

## עומסים במבנים: עומסים דינמיים

Load on structures: Dynamic Laods

להערות הציבור

מסמך זה הוא הצעה בלבד

תקן זה הוכן על ידי ועדת המומחים 10409 - עומסים דינמיים על מבנים, בהרכב זה:  
צבי המלי, ערן חנום, דוד סגל, עודד רבינוביץ', דורון שלו (יו"ר)

משה כרמל ריכז את עבודת הכנת התקן.

---

**מילות מפתח:**

**Descriptors:**

---

**עדכניות התקן**

התקנים הישראליים עומדים לבדיקה מזמן לזמן, ולפחות אחת לחמש שנים, כדי להתאימם להתפתחות המדע והטכנולוגיה. המשתמשים בתקנים יודאו שבידיהם המהדורה המעודכנת של התקן על גיליונות התיקון שלו. מסמך המתפרסם ברשומות כגיליון תיקון, יכול להיות גיליון תיקון נפרד או תיקון המשולב בתקן.

---

**תוקף התקן**

תקן ישראלי על עדכוניו נכנס לתוקף החל ממועד פרסומו ברשומות. יש לבדוק אם התקן רשמי או אם חלקים ממנו רשמיים. תקן רשמי או גיליון תיקון רשמי (במלואם או בחלקם) נכנסים לתוקף 60 יום מפרסום ההודעה ברשומות, אלא אם בהודעה נקבע מועד מאוחר יותר לכניסה לתוקף.

---

**סימון בתו תקן**

כל המייצר מוצר, המתאים לדרישות התקנים הישראליים החלים עליו, רשאי, לפי היתר ממכון התקנים הישראלי, לסמנו בתו תקן:



---

**זכויות יוצרים**

© אין לצלם, להעתיק או לפרסם, בכל אמצעי שהוא, תקן זה או קטעים ממנו, ללא רשות מראש ובכתב ממכון התקנים הישראלי.



## תוכן העניינים

הקדמה	.....
מבוא	.....
<b>פרק א – עניינים כלליים</b>	.....
1.1 חלות התקן	.....
1.2 אזכורים נורמטיביים	.....
1.3 מונחים והגדרות	.....
1.4 רשימת סמלים	.....
<b>פרק ב – דרישות כלליות ותכולת התקן</b>	.....
2.1 תרשים זרימה לשימוש בתקן	.....
2.2 מבנים משוחררים מבדיקה	.....
2.3 פעילות בני אדם	.....
2.4 פעילות ציוד	.....
2.4 עומסי רוח	.....
2.4 השפעות תחבורה	.....
2.4 דיון במבנים קיימים ומבנים חדשים	.....
<b>פרק ג – סוגי מבנים ורכיבים</b>	.....
3.1 כללי	.....
3.2 מבני תעשיה	.....
3.3 מבני ציבור	.....
3.3.1 רצפות במבני משרדים	.....
3.3.2 רצפות אולמות אירועים	.....
3.3.3 רצפות אולמות מושבים קבועים	.....
3.4 גשרי הולכי רגל	.....
3.5 השפעות דינמיות של רוח	.....
3.5.1 מבנים גבוהים	.....
3.5.2 רכיבים תמירים	.....
3.5.3 גשרים תלויים	.....
3.6 ביסוס כגורם משפיע בתגובה דינמית של מבנה	.....
3.6.1 אפיון אלסטי של ביסוס כתנאי שפה למבנה	.....
3.6.2 הביסוס כבאפר (כבולם זעזועים?) דו כיווני לתנודות אל ומהמבנה	.....
<b>פרק ד – אפיון עומסים דינמיים במבנים</b>	.....
4.1 עומסים הנובעים מפעילות משתמשים	.....
4.1.1 תאור כללי לאפיון תנועת אדם	.....
4.1.2 סיווג פעילויות משתמשים	.....
4.1.3 <u>ניסוח מתמטי לאפיון העומס הדינמי הנובע מפעילות משתמש</u>	.....

.....	4.2	עומסים הנובעים מפעילות ציוד
.....	4.3	עומסים הנובעים מרוח
.....	4.4	הגדרת עומסי הלמים
.....	4.5	הגדרת עומסים בניסוי ומדידה
.....	4.5.1	מבנים חדשים – אפיון עומסים סביבתיים
.....	4.5.2	מבנים קיימים – אפיון עומסים פעילים
.....	4.6	עומסים הנובעים מחוץ למבנה)
.....	4.6.1	כללי
.....	4.6.2	שיטות להערכה ראשונית
.....	4.6.3	התקדמות תנודות
.....	4.6.4	מעבר תנודות למבנה
.....	4.6.5	מקורות תנודה מחוץ למבנה
.....	4.6.5.1	אירועים יחידניים
.....	4.6.5.2	עבודות בניה
.....	4.6.5.3	תנועה
.....	4.6.5.4	מיכון
.....		<b>פרק ה – חישוב תגובת מבנה לעומסים דינמיים</b>
.....	5.1	קביעת פרמטרים לתכנון דינמי
.....	5.1.1	פילוג קשיחויות ומסות
.....	5.1.2	ריסון
.....	5.2	שיטות אנליטיות מומלצות
.....	5.2.1	אנליזה סטטית שקיל ה
.....	5.2.2	אנליזה מודאלית
.....	5.2.3	אנליזת דינמית ישירה
.....	5.2.4	אנליזות לא לינאריות
.....	5.2.5	אנליזה ספקטרלית – PSD
.....	5.2.6	פונקצית תמסורת ופונקציית קוהרנטיות
.....	5.3	קביעת מאמצים דינמיים עקב הלמים
.....		<b>פרק ו – קריטריונים לתגובה דינמית</b>
.....	6.1	כללי
.....	6.2	רגישות משתמשים
.....	6.3	תנודות בסביבה של ציוד רגיש
.....	6.3.1	קריטריון השפעה על ציוד לפי הנחיות יצרן
.....	6.3.2	קריטריון השפעה כללי מקובל בעולם
.....	6.4	שירות וכשל מבנה תחת עמיסה דינמית
.....	6.4.1	שירות

6.4.2	כשל
6.5	רגישות ציוד אלקטרוני
6.6	השפעת תנודות על המבנה
6.6.1	תכולה
6.6.2	מושגים
6.6.3	עקרונות להערכת השפעת תנודות על מבנים
6.6.4	הערכת השימושיות
6.6.5	השפעת תנודות על קרקע
6.6.6	הערכת ההשפעה של תנודות קצרות מועד
6.6.6.1	השפעה על המבנה כמכלול
6.6.6.2	השפעה על תקרות
6.6.6.3	השפעה על צנרת טמונה [BURIED PIPEWORK]
6.6.6.4	מדידות
	הערכת ההשפעה של תנודות ארוכות טווח
6.6.7.1	השפעה על המבנה כמכלול
6.6.7.2	השפעות על תקרות
6.6.7.3	השפעה על צינורות טמונים
6.6.7.4	מדידות
6.6	תגובה לעומסי פיצוץ
6.6.1	אנליזות דינמיות
6.6.2	אנליזות CFD
	נספח א : דוגמא לטופס דו"ח מדידה
	נספח ב : אמצעים להגבלת ההשפעות של תנודות
	נספח ג : השפעה של תנודות על הקרקע
	נספח ד : מידע נוסף בנוגע למדידות על גבי צנרת ועל הערכת תדירויות

## הקדמה

תקן זה הוא חלק מסדרת תקנים החלים על עומסים.  
חלקי הסדרה הם אלה:

## מבוא

### פרק א – עניינים כלליים

#### 1.1 חלות התקן

תקן זה דן בהשפעות שונות של עומסים דינמיים (תלויים בזמן) הפועלים במבנים, הן צתוך המבנה והן מסביבתו.

דרישות תקן זה חלות על כל המבנים והעומסים הפועלים עליהם, המפורטים בפרקי ב' ו ג' למעט סעיף 2.2 בפרק ב' המפרט את סוגי המבנים עליהם לא חל תקן זה.

#### 1.2 אזכורים נורמטיביים

תקנים ומסמכים המוזכרים בתקן זה (תקנים ומסמכים שאינם מתוארכים - מהדורתם האחרונה היא הקובעת):

#### תקנים ישראליים

ת"י 414 - עומסים במבנים - עומס רוח

#### מסמכים זרים

D

#### 1.3 מונחים והגדרות

המונחים וההגדרות האלה כוחם יפה בתקן זה:

להלן מושגים רלוונטיים לפרק 6 זה: (בנוסף לאלו המופיעות ב-DIN 1311-1):

##### 1.3.1 תנודה

תנודה מכנית של גופים מוצקים אשר עלולה ליצור נזק או אי-נוחות.

##### 1.3.2 נזק

השפעה קבועה [permanent] של תנודה שפוגעת בשמישות [serviceability] המבנה או אחד מרכיביו.

##### 1.3.3 ערכים מנחים [guideline values]:

ערכים שנקבעו על פי ניסיון. עמידה בערכים אלו מבטיחה כי לא יגרם למבנה נזק.

##### 1.3.4 תנודה קצרת מועד



תנודה בתכיפות נמוכה מכדי לגרום להתעייפות מבנית או לתהודה.

**1.3.5 תנודה ארוכת מועד**

כל סוגי התנודות אשר אין מכוסות בהגדרה ל"תנודה קצרת מועד" בסעיף 6.3.3.4 לעיל.

1.4 רשימת סמלים וקיצורים

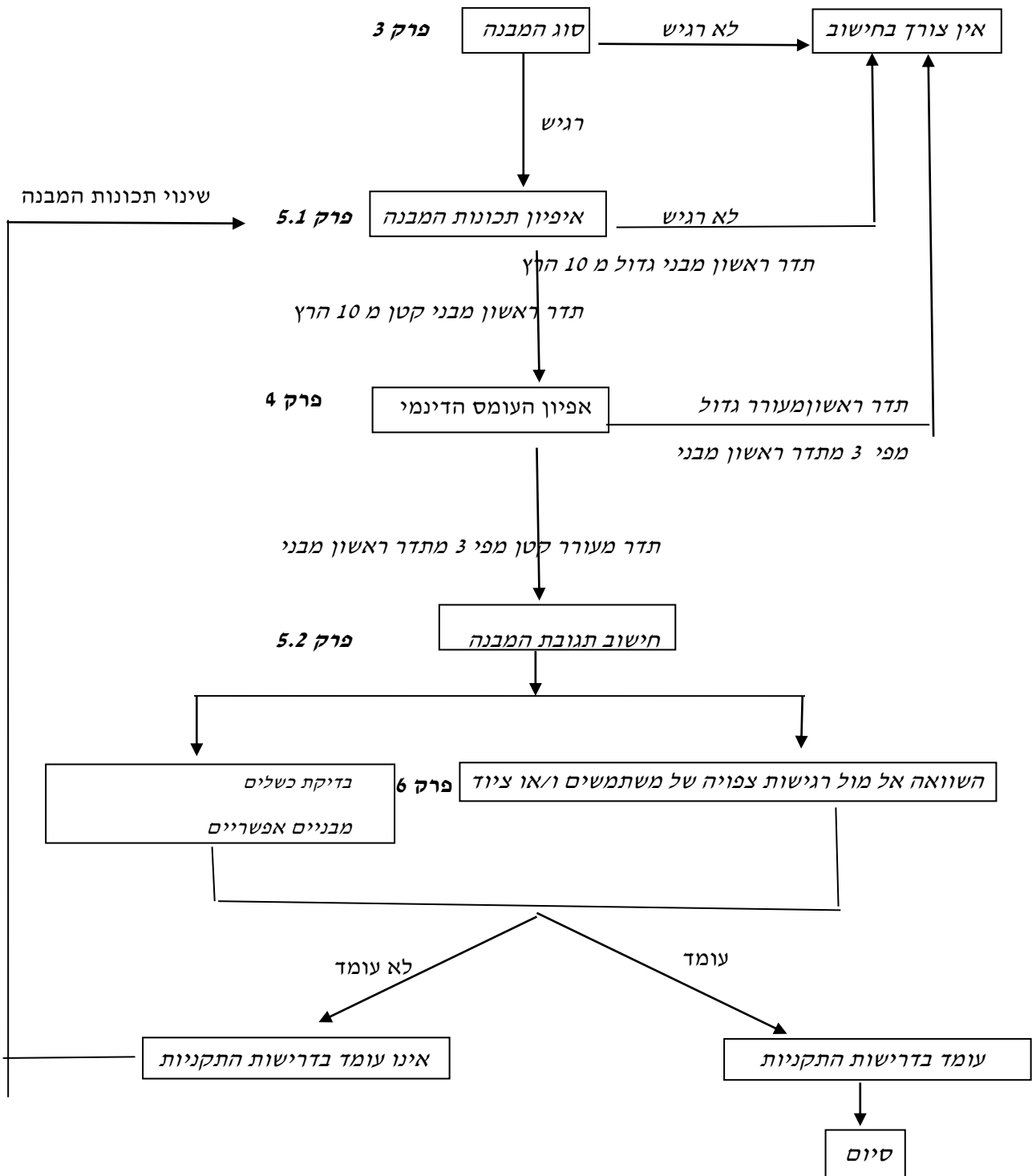
איברי פורייה	-	$a_0, a_n, b_n$
רוחב קורה	-	$b$
מהלך תאוצה מדוד בזמן	-	$a_w(t)$
ריסון אופייני של המבנה	-	$C_n$
ריסון אקווילנטי אופייני לגוף האדם	-	$C_{pl}$
עומס דינמי שאינו כולל התנתקות מגע	-	DCH
מקדם הגברה דינמי	-	$D.L.F$
מודול אלסטיות	-	$E$
תדר עצמי אופייני של המבנה	-	$f_n$
תדר עצמי אופייני של העומס הדינמי	-	$f_p$
תדר אופייני לגוף האדם	-	$f_{pl}$
מהלך העומס הדינמי בזמן	-	$F_p(t), F_p^{SCH}(t)$
עומס מירבי מתוך מהלך העומס הדינמי בזמן	-	$F_{p,max}$
תאוצת הכובד	-	$g$
משקל עצמי של אדם	-	$G$
גובה קורה	-	$h$
מומנט אינרציה	-	$I$
קשיחות אופיינית של המבנה	-	$K_n$
מקדם נגיפה	-	$K_p$
קשיחות אקווילנטית אופיינית לגוף האדם	-	$K_{pl}$
מפתח הקורה	-	$L$
מסה אופיינית של המבנה	-	$M_n$
מסה אקווילנטית אופיינית לגוף האדם	-	$M_{pl}$
אינדקס מס' איברי פורייה	-	$n$
כוח המגע בין המבנה והאדם	-	$P_{contact}$
שורש של ריבועים	-	RMS
פקטור הסתברות להוצרות תהודה	-	$R_1$
פקטור משך החשיפה לתנודה	-	$R_2$

