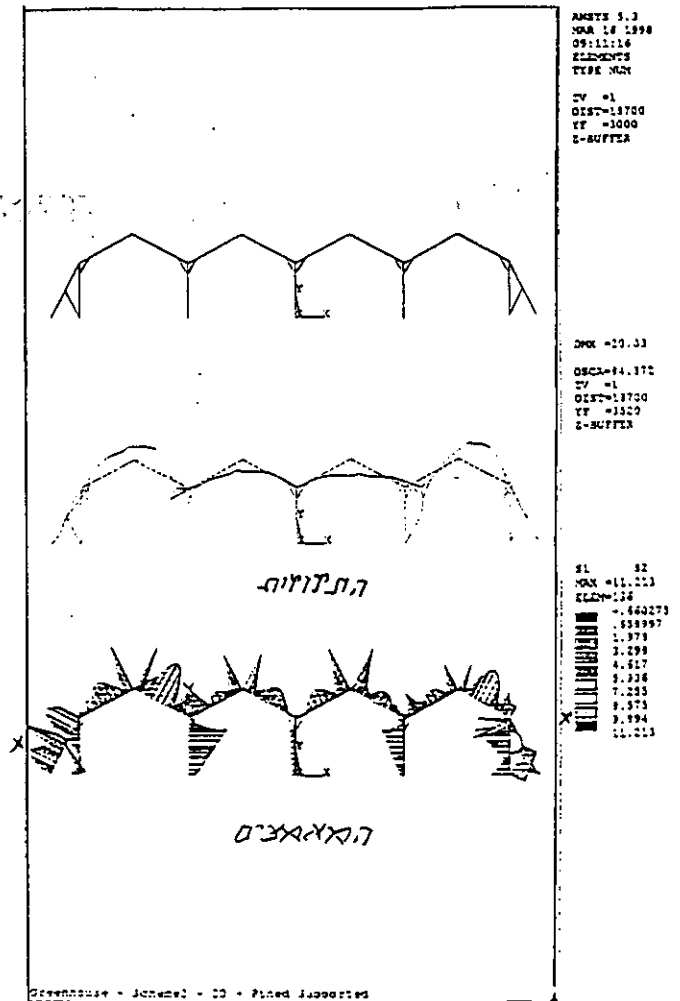
ציור 18. התזוזות בשלד החממה
ברוח של 120 קמ' לשעה V



79. פילוג הבאמצים בחממה דו-מימדית במהירות רוח של 120 קמ' ל שעה.

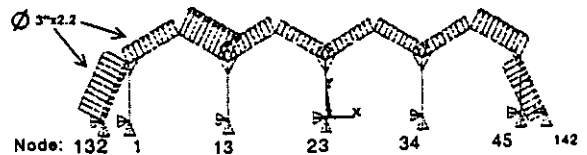
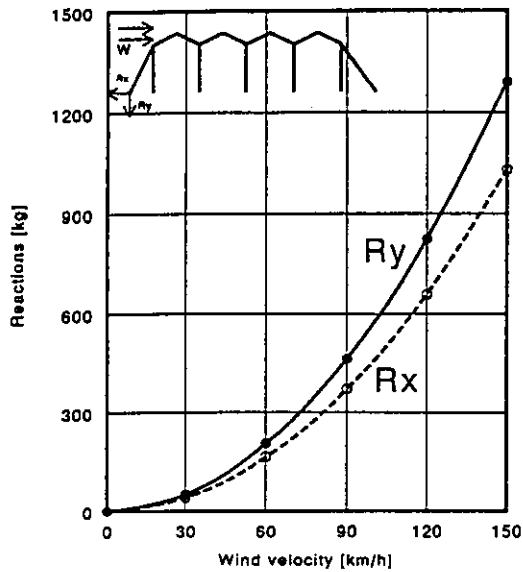


20. הוספת חוט אופקי ב"מרפסת"



21. הוספת חוט אלכסוני ב"מרפסת"