שקול איברי פורייה	-	$r_n$
עומס דינמי הכולל התנתקות מגע	-	SCH
מערכת דרגת חופש אחת	-	SDF
מקדם נוחות	-	<i>S.L.F</i>
אינטראקצית קרקע מבנה	-	SSI
זמן	-	$t$
זמן מגע של העומס הדינמי	-	$t_p$
זמן מגע של העומס הדינמי בעל קצב השתנות חיובי	-	$t_{pm}$
זמן מחזור אופייני של העומס הדינמי	-	$T_p$
משך זמן הפעילות ע"ג מבנה	-	$T_w$
תגובה דינמית של המבנה (הזזה, מהירות, תאוצה)	-	$-U_n(t), \dot{U}_n(t), \ddot{U}_n(t)$
תגובה דינמית של גוף האדם (הזזה, מהירות, תאוצה)	-	$-U_p(t), \dot{U}_p(t), \ddot{U}_p(t)$
מהירות התנועה	-	$V_0$
ערך מנת התנודה	-	VDV
מקדם מגע	-	$\alpha_p$
מקדם פעילות	-	$\beta_p$
הזזה סטטית	-	$\delta_{st}$
הזזה דינמית	-	$\delta_{dyn}$
כופל יחסי מגע	-	$\lambda$
צפיפות מסה ליח' אורך	-	$\rho$
מנת הריסון של המבנה	-	$\xi_n$
מנת ריסון אופיינית לגוף האדם	-	$\xi_{pl}$

**פרק ב – (דרישות כלליות ו) תכולת התקן**

2.1. תרשים זרימה לשימוש בתקן

להלן תרשים זרימה אשר אמור להקל על הבנת התקן ואופן השימוש בו.



## 2.2 מבנים משוחררים מבדיקה

ככלל מומלץ לבצע אנליזת תנודות חופשיות לכל מבנה המתוכנן במסגרת הנדסה אזרחית והמיועד לשהיית בני אדם. מבנים משוחררים מבדיקה על פי תקן זה הם מבנים בהם יימצא כי תדרי הרכיבים האופקיים השונים (לא תדרי תגובה גלובלית של המבנה כולו) כגון תקרות וקורות, עולים על 10 הרץ. זאת למעט מבנים אשר מועמדים להשפעות אגרסיביות של עומסים מחוץ לבניין, אם דרך קבע (לדוגמא קרבה לכבישים סואנים או רכבות תחתיות) ואם ארעית (לדוגמא פעולות בינוי סמוכות). בנוסף – לא יהיו משוחררים מבדיקה מבנים בהם ממוקם ציוד בעל רגישות יוצאת דופן לתנודות ואשר סף ההפרעה לציוד זה הינו נמוך בהרבה מזה אשר גורם לתחושות לא נוחות של משתמשים.

## 2.3 פעילות בני אדם

פעילות בני אדם כמפורט בתקן זה יוצרת עומסים דינמיים ברמות אגרסיביות שונות. החל מהליכה המתרחשת בתדרים סביב 1 הרץ ועד לקפיצות ספורט וריקודים אגרסיביים סביב 3 עד 4 הרץ.

## 2.4 פעילות ציוד

פעילות ציוד נחלקת לפי מיקום – בתוך או מחוץ למבנה. ציוד משפיע בתוך המבנה הינו ציוד תונד עקב פעולות משתנות בזמן כגון מנועים, מפוחים, מזגנים, גיליוטינות וכד'. ציוד משפיע מחוץ למבנה כגון כלי עבודות עפר כבדים, תנועת כלי רכב כבדים מעל לקרקע או בתת הקרע וכד'.

## 2.5 עומסי רוח

עומסי רוח משתנים בזמן כגון, תופעות VIV (vortex induced vibrations), תופעות אווירואלסטיות כגון פרפור, משבים (gusts) וכל עומס רוח אחר אשר אינו מפעיל גרר סטטי בלבד.

## 2.6 השפעות תחבורה

השפעות חיצוניות למבנה הנובעות מתנועת רכבים מכל סוג שהוא. בייחוד אמורים הדברים לגבי רכבים הנעים על כבישים סואנים בקרב המבנה או תנועת כלי רכב בתת הקרקע (רכבות תחתיות, מנהרות וכד').

## פרק ג - סוגי מבנים ורכיבים

### 3

#### 3.1 כללי

פרק זה מתאר את סוגי המבנים ורכיבי המבנה אשר לגביהם יש לבצע בדיקות חישוביות ואחרות על מנת לקבוע את תגובתם לעומסים דינמיים, הן בהבטי חוזק מבני והן בהבטי תחושת משתמשים ותפקוד ציוד. העומסים הדינמיים עבור כל מבנה ורכיב המתואר בפרק זה ייקבעו על פי פרק 4. שיטת החישוב והאנליזות הדינמיות הנדרשות לניבוי התגובה הדינמית ייקבעו על פי פרק 5. הקריטריונים לבחינת התגובה הדינמית המחושבת ייקבעו על פי פרק 6.

#### 3.2 מבני תעשייה

פרק זה דן במבנים בהם נוצרות תנודות מבניות כתוצאה מפעולת מכונות תעשייתיות קבועות באולמות ייצור וכד'.

הטרחות דינמיות ישירות באתר הינן בעלות חשיבות כלהלן:

- השפעה על תפקוד משתמשים ותפקוד ציוד,  
- השפעה על הרכיבים המבניים של המבנה עצמו כולל מערך הביסוס בתת הקרקע.  
בנוסף על הטרחות הישירות המתוארות לעיל, קיימות השפעות דינמיות לא ישירות הנגרמות מציוד מקובע באופן קבוע. אפקטים לא ישירים אלה יכולים להיגרם כתוצאה מהתקדמות גלי תנודה בין חלקי מבנה מאזור אחד לאזור אחר בבניין ובכלל זה אפקטים אקוסטיים נלווים.  
לדוגמא:

- גלי קול הנוצרים כתגובה אקוסטית לפעילות הדינמית נישאים למרחקים ארוכים הן דרך אלמנטים מחוברים למבנה והן דרך האוויר.  
- מעבר השפעות דינמיות דרך בסיס בניין אל בניינים שכנים דרך הקרקע או מפעילות מחוץ לבניין אל תוכו וסביבתו.  
- מעבר השפעות דינמיות דרך האוויר באמצעות גלים אקוסטיים.  
ציוד מכונות תעשייתיות יכול להשפיע בדרכים רבות על רכיבי מבנה כגון יסודות הבניין, מדרכים, רכיבי רצפות ותקרות ואף תגובות הבניין השלם. נבדיל בין ביסוס הציוד אשר אומר אלמנט מבני אשר תומך את הציוד ונשען ישירות על הקרקע ולעומתו תמיכות הציוד אשר נועדו להציב עליהן את הציוד האמור.  
כוחות דינמיים נוצרים על ידי ציוד תעשייתי בהתאם ליעודו התעשייתי, מצבו התחזוקתי, פרטי הייצור ואופן השימוש. הכוחות תלויים באופן פעולת הציוד – ריטוט, סיבוב, הלימה וכד'. כמו כן קיימת כמובן השפעה של קצב הפעילות. הפעילות יכולה להיות מחזורית או לא מחזורית. פעילות מחזורית יכולה להיות הרמונית או לא. פעילות לא מחזורית יכולה להיות רציפה או בדידה המובילה להלמים או דומה לכך עד כדי הלימה מחזורית.  
פעילות מכאנית שכזו תהיה מתוארת על ידי פונקציה דטרמיניסטית או באמצעות שיטות סטוכסטיות.  
תמיכת הציוד מתפקדת כתווך ביניים בינו לבין הציוד התמוך ותהיה מאופיינת בצורתה כגוש, כקופסא או כמבנה מסגרות מרחבי. מגע הציוד עם התמיכה יהיה ישיר או מופרד ומשוכך על ידי חומרים ייעודיים לשם כך. תמיכת הציוד תהיה בעלת תכונות אלסטיות בערכי קשיחות שונים בהתאם לתפקיד התמיכה כתווך ביניים בין הציוד למבנה. ייעודי תווך הביניים כוללים: הגבהה, שיכוך וריסון תנודות, שינוי תדרים וכד'.

בפרק הבא יוצג דיון מעמיק באפיון עומסים הנובעים מציוד. האפיון אמור לסייע באופן בו תבוצע האנליזה הדינמית.

ההשפעות של ציוד תעשייתי על המבנה נבחנות על גורמי סביבה רבים :

- המבנה עצמו ורכיבי מבנה – היווצרות סדיקה, פגיעה במחברים (ריתוכים, ברגים וכד'), תופעות התעייפות של רכיבי מבנה, פגיעה בברזל זיון בתוך רכיבי בטון, אובדן תסבולת עקב ירידה בכשירות רכיבים מבניים.
- משתמשים – הפרעות בתפקוד כתוצאה מתנודות מתמשכות ברמות תאוצה ומחירות מוגברות. התופעות מגיעות בתחום המכאני, בתחום האקוסטי ובתחום האופטי!
- התקנות שונות
- ציוד תעשייתי – כשלים מבניים בחלקי מכונות, כשלים בתכונות חומרים עקב מחזוריות והתעייפות.
- תהליך ייצור

### 3.3 מבני ציבור

רצפות של מבני ציבור או התקהלות אנשים או פעילות רבת משתמשים, נבחנת על פי היישום המקובל והסביר על פי אפיון המבנה או האזור במבנה בו אנו עוסקים. ההבדל בין השימושים השונים נעוץ בעיקר באופי התנהלות המשתמשים – הליכה, ריצה, תנועה באולם בעל מושבים קבועים, תנועה באולם פתוח ללא מגבלות מושבים, במות או משטחים להופעות וכד'.

#### 3.3.1 רצפות במבני משרדים

הפעילות האופיינית העיקרית ברצפות אלה היא בהליכת בני אדם. יש לקחת בחשבון כי גם במבנים שכאלה עשויה להתפתח פעילות, רגעית ככל שתהיה, המאופיינת בקפיצה או ריצה או ריקוד. כיום מקובל כי בבנייני משרדים מוקצה תחום מסויים לפעילות ספורטיבית. במהלכי מסדרונות יכולה להיווצר תנועת ריצה של משתמשים הנעים באופן זה מנקודה אחת לשנייה לפרק זמן מוגבל. העומסים הדינמיים אשר יפורטו בהמשך בפרק 4, נובעים מכל תנועת רגל על הרצפה. רוב פעילות ההליכה מייצרת שתי דריכות רגל בשנייה במוצע (כללית – בין 1.6 ל 2.4). רוב התלונות ממשתמשים עקב תנודות רצפות בבתי מגורים או משרדים נובעות מפעילות הליכה של אדם בודד. כמובן שקיימת אפשרות לפעילות קבוצתית אשר תחמיר את תלונות המשתמשים בייחוד אם קיים תאום בתנועת הקבוצה.

תגובת המבנה בבנייני משרדים או מגורים מושפעת מאד ממספר מאפיינים :

- אופן חלוקת המרחבים על ידי מחיצות – צורתן והחומר ממנו הן עשויות.
- פזור הריהוט באזורים ובתחומים השונים בבניין מעין זה.
- חומרים המשמשים לבידוד אקוסטי או כל חומר אחר המיושם תחת הרצפות



- ריכוז מסות מסיבות פונקציונליות של המבנה.

- צורות הרצפות כתוצאה מתכנון אדריכלי.