Reactions vrs. wind velocity
FEA simulation

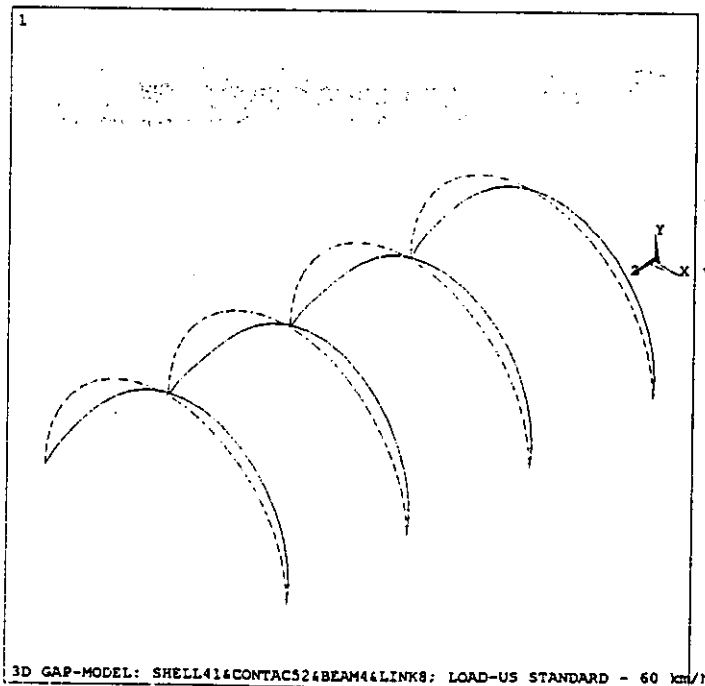


THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES

MODE	FX	FY	MZ
1	-66.782	1264.6	
13	44.086	-1001.8	
23	1.2777	-581.70	
34	-12.793	-420.54	
45	6.3617	-959.17	
132	-1043.1	-1314.0	
142	-377.08	262.19	
TOTAL VALUES			
VALUE	-1444.0	-2950.5	.00000

22. הכוחות על צמתי העמודים בקף

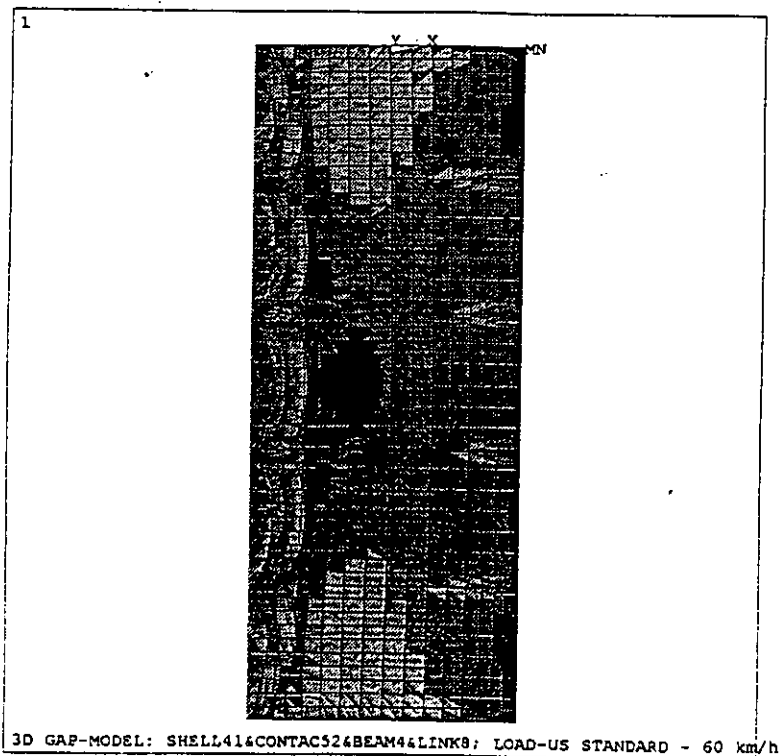
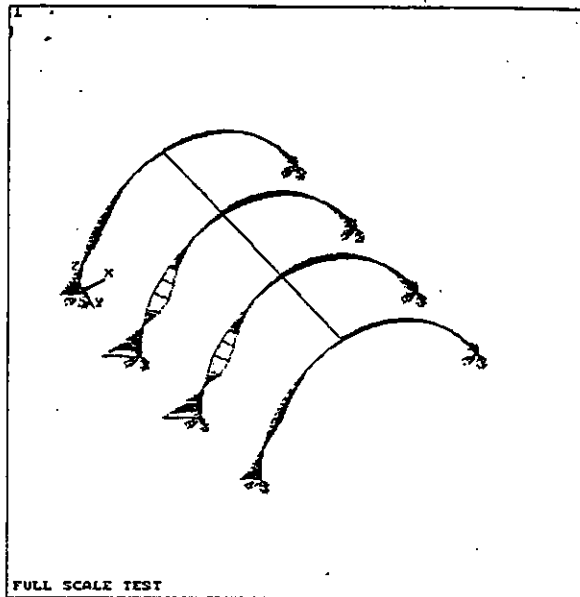
23. השפעת אהירות הרוח על מוט "המרפסת"