תלונות המשתמשים נובעות בעיקר מתחושה של חוסר בטחון בעמידות המבנה ובחוסר יכולת להתרכז בפעילות השוטפת. לעיתים מגיעה תחושת המשתמש אף לפגיעה פיזיולוגית כלומר תחושת בחילות והקאות.

מרבית התלונות בסיווג זה של מבנה אינו מעיד על חריגה מתסבולות הרכיבים המבניים. התכן ההנדסי אמור לתת פתרון רק לבעיית רגישות המשתמשים ללא השפעות על תכן רכיבים מבחינת חוזק.

בהמשך ינתנו קריטריונים פשוטים ומורכבים יותר לתכן נכון של רצפות מהסוג הנדון בפרק זה.

### 3.3.2 רצפות אולמות אירועים

קטגוריה זו דנה בבניינים הכוללים:

- אולמות ספורט מכל סוג כולל משחקים ותרגולי התעמלות גופנית

- אולמות ריקודים

- אולמות קונצרטים ללא מושבים קבועים

- אולמות כינוס קהילתי ללא מושבים

גורמי התנודות בקטגוריה זו כאשר השימוש הוא למטרות ספורט:

תרגולים קצביים מאורגנים כגון קפיצות מתוזמנות, ריצה לפי הנחיה קצבית וכד'. כל פעילות אשר מתואמת על ידי גורם חיצוני מנחה. מדובר בפעילות האורכת למעלה מ 20 שניות! פעילות כזו מעוררת רמות תנודה גבוהות מאד והיווצרות כוחות מעוררים גבוהים.

במקרה של אולם ריקודים:

ריקודים מתוזמנים ומתואמים עקב קצב המוזיקה המשמשת להרקדה. בנוסף – מחיאות כפיים מתואמות של קהל הנוכח באולם, פעילות העשויה להיות מלווה בתנועה אנכית של הקהל.

שימושי ספורט וריקודים מייצרים פעילות בתחום תדרים רחב אולם ניתן להבחין כי פעילויות הללו מתאפיינות בכמה מאפיינים מרכזיים.

ברוב הפעילויות הספורטיביות ניתן לראות מגע רגל המייצרת את העומס המעורר למשך זמן קצר מאד. עובדה זו גורמת להיווצרות כוחות הלמים קצביים גבוהים. תדר הפעילות יהיה גבוה, עד 3.5 הרץ, אולם צפיפות המשתמשים קטנה, כלומר עוצמת העומס תהיה נמוכה יחסית.

לעומת זאת באולמות ריקודים נמצא כי קיים מגע רציף והמשכי של כפות רגליים עם הרצפה ומכאן שנוצרים כוחות בעוצמות נמוכות בהשוואה לפעילות הספורטיבית אולם תדרי הפעילות עשויים להיות דומים אם כי נמוכים קמעה. כמובן שתתכן פעילות ריקוד "פרוע" אשר עשוי להדמות לפעילות הספורטיבית.

עקב המפתחים הגדולים המאפיינים אולמות ספורט יש להתחשב בתלות הריסון המבני של הרצפות המשמשות ליישומי ספורט או ריקוד במפתחים המקובלים ובחומרים המקובלים לבנייה. יחד עם זאת

קיימת תלות רבה מאד בתוספות בלתי מבניות על גבי רצפות אלה אשר משנים את רמות הריסון בצורה משמעותית.

ניתן לומר כי באולמות ספורט וריקודים, אלה העוסקים בפעילות אינם מרגישים את השפעת פעילותם. לעומתם, אלה הנמצאים בסמיכות לאולם הפעילות או בני אדם הנמצאים במקום באופן ניח, אלה ירגישו את תוצאות הפעילות הדינמית.

במקרים מיוחדים יכולה להיווצר תחושת אי נוחות רבה עד כדי תגובת פאניקה על ידי הקהל. התחושה תיווצר באופן ישיר עקב מגע עם הרצפה הנדונה או מתוך התבוננות באפקטים הנוצרים מסביב כמו תנודת תקרה אקוסטית, אביזרי תאורה, היווצרות תופעות אקוסטיות וכד'.

יש להביא בחשבון תגובות דינמיות אשר עלולות לגרום למפגע פיזי בחלקי תקרה, חיפויים, קירות גבס וכד'.

### 3.3.3 רצפות אולמות מושבים קבועים

בקטגוריה זו נמנים:

- אולמות בעלי מושבים קבועים המשמשים לקונצרטים והצגות
- גלריות באולמות ואצטדיונים.
- יציעי קהל ובמות קבועים או ארעיים
- מקורות העומסים הדינמיים באולמות אלה הם
- מחיאות כפיים קצביות של קהל יושב לצלילי מוזיקה.
- מחיאות כפיים משולבות בתנועות גופניות אנכיות.
- תנועות גופניות צדיות של קהל יושב או עומד.

הכוחות הדינמיים המתפתחים כתוצאה מהפעילות המתוארת לעיל יכולים להיות מאד מגוונים. הכוחות הדינמיים האנכיים הנובעים ממחיאות כפיים של אדם יושב תלויים בעיקר בעוצמת מחיאת הכף ובתנועות גוף מתלוות לכך. הכוחות הדינמיים עקב אדם עומד דומה לזו של אדם יושב בתלות בתוספת תנועות גוף אפשריות. בנוסף עשויים להתפתח כוחות דינמיים אופקיים עקב תנועה צידית של הגוף ובתלות בקצב ובאמפליטודה של התנועה.

ריסון רצפות אשר עליהן מושבים קבועים דומה לזה של אולמי ספורט או כל אולם אחר חסר מושבים. בגלריות בעלות מושבים קבועים המבנה שונה ועל כן שונה גם חלוקת המשקלים ביחס בין רכיבים מבניים לרכיבים לא מבניים.

ההשפעות של תנודת רצפות בעלי מושבים קבועים על משתמשים דומה מאד לזו אשר באולמות ללא מושבים.

### 3.4 גשרי הולכי רגל

גשרי הולכי רגל בנויים בדרך כלל כמבני בטון או פלדה המשכיים, לעתים בעלי חתך מורכב של בטון ופלדה גם יחד. קיימת אפשרות לגשרי הולכי רגל עשויים עץ או אלומיניום או כל חומר ייחודי אחר אולם כמובן אלה יהיו נדירים יחסית לחומרים הסטנדרטיים. גשרי הולכי רגל עשויים להבנות במספר מפתחים, בדרך כלל עד שלושה.

שיקולים כלכליים המשולבים בתכן מודרני הנמדד בכמות החומר ממנו נבנה הגשר. עקרון תכן זה מוביל לבנית ולמבנים תמירים וגמישים אשר עלול ליצור רגישות גבוהה לתגובה דינמית.

עקרונות מנחים בתכן הכללי של גשר הולכי רגל נשענים על הגדרת העומסים המאפיינת את השימוש, הגדרת התפקוד ורגישות המשתמשים, הגדרת ריסון מקובל למבנה והגדרת קשיחות סבירה. כל אלה יתוארו בפרוטרוט בהמשך בפרקים הבאים אולם ניתן כאן תיאור כללי על קצה המזלג לצורך כיוון להמשך.

העומסים יתוארו בהתאם לשימוש הצפוי. פעילות הולכי רגל העשויה לבוא לידי ביטוי בהליכת בני אדם, ריצה, קפיצות וכד'. כל אלה צפויים להתרחש בתחום תדרים מסויים ובעוצמות מסויימות. קיים כמובן גם אפיון של יישום העומס לאורך זמן על גבי מסעת הגשר כאשר נלקח בחשבון כי הרמת רגל מן המסעה יוצרת מצב של ביטול העמסה בעוד שדריכה חוזרת של רגל על גבי המסעה מלווה באימפקט אותו יש להביא בחשבון על פי הפרמטרים המקובלים – גובה ההפלה, קשיחות המסעה הקולטת את עומס האימפקט וכד'.

כקריטריון תכן כללי ניתן להגדיר תדרים ראשוניים מקובלים על פי למידה של מספר רב של גשרי הולכי רגל בעולם כפונקציה של מפתחים. מידע זה נלמד והוא זמין כקריטריון התחלתי טוב. בנוסף אל קריטריון התדר הראשון ניתן להגדיר קשיחויות מקובלות – כוח נקודתי מחולק בשקיעה נקודתית.

לצורך ביצוע האנליזות הדינמיות של מבנה גשר הולכי רגל ניתן להתחשב בהגדרות מקובלות של מנות ריסון קריטי צפוי. זאת ניתן להגדיר עבור מבנה בטון מזוין, בטון דרוך, מבנה פלדה ומבנה עשוי חתך מורכב. קריטריוני הבחינה לתכן נכון של גשר הולכי רגל כולל את שני הערוצים המקובלים בכל מבנה – קריטריוני חוזק, מניעת כשל מבני וקריטריוני שימוש על ידי בני אדם וציוד.

קריטריוני החוזק מושתתים על תוצאות אנליזה דינמית אשר מספקת ביד המהנדס את כל התגובות המכאניות של המבנה לאורך זמן – כוחות מוכללים (מומנטים, כוחות גזירה, כוחות ציריים וכד') ומאמצים. גדלים מכאניים אלה משמשים אותנו כרגיל לבחינת עמידות המבנה תוך השוואה לתסבולות המחושבות או מוכתבות על ידי תקני התכן הרלוונטיים (בטון, פלדה, עץ וכד')

קריטריון השירות יהיה מושתת על רמות התאוצות המתקבלות במסגרת התגובה הדינמית של הגשר. ניתן לשלוט ברמת התאוצות המתקבלות תוך שימוש באביזרי שיכוך חיצוניים כלומר מחוץ לתרומה של הרסון המבני.

### 3.5 השפעות דינמיות של רוח

למעשה שום מבנה בתחום ההנדסה האזרחית אינו חסין מפני השפעות זרימת רוח. זרימת רוח מהווה גורם מעורר לתגובות דינמיות. עוצמת התגובה הדינמית עקב עומסי הרוח תלויה בשני מרכיבים עיקריים - כמובן באופיו ובתכונותיו הגיאומטריות והחומריות של המבנה וכמו כן, באפיון פעולת הרוח הלא סטאציונארית כלומר משבים ושאר גורמים המביאים להתפתחות תאוצות בזרימה.

מבחינת אפיון זרימת הרוח יש להביא בחשבון

- התנהגות משבית
- מכות רוח והלמים
- השלת מערבולות
- דהירה
- פרפור
- דיברגנציה.

תנודות הנגרמות עקב זרימת רוחות יכולות להשפיע על מצבי שירות המבנה לאורך זמן תוך בחינת התפתחות תופעות התעייפות אשר להן השלכות על חוזק המבנה לאורך זמן. כמובן שכל אלה תלויים באפיון המבנה. להלן מספר סוגים ואפיונים כלליים של מבנים בהם יעסוק התקן בפרקים הבאים.

### 3.5.1 מבנים גבוהים

למרות שהשפעת זרימת הרוח על המבנה נבחנת באופן כללי בתחום השפעות דינמיות, לא תמיד יגיב המבנה בתגובה דינמית כלומר לא בהכרח יפתח המבנה תגובה תנודתית. ניתן להגדיר הגדרה כללית קריטריונית של מבנה רגיש לתנודות עקב פעולת רוח (מבנה גמיש) ולעומתו מבנה שאינו רגיש לפעולה זו (מבנה קשיח). הערה: להוסיף גרף 3.1 מבכמן וללוות את זה בתיאור מילולי

### 3.5.2 רכיבים תמירים

תמירות רכיבים תוגדר בכפוף לחומר הרכיב. רכיב מבטון מזויין יוגדר תמיר בתמירות מעל 70. רכיב מפלדה יוגדר תמיר כלהלן: רכיב ראשי-120, רכיב משני- מעל 200. רכיבים מסוג זה רגישים במיוחד לעומסי רוח. הטיפול ייעשה בשיטות המפורטות בת"י 414 ובמידת הצורך הוא יעשה בשיטות אנליטיות מתקדמות.

### 3.5.3 גשרים תלויים

גשר תלוי המורכב ממסעה תלויה על גבי כבלים המקנים לו גמישות ניכרת, יטופל אנליטית בשיטות דינמיות מתקדמות. כמו כן מומלץ לבצע מדידות במנהרת רוח.

## 3.6 ביסוס כגורם משפיע בתגובה דינמית של מבנה

תגובת מבנים רגישים לתנודות בשל הציוד שבתוכן או בשל תפקודם הפונקציונלי מושפעת באופן ניכר עקב מאפייני הביסוס ותכונות הקרקע.

תנודות חזקות עלולות לגרום לשקיעות קרקע בעיקר במקרים של קרקע לא קוהזיבית בצפיפות נמוכה עד ממוצעת כמו חול או צרורות. תופעה זו יכולה אף לגרום לשקיעת יסודות, בעיקר במקרים בהם מופיעות תנודות לעיתים תכופות או כאשר יש חול מודרג בצורה אחידה או קרקע מתחת מפלס מי תהום (ראה נספח ג).

לקביעת ייצוג הולם ככל שניתן למערכת קרקע-מבנה (Soil Structure Interaction – SSI) הקובעת את מידת ההשפעה של הביסוס על התגובה הדינמית של המבנה יש לבצע את הפעולות הבאות.

- אפיון הולם של התכונות הדינמיות של הקרקע ע"פ הפרמטרים הבאים :

- 1 חוזק לגזירה המבוסס על שיעור העיבור המותר בקרקע
- 2 מאפייני התנזלות קרקע כגון: שיעור מאמצי גזירה מחזוריים, דפורמציות מחזוריות, תגובת לחצי נקבוביות.
- 3 מודול אלסטיות דינמי
- 4 מאפייני ריסון ומקדם פואסון

- אפיון הולם לתנאי שפה אשר נקבעים על בסיס קשיחות וריסון הקרקע ומאפשרים ייצוג מבני של הביסוס.

נדרש לבחון את השפעת מאפייני הקרקע בערכי המינימום ובערכי המקסימום, ולקבל רצועה (מעטפת) לתגובה הדינמית החזויה. התכנון יבטיח כי ערכי התגובה המתקבלים עומדים בקריטריון לתגובה הדינמית (ראו פרק 6).

## **פרק ד - אפיון עומסים דינמיים במבנים**

### **4.1 עומסים הנובעים מפעילות משתמשים**

#### **4.1.1 תיאור כללי לאפיון תנועת אדם**

מהלך הדריכה משתנה כתלות במהירות התנועה ובגודל הצעדים, אך לכל צורת תנועה (הליכה, ריצה וכדו') קיים טווח מוגדר עבור גודל הצעד האפשרי, מהירות התנועה האפשרית ופרמטרים נוספים של התנועה.

בחינת הפרוס השונה של העומסים הנגרמים עקב תנועת אנשים מראה כי יש חלוקה לשתי קבוצות עיקריות:

(1) תנועה ללא התנתקות מהקרקע (הליכה בצורותיה השונות – איטית, נורמאלית, מקוטעת, מהירה -

Single – ריקוד, קפיצה, ריצה, קרקע (ריצה, קפיצה, ריקוד – Single  
(DCH → Double Camel Hump). (2) תנועה הכוללת התנתקות מהקרקע (ריצה, קפיצה, ריקוד – Single  
(SCH → Camel Hump).

ציור 4.1 מציג את אופי השתנות פירוס העומס עבור פעילות בתדרים שונים וממחיש את ההבדל בין פירוס  
העומסים.

ציור 4.1 עומסים דינמיים הנובעים מפעילות משתמשים, בתדרי פעילות שונים.

#### 4.1.2 סיווג פעילויות משתמשים

פעילות משתמשים מאופיינת ע"י 2 פרמטרים עיקריים, התדר ומקדם המגע האופייניים לסוג הפעילות. מאחר  
ופעילות זו משתנה בזמן, היא בעלת מאפיינים דינמיים ועל כן מייצרת מקדם הגברה דינמי לעומס  
הסטטי המחושב.

##### 4.1.2.1 תדר פעילות האדם

תדר פעילות האדם מאפשר להבדיל בין הפעילויות השונות כמפורט להלן (הערכים הנתונים עבור כל סוג  
פעילות אינם קבועים אך מייצגים את רצועת התדרים השכיחים)

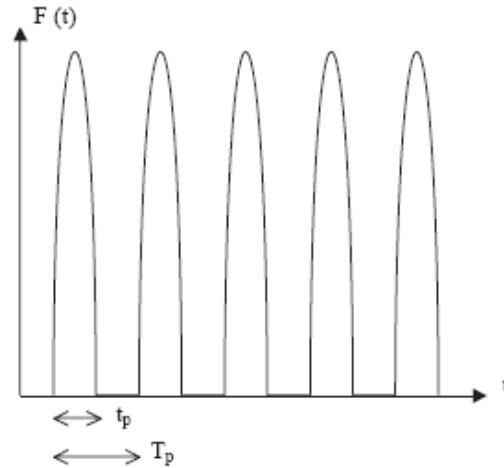
#### טבלה 4.1

פעילות	תדר	
א	הליכה	1.2-2.4 הרץ, 1.6-1.9 הרץ (85% מהאנשים)
ב	ריצה	2.0-3.2 הרץ.
ג	ריקוד	
	אדם בודד	1.2-2.8 הרץ
	קבוצה קטנה	1.5-2.5 הרץ
	קבוצה גדולה	1.8-2.3 הרץ
ד	קפיצה	1.8-3.4 הרץ

עבור פעילות נבחנת, תדר הפעילות הקרוב ביותר לתדר האופייני של המבנה יוביל לערכי תגובה  
מירביים.

##### 4.1.2.2 מקדם המגע

מקדם המגע  $\alpha_p$ , מבטא את היחס בין זמן המגע עם הרצפה לבין זמן המחזור של התנועה, כמוראה  
בציור 4.2, ובעיקרו משפיע על מידת הנגיפה המבטאת את ההשפעה המיידית של הפעילות הדינאמית.  
הפעילות הדינאמית המתוארת ע"י פרמטר זה מתייחסת לעומסים מסוג SCH, עבורם אין חפיפה בין  
הצעדים.



ציור 4.2 מהלך העומס הדינאמי בזמן, עבור פעילות SCH

$$\alpha_p = \frac{t_p}{T_p} ; 0 \leq \alpha_p \leq 1$$

(4.1)

$t_p$  הנו זמן המגע של האדם עם המבנה, ו-  $T_p$  הנו זמן המחזור של פעילות האדם.

טבלה 4.2 - ערכי מקדם מגע אופייני לסוגי פעילות שונים:

מקדם מגע אופייני	סוג הפעילות
1/2 – 2/3	הליכה
1/2	פעילות אירובית
1/3	קפיצה רגילה
1/4	קפיצה מוגברת

4.1.2.3 **מקדם הנגיפה** -  $K_p$ , מבטא את היחס בין הערך המירבי של העומס הדינמי המתפתח בעקבות

פעילות אדם בודד, לבין משקל אדם ממוצע,  $G$  (0.8 קילו-ניוטון).

$$K_p = \frac{F_{p,max}}{G} \quad (4.2)$$

#### 4.1.3 ניסוח מתמטי לאפיון העומס הדינמי הנובע מפעילות משתמשים

פעילות משתמשים אינה רציפה ועל כן ניסוחה המתמטי נעשה באמצעות איברי פורייה, בצורה הבאה:

$$F_p(t) = G \cdot \left( a_0 + \sum_{i=1}^n [a_i \cdot \cos(i \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_p) \cdot t) + b_i \cdot \sin(i \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_p) \cdot t)] \right) \quad (4.3)$$

$G$  הנו המשקל הסטאטי של האדם,  $a_0, a_i, b_i$  הנם מקדמי פורייה השונים,  $f_p$  הנו תדר פעילות האדם, ו- $n$  הנו מספר איברי פורייה המייצגים את העומס. הערכת כמות האיברים הדרושה נעה בין שלושה לבין שמונה איברים, בהתאם לאופי הפעילות הנבחן [השפעת איברי פורייה מתחום הסדר הגבוה כנ"ל, היא יותר משמעותית פעילויות SCH].

ניסוח מתימטי אלטרנטיבי לנוסחה 4.3 ניתן לראות בנספח

#### 4.1.3.1 פעילות SCH

השתנות העומס בזמן היא בצורה הבאה :

$$F_p(t) = \begin{cases} K_p \cdot G \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (4.4)$$

הגדרת מקדם הנגיפה  $K_p$ , כתלות במקדם המגע,  $\alpha_p$ , היא בצורה הבאה :

(4.5)

$$K_p = \frac{\pi}{2 \cdot \alpha_p}$$

ניסוח העומס בצורה המוצגת לעיל, מאפשר לבטא את איברי פורייה (משוואה 4.3) כתלות במקדם המגע האופייני לסוג הפעילות הנבחנת.

(4.6)

$$a_0 = 1$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\cos((2 \cdot n \cdot \alpha_p - 1) \cdot \pi) - 1}{(2 \cdot n \cdot \alpha_p - 1)} - \frac{\cos((2 \cdot n \cdot \alpha_p + 1) \cdot \pi) - 1}{(2 \cdot n \cdot \alpha_p + 1)} \right] & 2 \cdot n \cdot \alpha_p \neq 1; n = 1, 2, 3, \dots \\ 0 & 2 \cdot n \cdot \alpha_p = 1; n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$b_n = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\sin((2 \cdot n \cdot \alpha_p - 1) \cdot \pi)}{(2 \cdot n \cdot \alpha_p - 1)} - \frac{\sin((2 \cdot n \cdot \alpha_p + 1) \cdot \pi)}{(2 \cdot n \cdot \alpha_p + 1)} \right] & 2 \cdot n \cdot \alpha_p \neq 1; n = 1, 2, 3, \dots \\ \frac{\pi}{2} & 2 \cdot n \cdot \alpha_p = 1; n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$



#### 4.1.3.2 פעילות DCH

מקדם הנגיפה הצפוי מפעילות DCH יהיה נמוך מזה המתקבל בפעילות SCH, מהסיבות הבאות:

- פעילות DCH תחומה בטווח תדרים אופייני מצומצם, כמפורט ב- 4.1.2.1, ובעיקרו נמוך מתדרים אופייניים לפעילות SCH.
- חפיפה בין הצעדים אינה מאפשרת תיאור של הפעילות באמצעות מקדם המגע, מאחר וערכו מתקבל גדול מ-1.0.

פעילות זו ניתן לתאר כשילוב של העומס הסטטי ועומס סינוסואידלי המבטא את השתנות הכוחות האינרציאליים תוך כדי תנועת גוף האדם, כמבוטא במשוואה הבאה:

(4.7)

$$F_p(t) = G \cdot (1 + 0.25 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_p) \cdot t)$$

העומס המשתנה בזמן יהיה באמפליטודה מרבית השקולה ל-25% מערך עומס הפעילות.

#### 4.2 עומסים הנובעים מפעילות ציוד

הגורמים לתנודות דינמיות הנובעות מפעילות ציוד מוגדרים באופן פרטני בהתאם לאופי הציוד. בהמשך, בפרק 6.2 מובא דיון ברגישויות על פי סוגי שימוש שונים. שם מתוארת דרך הגדרת הגורמים לתנודות.

#### 4.3 עומסים הנובעים מרוח

אפיון תנודות מבנים הרגישים להשפעה דינמית עקב עומסים הנובעים מזרימת רוח נכלל בקטגוריה מיוחדת בת"י 414. יש להבחין בין תופעות VIV (vibration induced vortex) לבין תופעות אווירואלסטיות שבהן קיימת אינטראקציה הגורמת להשפעות הדדיות בין הזרימה סביב המבנה לבין שינויי צורתו תחת עומסים אלה. לרוב לא ניתן להסתפק בטיפול בבעיות אלה על ידי נוסחאות כגון אלו המפורטות בת"י 414 אולם קיימים פתרונות הנדסיים למבנים בהם קיימת השפעה קריטית תחת התופעות הללו. ליישום פתרונות אלה יש לבצע אנליזות זרימה ואווירואלסטיות על ידי מומחים ולעיתים אף מומלצת בדיקה ניסויית במנהרת רוח.

#### 4.4 הגדרת עומסי הלמים

עומס הלם הינו עומס בעל עוצמה גדולה הנגרם במשך זמן קצר ביותר. גורמים לעומסי הלמים קיימים הן מחוץ למבנה על ידי מכששים, פטישי אוויר וכד' והן בתוכו על ידי ציוד כגון מכששים פנאומטיים, גיליוטינות בבתי דפוס וכד'.

יש חשיבות גדולה לאפיון צורת הפונקציה המתארת את ההלם (סינוס, מלבן, טרפז או משולש), למשך הזמן בו העומס מגיע לערכו המקסימלי, משך ההלם והערך המקסימלי.  
 ציור .....(הבא) מספק נתוני ההגברה הדינמית תחת עומסי הלם,  $V_s$ , בעלי צורה שונה כפונקציה של היחס בין משך ההלם,  $t_p$ , לבין זמן המחזור הראשון של גורם ההלם,  $T_1$ .

ההגברה הדינמית מוגדרת על ידי היחס בין אמפליטודת השקיעה המקסימלית המתקבלת תחת עומס ההלם לבין השקיעה האלסטית תחת עומס מקביל סטטי.

**4.5 הגדרת עומסים בניסוי ומדידה**

**4.5.1 4.4.1 מטרות המדידה**

**4.5.1.1 4.5** אפיון תכונות תנודה חופשית של רכיבי מבנה. תכונות אלו מבוטאות על ידי הגדרת תדרים וציור מודים אופייניים.

**4.5.1.2 4.6** הקלטות לאורך זמן של תגובה דינמית של רכיבים מבניים תחת תנאי סביבה קיימים. במהלך הניסוי יבוצע רישום של תאוצות לאורך זמן (דוגמת רישום, ראו בנספח ).