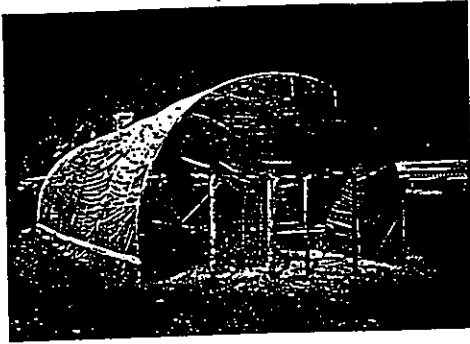
ANSYS 5.2
JAN 20 1997
09:54:04
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
TIME=1
RSYS=0
DMX =320.781
*DSCA=5
XV =1
YV =1
ZV =1
*DIST=5967
XF =22.832
YF =1790
ZF =7500
CENTROID HIDDEN

3D GAP-MODEL: SHELL41&CONTACT52&BEAM4&LINK8: LOAD-US STANDARD - 60 km/h

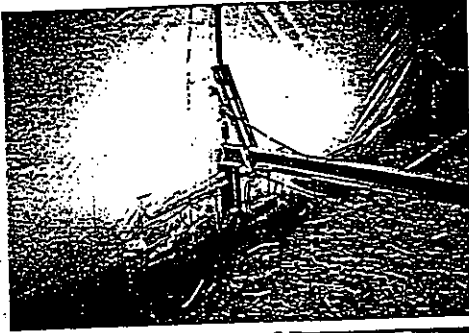
24. התצורות בקשתות ברוח של 60 קמ"ש



ציר מס. 26
הקצבים
האקוילנטים
בידיעה.
מבט על.