**4.5.1.3 4.7** באמצעות תהליך מתמטי (FFT) תבוצע התמרה ממישור הזמן למישור התדר (דוגמת רישום, ראו בנספח (??) ה).

**4.5.2 5** אפיון ציוד המדידה (תרשים סכמטי ראו בנספח ??)

אפיון ציוד המדידה יהיה כלהלן:

**4.5.2.1 5.1 מדי תאוצה**

**4.5.2.1.1 5.1.1** יש להשתמש ב"מדידים סיסמיים" אשר מסוגלים לחוש בתדרים נמוכים, שערכם יהיה בין 0.2 הרץ ל 200 הרץ.

**4.5.2.1.2 5.1.2** תחומי תאוצה יהיו בין 10 micro-g ל 10g.

**4.5.2.2 5.2 פטיש עירור**

פטיש עירור יהיה:

**4.5.2.2.1 5.2.1** "פטיש מודאלי" במשקל 5 ק"ג לפחות.

**4.5.2.2.2 5.2.2** בתחומי הפקת כח של עד 2 טון.

**4.5.2.2.3 5.2.3** אפשרות חיבור כריות שונות לקבלת רוחב אות של מספר עשרות מילישנייה. זאת מאחר ומדובר בתדרים נמוכים.

- 4.5.2.3 .5.3 מערכת איסוף ודגימה
- מערכת איסוף ודגימה תהיה :
- 4.5.2.3.1 .5.3.1 מערכת רב ערוצית לפי מספר המדידים הנדרש כפול מספר הכיוונים הנמדדים.
- 4.5.2.3.2 .5.3.2 יש לקבל החלטה לפי השימוש במבנה אם כיווני המדידה – יהיו אנכי או וגם אופקיים.
- 4.5.3 .6 אופן ביצוע
- 4.5.3.1 .6.1 יש לבצע אנליזת תנודות חופשיות מקדימה מקדימה לזיהוי הצורות המודאליות על מנת להגדיר נקודות בהן התנועה המודאלית מתאפסת ולהמנע מקריאות חסרות ערך.
- 4.5.3.2 .6.2 לצורך קביעת צורות מודאליות יש לשרטט רשת אשר בצמתיה יונחו מדי התאוצה.
- 4.5.3.3 .6.3 קצב הדגימה יהיה עד 5 KHz.
- 4.5.3.4 .6.4 רזולוציית דגימה תהיה לפחות כלומר  $2^{16}$  (16 bit resolution) נקודות (64,000 במספר).
- 4.5.3.5 .6.5 יש לוודא יכולת דגימה רציפה בין אורך זמן של שניות בודדות ועד לימים בודדים לפי הצורך.
- 4.5.3.6 .6.6 יש לוודא יכולת פענוח של פונקציות תמסורת עם בדיקת קוהרנטיות (ראו דוגמה לפונקציית תמסורת בנספח ??ה) אשר מסייעת לפענח ולוודא איכות אותות נמדדים. כלומר העירור והתגובה. בדיקת הקוהרנטיות תשמש לקביעת גורם עירור משפיע על תדר מדוד ולהיפך.
- 4.5.3.7 .6.7 דרך פונקציות התמסורת ניתן לקבל את שינוי זווית הפאזה בין העירור לתגובה.
- 4.5.3.8 על בסיס זווית הפאזה ניתן לקבוע וודאות של תדר משום שתדר מזוהה במצב רזוננטי ובמצב זה תהיה זווית הפאזה 90 מעלות אחרי הרזוננס תהיה זווית הפאזה 180 מעלות – אינדיקציה נוספת.
- 4.5.3.9 יש לוודא יכולת פענוח מודאלית על מנת לאפשר ציור מודים (דוגמה לציור מודים ראו בנספח ???ה).
- .6.8
- 4.5.3.9.6.9 יכולת הצגת ריסונים מודאליים מתוך פונקציות התמסורת הנמדדות.
- 4.5.3.10 .6.10 יכולת מדידה רציפה תחת עירור מתמשך על מנת לאפשר מעקב ספקטראלי לאורך זמן.
- 4.5.3.11 .6.11 באופן זה מתקבל תרשים תלת ממדי של אמפליטודה לעומת תדר לאורך זמן. גראף זה מכונה water fall. התרשים מאפשר לעקוב אחר התפתחות ושינוי השפעת התדר לאורך זמן.
- 4.6 עומסים הנובעים מחוץ למבנה

#### 4.6.1 כללי

הנושא הנדון בפרק זה מגוון מאוד, במקרים מסוימים מסובך לאין שעור, ולרוב מושפע מתנאים מקומיים. לא כל אחד המצוי בחיזוי תנודות יוכל לצייר תמונה מדויקת של הרעידות הצפויות ולערך צפי מדויק בהסתמך על המידע. הדוגמאות המובאות בנספח A נועדו לסייע בהתמודדות עם קושי זה. פרק זה דן בעומסים הנובעים מחוץ למבנה והערכת השפעתם על חיזוי תגובת המבנה. הוא מספק פרוצדורות כלליות וחלקו הפרקטי מציג מספר מקורות תנודה ואת השפעתם. דוגמאות למדידה של תנודות ממקורות כאלו באמצעות שיטות מדידה מקובלות מובאות בהמשך פרק זה.

כמו כן הפרק מספק קוים מנחים לחיזוי תנודות, כולל חיזוי ערכים עבור פרמטרים בהם ניתן להשתמש להערכת ההשפעה של התנודה על בני אדם, על המבנה עצמו, או על רכיבים בו הערה: לתנודות מבניות עלולים להיות מקורות רבים. למעשה ניתן לחזות בקירוב את השפעת התקדמות התנודה ואת השפעת התנודה על המבנה. לפיכך לצורך חיזוי התנודות חייבים להיות מעורבים מומחים בעלי ידע וניסיון בתחומי הדינמיקה והקרקה.

#### 4.6.2 שיטות להערכה ראשונית

פרק זה מתאר שיטות להערכת ההשפעה של תנודות ממקור ידוע (קיים) על מבנה סמוך בתכנון, או ממקור בתכנון על מבנה סמוך קיים. ניתן לקבוע את התקדמות התנודה וההעברתה למבנה באמצעות ערכים הנקבעים במדידה או על פי ניסיון ותוך שימוש במידע הנתון כאן ובמשוואות (1) עד (4) הנתונות בהמשך. פרמטרי התנודה החזויים יכולים לשמש להערכת ההשפעה של התנודה לדוגמא: חשיפה של בני אדם, הסתברות לנזק מבני, וכו'. מדדי התנודה מושפעים ממקור התנודה, תכונות הקרקע לאורך נתיב ההתקדמות, תנאי האתר בו ממוקם המבנה, כמו גם הקרקע עליה בנוי המבנה. מקורות התנודה מחולקים לפי:

- גיאומטרית המקור (ראה תת-פרק 4.6.2.2 וצויר 1)
- סוג התנודה (ראה תת-פרק 4.6.2.2 וצויר 1)
- שכיחות חזרת התנודה
- פילוג התדרים
- שטח החשיפה
- זמניות המקור (קבוע או זמני)
- משך התופעה

מקורות אשר אינם מטופלים באופן ישיר בסעיף 4.6.3 - מקורות תנודה מחוץ למבנה, יטופלו באופן דומה.

דוגמאות לכל סוג מקור ולהשפעה אפשרית שלו מובאות בסעיף (בהמשך) כולל:

- גיאומטרית המקור ותופעות לאורך זמן

- סיווג (סוג התנודה, תחום תדרים, משרעות)

- מכאניזם העירור

- עקומות מרחק-משרעת

### 4.6.3 התקדמות תנודות

האנרגיה המועברת את הקרקע מהמקור התונד מתקדמת בשני סוגי גלים: גלי גוף (לדוגמא גלי לחץ, גלי גזירה) וגלי שטח (לדוגמא גלי ריילי). גלים נוצרים ברמות שונות של ערור כתלות בסוג המקור ואופי האנרגיה המועברת לקרקע.

יש להבחין בין אזור התקדמות גלים חופשית (שדה רחוק) והאזור הסמוך למקור התנודה ומושפע מתהליכים מורכבים בהרבה (שדה קרוב). המרחק  $R_1$  ממרכז המקור, מגדיר את המעבר מהשדה הקרוב לשדה הרחוק. לכל מקורות התנודה אשר ניתן לתארם באופן אידיאלי כמקורות נקודתיים או קוויים, מרחק הייחוס לשדה הרחוק נתון הנוסחה שלהלן:

$$R_1 = a/2 + \lambda_R \quad (1)$$

כאשר:

$a$  - מידת המקור המקבילה לכיוון ההתקדמות

$\lambda_R$  - אורך גל השטח.

מקורות הקרובים לפני הקרקע יוצרים תנודות אשר מתקדמות בעיקר כגלי שטח (גלי ריילי). העוצמה (מגניטודה) של התנודה המועברת דרך הקרקע דועכת עם הגידול במרחק מהמקור, בעיקר כתלות בשיכוך הגיאומטרי [geometrical damping] ובשיכוך החומרי [material damping].

בשדה הרחוק, (כאשר  $R > R_1$ ) ההפחתה באמפליטודת מהירות התנודה ניתנת לקרוב באמצעות:

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left( \frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp [-\alpha(R - R_1)] \quad (2)$$

כאשר

$\bar{v}$  - מהירות התנודה, (mm/s)

$\bar{v}_1$  - מהירות התנודה במיקום  $R_1$ , (mm/s)

$R_1$  - מרחק הייחוס, (m)

$R$  - המרחק המעשי מהמקור, (m)

n - מעריך

$\alpha$  - מקדם הנחתה, ( $m^{-1}$ ),

$\alpha \sim 2\pi D/\lambda$  כאשר:

D מקדם שיכוך

$\lambda$  אורך הגל הרלוונטי, ב-m, הנתון ע"י  $c/f$  כאשר:

c מהירות התקדמות הגל (מ' /שני) ערכי c יקבעו במדידת אתר או ממקורות בספרות מקצועית.

f התדירות Hz.

ההנחתה הגיאומטרית של האמפליטודה  $\left(\frac{R}{R_1}\right)^{-n}$  היא תוצאה של הקטנה בצפיפות האנרגיה עם גידול

המרחק מהמקור. המעריך n תלוי בגורמים הבאים .

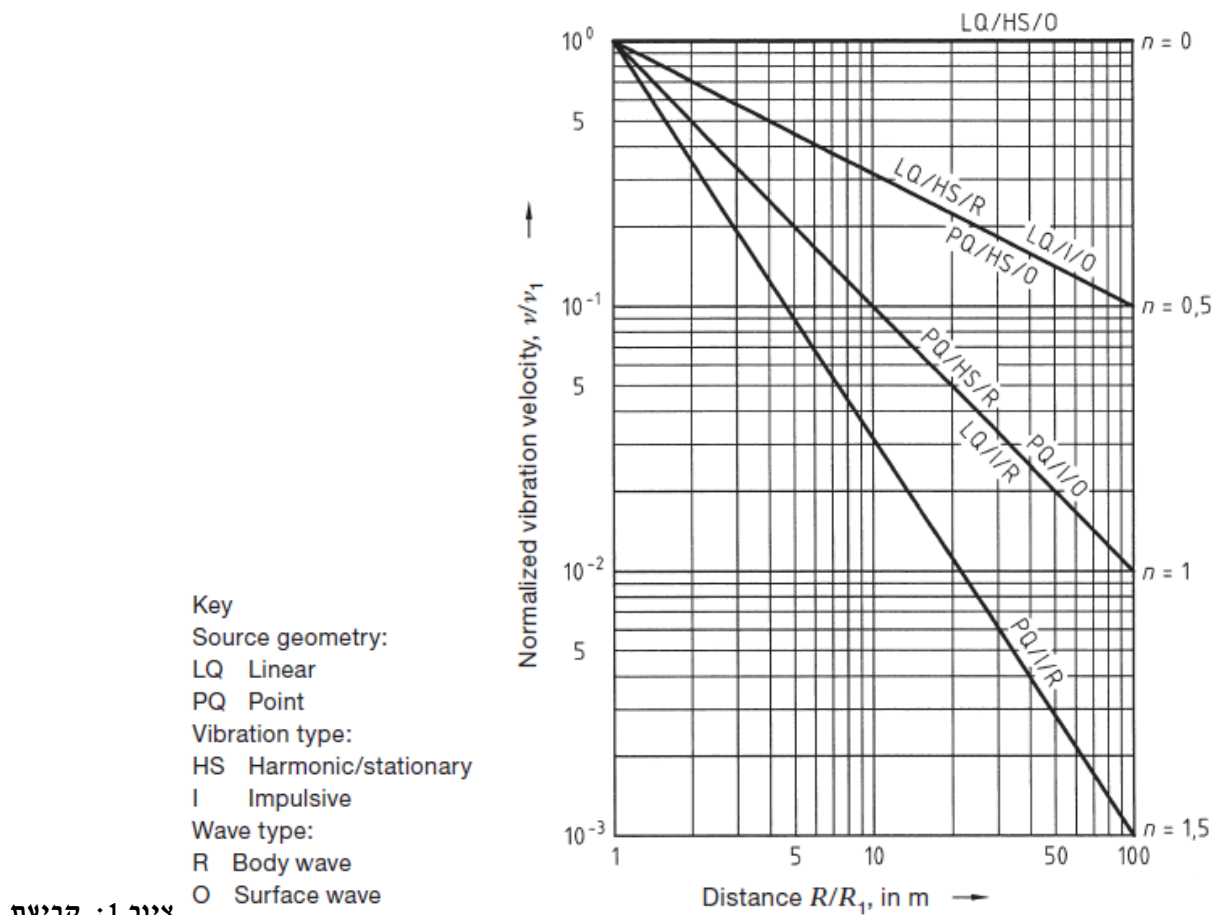
כחלופה לחישוב המהירות דרך נוסחה 2 ניתן להשתמש ב ציור 1.

(1) גיאומטריית המקור: נקודתי (PQ) או קווי (LQ).

(2) סוג התנודה: הרמונית/ סטציונרית (HS) או אימפולסיבית (I).

(3) סוג הגל: גל גוף (R) או גל שטח (O).

עבור מקורות קוויים בעלי אורך מוגבל (לדוגמא, פלטת בסיס ארוכה), המעריך n יתייחס למקור קווי בסביבה הקרובה של מקור התנודות, אולם עם הגידול במרחק הוא יתייחס יותר למקור נקודתי. יסוד בעל ממדים אורכיים הגדולים יותר ממחצית אורך הגל לא ייחשב כמקור נקודתי. ניתן להתחשב בעירור כתוצאה מתנועת רכבת, כסדרה של מקורות נקודתיים (כלומר מקור מוארך עם ערוך מחוץ לפאזה). במקרה זה המעריך בשדה הרחוק יהיה בין 0.3 ל-0.5, פרט לנקודות קבועות כדוגמת נקודות מיתוג בהן הרכבת יוצרת עומס נקודתי אימפולסיבי המייצר גלי שטח.



ציור 1: קביעת

**המעריך  $n$  עבור הנחתת אמפליטודת התנודה עם המרחק**

במקרים מסוימים, ערכי המעריך עשויים להיות שונים בצורה ניכרת מהערכים המקורבים הנתונים בציור 1. לדוגמא ערכים כאלו עשויים לנבוע מהגורמים הבאים:

- שיכוב קיצוני [Extreme stratification] של הקרקע
- נוכחות מבנים
- אינטראקציה בין מספר מקורות תנודה.

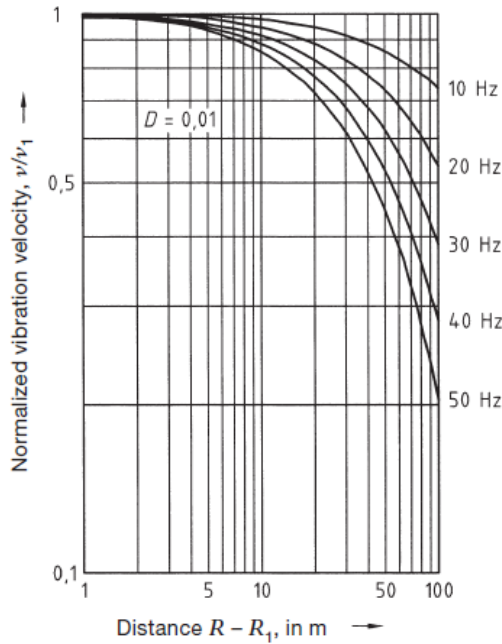
במקרים אלו יש לקבוע את המעריך  $n$  בכל מקרה לגופו כאשר ציור 1 משמש כקו מנחה. בציור 1, הערכים עבור המעריך  $n$  מבוססים על הדיספרסיה של גלים בקרקע טבעית הנוצרים ע"י מקור אימפולסיבי.

מי תהום מהווים תווך מוליך להתקדמות גלי לחץ, אולם השפעתם על גלים שטח מועטה. גורם נוסף המביא להנחתת האמפליטודה הוא בליעה של אנרגיית תנודה בקרקע (שיכוב חומרי). גורם זה תלוי בתדירות כפי שבא לידי ביטוי באיבר  $\exp[-\alpha(R - R_1)]$  במשוואה (1). מקדם השיכוב  $D$  המגדיר את פרמטר  $\alpha$  תלוי במבנה הקרקע, דחיסותה [ובאמפליטודה של הדפורמציה הדינמית. לשם עריכת חקירות מקדימות והערכות, יש להתחשב בערך  $D$  של 0.01 המתאים לקרקע מסוג

[regolith] רגוליתית (שכבה של חומר הטרוגני רופף על גבי סלע מוצק ערכים גבוהים מסף זה יש לוודא ולאמת.

ההגדרה של מקדם ההנחתה מביאה בחשבון שתנודות בתדרים גבוהים מרוסנות במידה גדולה יותר מתנודות בתדרים נמוכים (ראה ציור 2).

בשדה הקרוב, (כאשר  $R < R_1$ ) התנאים הנדונים לעיל אינן תקפים ויש לערוך את חיזוי התנודות באמצעות מודלים ממוחשבים או שיטות חקירה אחרות.



ציור 2: השפעת בליעת אנרגיית התנודה ע"י הקרקע על אמפליטודת ההנחתה עם הגידול במרחק וכתלות בתדירות (עבור  $D=0.01$  ומהירות התקדמות גל גזירה  $c_s=200$  m/s).

#### 4.6.4 מעבר תנודות למבנה

כאשר התנודה מועברת ליסודות המבנה דרך הקרקע, היא משתנה כתוצאה מההתנהגות האלסטית של תת-הקרקע וכתלות באורך הגל הרלוונטי. כמו כן, היא מושפעת ממסת המבנה ומתצורתו. עבור תנודות שהן בעיקרן הרמוניות, ניתן לתאר בקירוב תנודות אנכיות בתחום התדרים הנמוכים תוך שימוש בפונקציית התמסורת של מתנד בעל דרגת חופש אחת בעל תדירות עצמית  $f_B$  הנתונה ע"י:

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_B}{m_B}} \quad (3)$$

כאשר:

$k_B$  קשיחות הקפיץ של תת הקרקע

$m_B$  מסת הבניין, תחת ההנחה שהבניין תונד בפאזה.



כקו מנחה, ניתן להניח את התדירויות העצמיות הבאות עבור קשיחות קרקע ממוצעת כפי שבאה לידי ביטוי במהירויות גל גזירה בתחום 150-200 מ"ש/שני :

- (א) עבור בניין בן 1-2 קומות:  $\approx 15\text{Hz}$ .
- (ב) עבור בניין בן 2-6 קומות:  $\approx 8\text{Hz}$  עד  $12\text{Hz}$ .
- (ג) עבור בניינים בני יותר מ-6 קומות:  $\approx 8\text{Hz}$ .

ערך התמסורת המקסימאלי  $V_F$  נתון ע"י  $1/(2D_0)$  כאשר  $D_0$  הוא מקדם השיכוך עבור מערכת אקוויוולנטית ("מבנה על הקרקע"). עבור קרקע רגוליתית, ניתן להניח כי ערכו של  $D_0$  לפחות 0.25. עבור קרקע שכבתית במיוחד, רכה או סלעית יש לאמת את ערכי  $D_0$  עבור כל מקרה לגופו. עבור תנודות בתדרים שמעל התדרים העצמיים של המערכות המוזכרות לעיל, התנאים הפשטניים אינם תקפים, זאת משום שלתכונות האלסטיות של היסוד ולאילו של המבנה השפעה ניכרת. בתחום תדרים זה, ניתן להניח ערך תמסורת ממוצע השווה 0.5. ערכי העברה נמוכים מזה יש לאמת בכל מקרה לגופו. כאשר המבנה בנוי על קרקע סלעית, אין שיכוך של התנודות המועברות אל היסוד. כאשר התנודות מועברות ממערכת הביסוס דרך הקירות אל התקרות, הן בדרך כלל מוגברות. התנודה המרבית צפויה כאשר התקרות בתהודה. ניתן להעריך את ערך ההעברה המקסימאלי עבור תקרות  $V_D$  כשווה ל-  $1/(2D_1)$  כאשר  $D_1$  גדול מ- 0.02 אבל נמוך מ- 0.05 עבור בניינים עם תקרות מבטון מזוין. עבור תקרות במפתחים קצרים, כאשר יש מחיצות (כולל קירות שאינם נושאים) וכאשר הביסוס מעל שכבת רגולית, השיכוך מוגבר. ההערכות המובאות כאן תקפות כאשר הבניין תונד בפאזה, בתנודה הרמונית בעיקרה, לכל אורכו ורוחבו. אם מקור התנודה בצמוד לבניין, או משנה מקומו, או אם הוא בעל אופי אימפולסי, פאזה התנודה תשתנה בקרבת היסודות ובמקרה זה ההערכות הנתונות לעיל הינן שמרניות. תנודה אופקית משחקת תפקיד חשוב בתגובה של מבנים גבוהים ותמירים וכאשר תדירויות הערור נמוכות. ניתן לקבל הערכה גסה לתדר העצמי הנמוך של מבנה רב קומות (בעל לפחות חמש קומות) לפי הנוסחה הבאה :

$$f_1 = \frac{10}{n} \text{ Hz} \tag{4}$$

כאשר  $f_1$  תדר (Hz) ו- $n$  מספר הקומות.

#### 4.6.5 מקורות תנודה מחוץ למבנה

עבודות זמניות המבוצעות באתר ומאופיינות בפיצוצים, הפלת מסות, הרעדות, תנועת רכב כבד וכדומה, עלולות לגרום לתנודות מורגשות באתרי מגורים, תעשייה וכו' הנמצאים בסביבה. פרק זה מתאר את סוגי הפעילויות וסוגי המפגעים הנוצרים עקב פעילויות אלה. ומצביע על דרכים

לחישוב השפעותיהם. מאחר ומדובר בפעילויות זמניות, ניתן לבסס על חישובים אלה הנחיות להתרעה לפני הפרעות לאתרים השכנים.

#### **4.6.5.1 אירועים יחידניים**

##### **4.6.5.1.1 כללי**

בפרק זה מוגדר אירוע יחידני שאינו מושפע ואינו משפיע על אירועים שמתרחשים בזמן אחר. ככלל, הזמן בו מתרחש אירוע יחידני ניתן להגדרה וניתן להשפעה באמצעים שונים. היות שהעוצמה של אירוע יחידני ניתנת גם היא להגדרה, ניתן לנקוט באמצעים בטרם האירוע. תנודות הנגרמות בשל אירוע יחידני לא מובילות בדרך כלל לתהודה מובהקת [Distinct resonance] במבנים או ברכיבי מבנה. יש לתת תשומת לב מיוחדת לאירועים יחידניים בשדה הקרוב.

##### **4.6.5.1.2 פיצוצים.**

תנודות הנגרמות עקב פיצוץ מעל הקרקע או בתת הקרקע, שמטרתו שחרור או שבירת סלעים, בדרך כלל אינן ניתנות למניעה. התנודה הנגרמת מתהליכים אלו אורכת מספר שניות. יש להתייחס לפיצוץ כמקור אימפולסיבי נקודתי. עבור מערכים הכוללים מספר פיצוצים המופרדים במרחב ובזמן, התנודה הכוללת הנגרמת היא סופרפוזיציה של התנודות הנגרמות ע"י כל פיצוץ. עוצמת התנודה ושטח החשיפה נקבעים בעיקר ע"י שיטת הפיצוץ וגודל המטען. התקדמות התנודה ופילוג התדירויות מושפעים משמעותית מהתנאים הגיאולוגיים המקומיים. במרחק רב מהמקור ובמשך הזמן הנבדק, ניתן להבחין בין גלי גוף בתדר גבוה וגלי שטח בתדר נמוך.

בכרייה, חציבה, סלילת דרכים ובהנחת תשתיות שירות (צנרת וכו') ניתן להניח כלהלן: הקשר המרחבי בין המקור והמבנה הקולט משתנים עם התקדמות העבודה. במחצבות ובמכרות, ניתן בדרך כלל לצפות כי תנודות הנובעות מפיצוץ יתרחשו למשך מספר שנים. לרוב לא יתרחש יותר מפיצוץ אחד ביום. תנודות הנובעות מפיצוץ באתרי בנייה, מתרחשות רק לעיתים. נדיר שעבודות הפיצוץ נמשכות יותר משנה.

רק לעיתים רחוקות לתנודות כאלו השפעה משמעותית במרחקים הגדולים מ-1500 מטר מהמחצבה ו-400 מטר מאתר הבנייה

ניתן להעריך את עוצמת התנודות בשדה הרחוק על פי הערך המקסימלי של מהירות התנודה בשדה החופשי כמפורט בנוסחה הבאה:

$$v_{max} = \kappa \left(\frac{L}{L_0}\right)^b \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-m} \quad (5)$$

כאשר :

$v_{max}$  - מהירות התנודה בשדה החופשי (מ"מ/שניה)

L הוא מטען הפיצוץ [per delay] (ק"ג)

$L_0 = 1$  ק"ג (ערך ייחוס)

R המרחק ממקום הפיצוץ, ב-מ"מ {המקור נותן את הערך ב-מ"מ. לדעתי כדאי לבדוק זאת}

$R_0 = 1$  מ' (ערך ייחוס)

$\kappa$  מקדם תיקון, ב- מ"מ/שניה, הנקבע באופן אמפירי (לדוגמא במהלך פיצוץ ניסיון)

m, b ערכים אופייניים הנקבעים באופן אמפירי.

את הערכים עבור k, m, b יש לקבוע על פי מקרים בהם הקרקע, שיטת הפיצוץ, והמרחקים דומים למקרה הנדון. כמו כן יש לקחת בחשבון כל פיזור אפשרי [5].