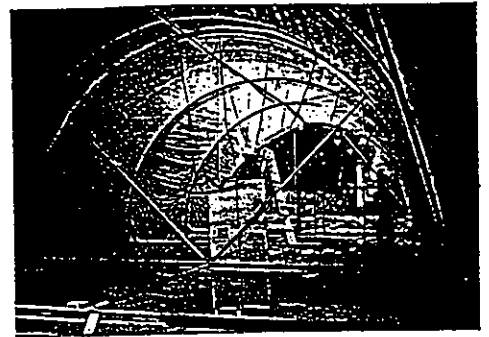
צילום
82
הקטנה
הגבירה



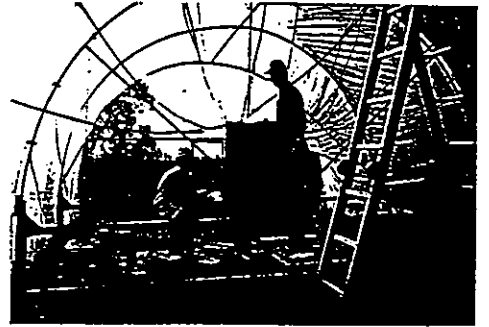
צילום
28
הקטנה
ליואקניות
הקטנות



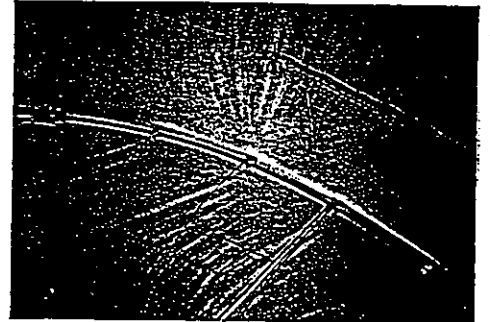
צילום
29
הקטנה
ליואקניות
הקטנות
בדיונות



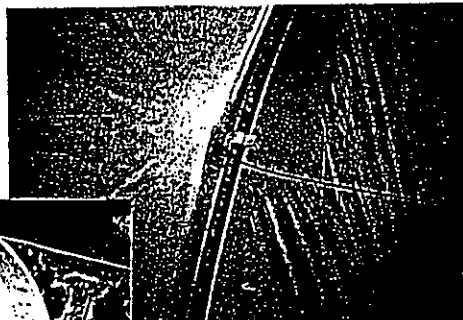
צילום
30
הקטנה
ליואקניות
הקטנות



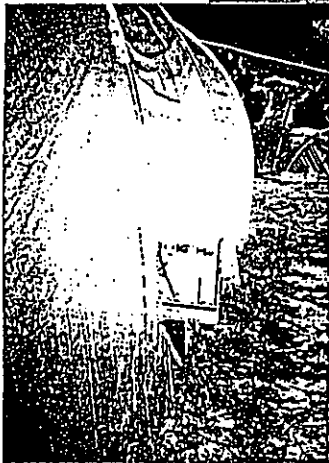
צילום
31
הקטנה
ליואקניות
הקטנות



צילום
32
הקטנה
ליואקניות
הקטנות



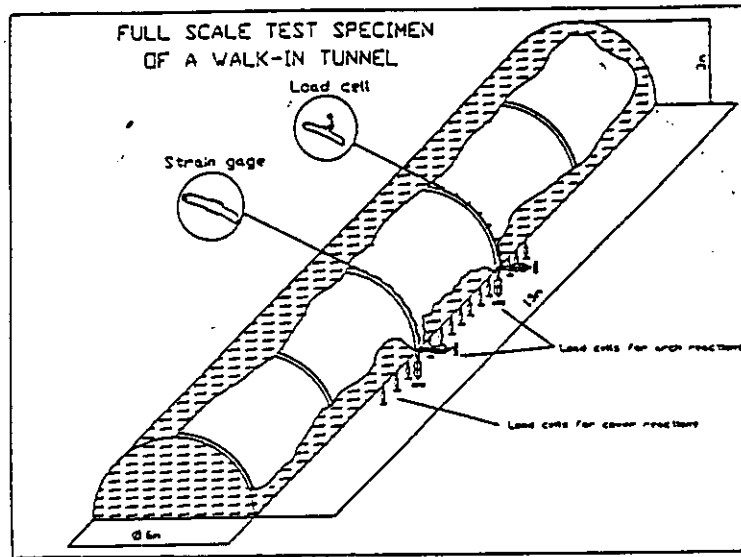
צילום מס. 34
מד עומם בקשת



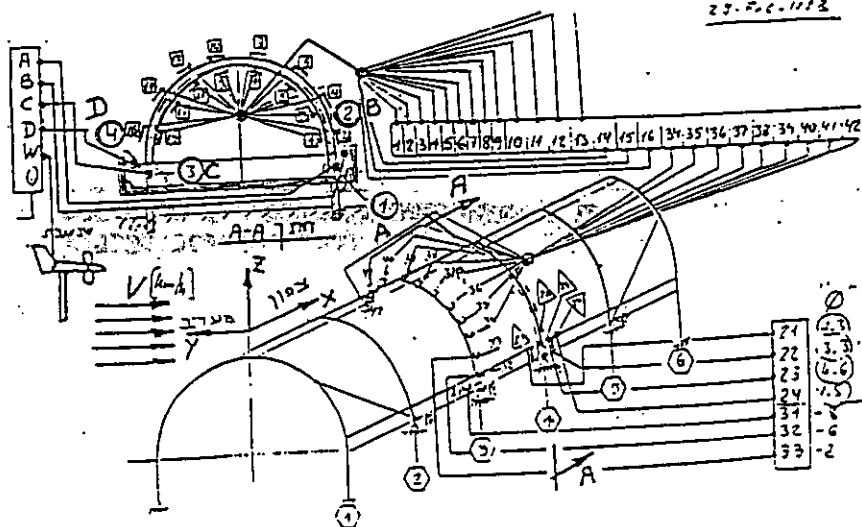
צילום מס. 35
מד-עומם
ליואקניות
אופקיות



צילום מס. 36
מד הרוח



36. המבנה העמיד ומיקום הדגשים



37. מיקום הדגשים ומיקום בוריהם

ספרות

Robertson, A. P., and Hoxey, R.P. (1992). Structural design of greenhouses with an emphasis on wind load. Workshop on European greenhouses Standards/ IRTA, REUR Technical series 26, FAO, 1992

Richardson, G.M., and Westgate, G.R. (1986). Full scale measurements of the wind loads on film plastic clad greenhouses. A Comparison of measured and calculated strains in the supporting hoops of a tunnel greenhouse. J.Ag.Eng.Res. 33: 101-110.

ASAE Standard: Designing buildings to resist snow and wind loads. S288.3. Agric. Eng. Yearbook 1982, pp. 289