#### 4.6.5.1.3. נפילת מסות

פעילויות בהן מעורבת נפילה של מסות גדולות גורמות להיווצרות תנודות. דוגמאות למקרים כאלו הם הידוק דינמי ופעולות הריסה, אם באמצעות פיצוץ או באמצעות כדור הריסה. התנודות נוצרות כתוצאה מהאימפקט (הלם) של המסה המופלת או המבנה המתמוטט ומועברות דרך הקרקע. עוצמת התנודה הנובעת מההלם ופילוג התדירויות תלויים ב :

-המסה הנופלת G

-גובה הנפילה h

-מבנה פני השטח הנתון לעומס ההלם -סוג הקרקע וקשיחותה

- מבנה שכבות הקרקע

-תבליט פני הקרקע בין נקודת ההלם והנקודה בה נמדדת התנודה J Relief of the surface between the

[point of impact and the point at which the vibration is measured

ניתן לחשב בקירובאת העוצמה של מהירות התנודה הנובעת מהלם נפילת מסה ע"י חישוב המהירות

המקסימאלית של התנודה בשדה החופשי  $v_{max}$  ב-מ"מ/שניה ע"י נוסחה (6) כלהלן :

$$v_{max} = \kappa \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.5} \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-m} \quad (6)$$

כאשר :

E אנרגיית ההלם ( $E=Gh$ ), (קילוג'אול)

$E_0 = 1$  (ערך ייחוס) (קילוג'אול)

R המרחק ממקום האימפקט, (מילימטר)  $R_0 = 1$  (ערך ייחוס) (מטר)

א (אקלזניט: קאדפ) - מקדם תיקון, הנקבע באופן אמפירי (לדוגמא במהלך פיצוץ

ניסיון)(מ"מ/שניה)

m - ערך אופייני הנקבע באופן אמפירי.

את הערכים עבור m, a יש לקבוע על פי מקרים בהם הקרקע, ההתנהגות של ההלם [Impact behavior], והמרחקים דומים למקרה הנדון.

כדי למזער [to mitigate] תנודות הנגרמות ע"י נפילת מבנים תמירים כדוגמת מבנים מבטון מזוין או ארובות, ניתן להשתמש במצע של חומר משיך [a bed of ductile material] כדוגמת חול או [debris]. את אנרגיית ההלם ואת האתר [the impact energy and site can be determined...] ניתן לקבוע באמצעות ריכוז מסה כמתואר {בגרמנית} במקור [6].

מומלץ לתת תשומת לב מיוחדת לתנודות הנוצרות כתוצאה מהריסה באמצעות פיצוץ, למרות שבדרך כלל העוצמה של תנודות כאלו קטנה מזו של תנודות הנוצרות ע"י נפילת מסה {אני לא בטוח שהמשפט האחרון תורם משהו חשוב לעניין}.

#### 4.6.5.2 עבודות בניה [Construction work]

##### 4.6.5.2.1 כללי

הניסיון מראה כי סוגים מסוימים של עבודות בנייה גורמים להיווצרות תנודות משמעותיות. באופן כללי, ניתן לסווג מקורות אלו כמקורות נקודתיים, אימפולסיביים או קבועים כמפורט להלן.

##### 4.6.5.2.2 מקורות אימפולסיביים

מקורות אימפולסיביים כוללים:

דחיקת כלונסאות [Pile drivers]

סיתות סלע [Rock Chisel] לדוגמא בתהליך שבירת סלע לצורך ביצוע כלונסאות קדוחים [bored piles]

מסות נופלות (ראה תת-פרק 5.1.3)

פיצוצים (ראה תת-פרק 5.1.2)

כאן עוצמת התנודה (מגניטודה) פרופורציונאלית בקירוב לשורש הריבועי של האנרגיה המועברת אל הקרקע, למרות שהעוצמה האקטואלית תלויה בצורה חזקה בתנאים המקומיים. תחום התדירויות מאופיינת בספקטרום רחב של תדירויות עד 80 HZ.

גורם נוסף, להלמים [shocks], יכול להיות מיכון כבד ותנועה של מסות גדולות לדוגמא בהפעלת ציוד חפירה, מכונות קידוח כלונסאות, תנועת כלי רכב באתר על קרקע לא מיושרת היטב.

##### 4.6.5.2.3 מקורות קבועים

מקורות קבועים כוללים ציוד החדרת כלונסאות בריטוט וציוד ציפוף כגון מרטטי פלטה, מרטטים גליליים ומרטטים עמוקים.

בעבודה עם ציוד כנ"ל, תדרי הפעלה גבוהים (לדוגמא, מעל 35 HZ) בדרך כלל עדיפים על פני תדרים נמוכים, המטרה היא להימנע מעבודה בתחום תדירויות התהודה של תקרות בבניינים סמוכים. למרות זאת, התנעה והדממה של מכוונות עם מומנט סטטי קבוע עלולות להביא לתהודה קצרת משך כאשר פעילות המכונה מגיעה לתדר העצמי של התקרה.

פטישי כלונסאות רוטטים [vibratory pile hammers] עם תדירויות פעולה נמוכות עלולים לגרום תנודות חזקות אפילו במרחקים גדולים, בעיקר כאשר הם פוגעים בעצמים בקרקע. כאן תדירויות העבודה עלולות להגיע לערכים בהם תקרות בתהודה. תהליך זה מאופיין בהעברה משמעותית של אנרגיה.

גורם מרכזי המשפיע על המגניטודות של התנודות הנגרמות ע"י פטישי כלונסאות הוא היחס בין האנרגיה הדינמית הנוצרת בדפורמציות בקרקע (pile driving) ובין האנרגיה האלסטית הנוצרת (התקדמות תנודות). יחס זה תלוי בתכונות של מקור התנודה, תדר הפעולה שלו, ותכונות הקרקע והכלונס.

במקרה של ציוד ציפוף, מגניטודת התנודות תלויה בעיקר בכוח הצנטריפוגלי ובמאפייני הקרקע. מגניטודת התנודה גדלה באופן פרופורציונאלי ישיר לדרגת הציפוף.

הניסיון מראה כי מרטטי פלטה קטנים (כלומר עם כוח צנטריפוגלי עד 25 ק"נ) המופעלים בתנאים נורמליים, אינם מביאים לתנודות שצפויות לגרום נזק (על פי הערכים כמפורט בפרק 6.3

), אפילו כאשר המרטטים פועלים בסמיכות למבנה.

#### **4.6.5.2.4 תנודות הנוצרות במהלך עבודות בנייה**

באתרי בנייה יש מספר רב של פעילויות שבדרך כלל לא מובילות לתנודות משמעותיות (לדוגמא כלונסאות קדוחים או קירות דיאפרגמה) למעט מקרים בהם מערכת הקידוח נתקלת בעצמים בקרקע. מכוונות לקידוח מנהרות המופעלות בסמוך למבנים עלולות גם הן לגרום לתנודות משמעותיות.

#### **4.6.5.3 תנועה**

##### **4.6.5.3.1 כללי**

יש להבחין בין מקרה שבו מבנה מתוכנן ליד מקור תנודות (excitation) לבין מקרה שמתוכנן מקור תנודות ליד מבנה קיים. בשני המקרים יש לעמוד בדרישות המפורטות בפרק 6 לקריטריוני רגישות בני אדם וציוד. במקרה הראשון יש לבודד את המבנה המתוכנן ממקור התנודות. במקרה השני יש לדאוג למניעת העברת תנודות מהמקור לסביבתו.

##### **4.6.5.3.2 תנועה מסילתית**

במערכות תנועה מסילתית (באינטראקציה בין גלגלים, מסילות וקרקה), תנודות נוצרות בגלגלים ו בצירים.

התנודות מושפעות מהגורמים הבאים :

השתנות מחזורית בקשיחות **מסלול הנסיעה**, כתוצאה ממעבר מחזורי בין קטעי מסילה הנשענת ישירות **על האדנים** לבין קטעי המסילה שביניהם.

חוסר אחידות (אי-רגולריות) בפן העליון של המסילות הבא במגע עם הגלגלים

סטיות אופקיות של **המסילה ממקומה המתוכנן**

סטיות ממעגליות הגלגלים..

תדירויות עצמיות של כלי הרכב המסילתי.

הכוחות הדינמיים המתוארים לעיל מייצגים את הרכבת כהפרעה סטציונרית נקודתית. עם הגידול

במרחק מהמסילה הם מהווים מקור קוי (ראה תת-פרק 4.6.2.2).

באזורים כגון :

אי-רציפויות, בעיקר במסיטים [switches]

ריתוכים בולטים ונקודות לא מפולסות אחרות לאורך המסילה

אדנים שוקעים [והצלבת מסילות level crossings]

סמכי גשרים [Bridge abutments and supports]

נוצרת תנודה אימפולסיבית, שמורגשת בסביבה כמקור נקודתי קבוע.

העוצמה (המגניטודה) ותחום התדרים של ערור התנודה מושפעים בעיקר ע"י הגורמים הבאים :

א. המבנה הקונסטרוקטיבי של המסילה, כגון שימוש בחצץ, השענה אלסטית של הפס והתשתית שמתחתיו יוצרים מערכת מסה קפיץ. מבנה יותר גמיש ומסה יותר גדולה של הרכיבים מעל הקרקע נוטים למזער תנודות .

ב. פרופיל חתך המסילה עצמה. חתך מוגדל (קשיח) עבור המסילה מקטין שקיעות בין הסמכים ובכך ממזער את התנודות.

ג. מיקום המסילה. בדרך כלל במסילות על סוללה, בחפירות [cuttings], ובמנהרות יש פחות תנודות.

ד. מהירות הרכבת. ככלל, עוצמת (מגניטודת) התנודות גדלה עם הגידול במהירות עד לגבול התלוי במערכת.

ה. המרחק בין קבוצות גלגלים ומסת הרכב. מסות גדולות שאינן משוככות מובילות לערור תנודות מוגבר.

ו. מצב הגלגלים ומשטח המסילה

השפעות נוספות כוללות :

- עקומות או שיפועים אנכיים לאורך המסלול
- התנאים במהלך בלימה או האצה
- עומס גלגל
- המאפיינים הדינמיים של גשרים או מסילות מוגבהות

כאשר הערור נובע מאזורים שטוחים בעקמומיות הגלגל-*(flats)*, חוסר מעגליות של הגלגלים, מרחק בין אדנים, ואי-סדירות גיאומטרית מחזורית של המסילה, תדר הערור  $f_A$  שווה ל-  $v_z/d$  וכפולות של ערך זה כאשר  $v_z$  היא מהירות הרכבת ו  $d$  הוא האורך האופייני של הפגם הרלוונטי (לדוגמא, המרחק בין סמכים, היקף הגלגל, המרחק בין גלגלים ובין עגלות משא, המרחק בין קורות רוחב בגשרים). מצד שני, תדירויות ערור כתוצאה מהתדרים העצמיים של רכיבים של כלי הרכב המסילתי אינן תלויים במהירות. תדירויות אלו בדרך כלל בין 1 הרץ ל-3 הרץ עבור קרונות הנסמכים על קפיצים, (הקרונות עצמם נחשבים לגופים קשיחים) ובין 6 הרץ ל-10 הרץ עבור קרונות משא.

כתלות בצורת המסלול (מסילה), לעיתים קרובות תדירויות ערור מסוימות דומיננטיות יותר, כאשר מסת ועומס הגלגל וכן קשיחות המסילה והקרקע מהווים גורמים משפיעים עיקריים. תדירויות אלו בדרך כלל נמצאות בתחום שבין 40 הרץ ל-80 הרץ עבור מצעי חצץ *[ballast beds]*, 15 הרץ ו-40 הרץ במנהרות כאשר נעשה שימוש ב-*[ballast mats]*, ובין 5 הרץ ל-20 הרץ כאשר מערכת של מסילה צפה על טבלה *[a floating track slab system]*. הניסיון מראה כי ניתן לצפות שאזורי חשיפה לסוגי התנודות הנובעות מתנועה מסילתית ומכוסות כאן לא יהיה גדול מ-80 מטר מהמקור. למרות זאת, האזור עשוי להיות גדול מזה עבור תנודות בתדר נמוך הנובעות ממסילות תת קרקעיות על קרקע רכה.

#### 4.6.5.3.3 תנועת כלי רכב בדרך

ככלל, תנודות הנובעות מחספוס כללי של הדרך או מכוחות חיכוך הנוצרים בעת האצה או בלימה של כלי רכב הן בעלות חשיבות מועטה בלבד. מצד שני, תנודות יכולות להיווצר מהאינטראקציה המכאנית בין כלי הרכב ובין משטח דרך לא ישר *[uneven]*, למרות שתופעה זו בעלת חשיבות משמעותית רק במקרים של כלי רכב כבדים כמו משאיות או אוטובוסים. קיימים שני מכניזמים עיקריים של תנודות הנובעות מאינטראקציה דרך-תנועה: כאשר כלי רכב עוברים מעל אזורים לא מיושרים כגון מכסים של פתחי תשתיות, מסילות רכבת חוצות, אבני ריצוף *[cobblestones]*, או אזורים ניזוקים,

(1) תנועה אימפולסיבית מועברת דרך הקרקע

(2) נוצר ערור של תדירויות עצמיות של כלי הרכב או חלקים בו (מרכב, ציר), אשר משפיע על הדרך ולכן על

הקרקע.

תנודה בתדרים נמוכים עלולה להתרחש כאשר הקרקע רכה או הקשיחות של משטח הדרך נמוכה (לדוגמא דרכים לא סלולות).

באופן כללי, מגניטודת התנודות גדלה עם הגידול במסת הרכב ובמהירותו. מצד שני, משאיות ונגררים שאינם עמוסים יוצרים בדרך כלל תנודות חזקות מאלו שנוצרות ע"י אותם כלים עמוסים, כתלות בתכן מערכת הקפיצים.

#### 4.6.5.4 מיכון

פרק זה מכוסה בחומר שנוגע במיכון (סעיף 4.2 בתוכן העניינים)  
.4

### פרק ה – חישוב תגובת מבנה לעומסים דינמיים

#### 5.1 קביעת פרמטרים לתכנון דינמי

חישוב התגובה המבנית לעומסים דינמיים, מתקבל מתוך משוואת התנועה האופיינית למערכת דינמית ליניארית:

(5.1)

$$M_n \cdot \ddot{U}(t) + C_n \cdot \dot{U}(t) + K_n \cdot U(t) = F_p(t)$$

(3.1.1)

$M_n$  הנה מטריצת המסה,  $C_n$  הנה מטריצת הריסון,  $K_n$  הנה מטריצת הקשיחות,  $U(t)$  הנה תגובת המבנה, ו-  $F_p(t)$  הנו מהלך העומס הדינמי בזמן.

לצורך בניית משוואה (5.1) יש לבנות מערך נתונים לצורך קביעת ערכי  $M$ ,  $C$ ,  $K$ .

הקשיחות והמסות הינן פועל יוצא של קביעת החתכים הגיאומטריים בשילוב עם נתוני החומר, ראה 5.1.1. על המסות המבניות יש להוסיף את כל המסות הלא מבניות (N.S.M-None Structural Mass) המותקנות ברחבי המבנה.

הריסון נקבע על בסיס הנחות הנדסיות מקובלות עבור מבנה בתכנון, ראה 5.1.2. עבור מבנה קיים ניתן למדוד ערכים של ריסון מודלי.

ניתן להתייחס למשוואה (5.1) בשני אופנים. במבנה המשוואה הכתובה ניתן לחשב את התגובה הדינמית לעומס הדינמי הפועל על המבנה,  $F(t)$ . בהשמטת  $F(t)$  מהמשוואה ניתן לבצע אנליזת



תנודות חופשיות (free vibrations) לצורך חישוב האופנים (modes) העצמיים והתדרים העצמיים. פתרון המשוואה לצורך חישוב התגובה הדינמית יכול להיעשות באופן ישיר (direct dynamic response) או באנליזה מודלית.

תוצאת חישוב זה מובילה למדדים דינמיים אשר ערכם ישמש קריטריון לתגובה הדינמית בתכן ובשירות כמפורט בפרק 6:

(1) מצב גבולי של הרס:

D.L.F – Dynamic Load Factor, "מקדם ההגברה הדינמי" של המבנה, המייצג את היחס בין הדפורמציה הדינמית לבין הדפורמציה הסטטית.

(2) מצב גבולי של שירות:

2.1 S.L.F – Serviceability Limit factor, "מקדם השירות" של המבנה, המייצג

את היחס בין מדד התאוצות בתגובת המבנה לעומס הדינמי, לבין תאוצת הכובד, g.

2.2 ישנם מקרים כגון תפקוד כולל של המבנה, תנודות של מפלסים עליהם מותקן

ציוד רגיש, שבהם הקריטריון לשירות מבוסס על מהירויות התגובה הדינמית המחושבת או וגם נמדדת באופן ישיר.

#### 5.1.1 פילוג קשיחויות ומסות

פילוג קשיחויות ומסות במבנה יקבע במבנה עתידי ע"פ הנחות לתכנון או במבנה קיים ע"פ אפיון בפועל. לשני פרמטרים אלו השפעה ישירה על סדרת התדרים המחושבים המשמשים להמשך אנליזה לצורך בחינת תגובת המבנה.

עבור תכנון מבנה חדש יש להתחשב במספר מודלים מבניים המייצגים את פילוג הקשיחויות והמסות, אשר תוצאותיהם יובילו להגדרת מעטפת מייצגת של התגובה הדינמית.

תשומת לב מיוחדת יש לתת למבנים בהם העומס המעורר נתון לשינוי בזמן עקב התגובה המבנית. אינטראקציה שכזו משפיעה על אפיון העומס הדינמי ומשנה את תכונות המסה האופייניות של המערכת הדינמית, כגון בגשרי הולכי רגל וביציעי אצטדיונים בהם מסת האנשים היא בסדרי גודל של מסת המבנה.

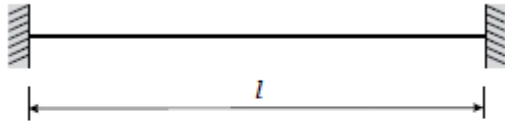
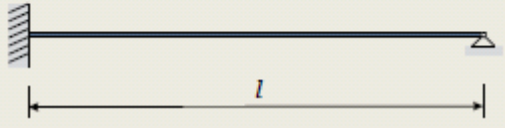
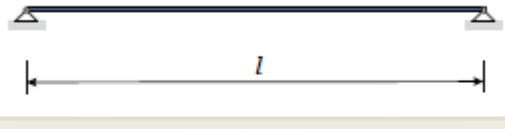
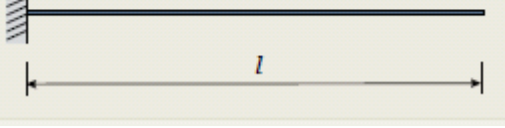
מורכבות המודל החישובי תושפע מהגדרת דרגות החופש המייצגות ותקבע את דיוק פתרון הבעיה הדינמית:

א. מודל מקורב

לצורך ביצוע הערכה ראשונית מקורבת, כהקדמה לאנליזה דינמית מלאה, ניתן להניח במקרים מסויימים כי אופן (mode) מבני בודד של קורה בתנאי שפה מתאימים מייצג את התנהגות המבנה בהשפעת העומס הדינמי. ע"פ הנחה זו ניתן לאפיין את תדר המבנה ואת הקשיחות האופיינית לו.

להלן אפיון פרמטרים של המע' הדינמית עבור תנאי שפה שונים, בקורה שמסתה (כולל מסת העומסים הקבועים במבנה) בעלת פירוס אחיד,  $\mu$  :

טבלה 5.1 – נוסחות לתדרים ראשוניים בקורות בתנאי שפה שונים

Support Conditions	Natural Frequency	Modal Mass
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.37 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.2 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.49 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.24 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.64 \mu l$

בשיטה זו יש להתחשב במספר גורמים המשפיעים על התגובה הדינמית :

א.1 כמות איברי פורייה של הפעילות הנבחנת

א.2. העמסה חלקית או וגם העמסה לא סימטרית

ב. פיתרונות נומריים, מודל אלמנטים סופיים

שיטה נומרית זו לפתרון המשוואות הדינמיות חיונית עבור רכיבי מבנה אשר לא ניתן לייצג

בסכימות סטטיות פשוטות, ועל כן לא ניתן לבצע חישוב ראשוני מקורב כמפורט לעיל.

קיימות מס' שיטות אנליטיות לניסוח המשוואה הדינמית המתארת את תגובת המבנה,

כמפורט בפרק 5.2.

## ג. ניסוי ומדידה

ניסויים ומדידות חיוניים למספר מטרות. בראש ובראשונה על מנת לעמוד על תגובה דינמית של מבנה מסויים תחת העומסים הדינמיים הפועלים עליו. בנוסף, על מנת לתמוך ולאושש מודל מתמטי המשמש לפתרון התגובה הדינמית. לבסוף, באמצעות ניסויים ומדידות ניתן לאפיין עומסים מעוררים על מנת להשתמש בהם באנליזות הממוחשבות.

שיטה זו חיונית במקרים מיוחדים כגון:

1. רגישות ייחודית לתנודות

2. תלונות בנוגע לתפקוד המבנה

3. אינטראקציה בין העומס הדינמי לבין המבנה

בשיטה זו מתקבלות תכונות המערכת המבנית כפי שהם בפועל בהתחשב בתנאי השפה, תכונות חומר המבנה וכו'.

בכל שיטת אנליזה או וגם מדידה ישנה חשיבות לאפיון המרכיבים הבאים:

4. תנאי שפה.

5. מודול אלסטיות: ערכו יכול להיות גבוה יותר במצב גבולי של שירות מזה המחושב במצב גבולי של הרס (עבור בטון: גדול ב-10%)

6. מנת הריסון: תכונה מבנית זו מושפעת מפרטי המבנה (חומר, פרטי ביצוע), ריהוט וציוד ע"ג הרכיב המבני הנבדק, סוג הגימור המונח ע"ג הרכיב המבני.

7. כיוון פעולת העומס הדינמי: ע"פ רוב הרכיב האנכי שולט בתגובה הדינמית (ישנם מקרים חריגים בהם הרכיב האופקי בעל השפעה משמעותית כגון גשרים להולכי רגל...)

במידת הצורך, יש לערב מומחה בעל ידע וניסיון בתחום, באפיון המרכיבים המפורטים לעיל.

### 5.1.2 ריסון

מושג הריסון נדון בפירוט והרחבה בנספח ו. בטבלות שלהלן מפורטים ערכים מומלצים

ליישומים שונים:

טבלה 5.2 מבני משרדים:

Type	Damping (% of critical damping)
<b>Structural Damping <math>D_1</math></b>	
Wood	6%
Concrete	2%
Steel	1%
Composite (steel-concrete)	1%
<b>Damping due to furniture <math>D_2</math></b>	
Traditional office for 1 to 3 persons with separation walls	2%
Paperless office	0%
Open plan office	1%
Library	1%
Houses	1%
Schools	0%
Gymnastic	0%
<b>Damping due to finishes <math>D_3</math></b>	
Ceiling under the floor	1%
Free floating floor	0%
Swimming screed	1%
<b>Total Damping <math>D = D_1 + D_2 + D_3</math></b>	

(JRC\bachmann)

טבלה 5.3 רצפות להליכה :

מנת ריסון קריטי	
0.03	רצפה חשופה
0.06	רצפה מאוכלסת עם ריהוט, ריצוף, צנרת פנימית, איטום
0.12	רצפה מוגמרת עם מחיצות חלוקה.

(Bachmann)

טבלה 5.4 גשרים להולכי רגל:

מנת ריסון קריטי			סוג המבנה
מקסימלי	ממוצע	מינימלי	
0.02	0.013	0.008	בטון מזוין
0.017	0.01	0.005	בטון דרוך
-	0.006	0.003	מרוכב (בטון+פלדה)
-	0.004	0.002	פלדה

טבלה 5.5 רצפות לפעילות ספורט וריקוד:

מנת ריסון קריטי			סוג המבנה
מקסימלי	ממוצע	מינימלי	
0.035	0.025	0.014	בטון מזוין
0.030	0.020	0.010	בטון דרוך
0.025	0.016	0.008	מרוכב (בטון+פלדה)
0.020	0.012	0.006	פלדה

טבלה 5.6 רצפות לאולמות תעשייה:

מנת ריסון קריטי			סוג המבנה
מקסימלי	ממוצע	מינימלי	
0.025	0.017	0.010	בטון מזוין
0.020	0.013	0.007	בטון דרוך
0.012	0.007	0.004	מרוכב (בטון+פלדה)
0.008	0.005	0.003	פלדה

טבלה 5.7 מבנים תחת השפעת רוח:

מנת ריסון קריטי			סוג המבנה
מקסימלי	ממוצע	מינימלי	

0.020	0.015	0.010	גובה מעל 100 מ' : בטון מזויין
0.013	0.010	0.007	גובה מעל 100 מ' : פלדה
0.030	0.025	0.020	גובה כ 50 מ' : בטון מזויין
0.025	0.020	0.015	גובה כ 50 מ' : פלדה

ריסון של מבנים תמירים וגבוהים תחת עומסי רוח,  $x_i$  :

$x_i$  הנו אוסף של שלושה רכיבים :

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3$$

אשר ערכם כמפורט בטבלה הבאה,

מנת ריסון		
0.004	בטון מזויין בלתי סדוק	$\zeta_1$ - על פי חומר
0.0072	בטון מזויין סדוק	
0.0032	קליפה או קופסא סגורה – עם הקשחות	$\zeta_2$ - על פי מבנה
0.0056	קליפה או קופסא סגורה – ללא הקשחות	
0.004	מסגרות – ללא רכיבים לא מבניים	
0.0064	מסגרות - עם רכיבים לא מבניים	
0.0016	ארובות ומגדלים - ללא רכיבים לא מבניים	
0.0024	ארובות ומגדלים - עם רכיבים לא מבניים	
0.0008	סמך פרקי או גלגלי	$\zeta_3$ - על פי ביסוס
0.0024	סמך אלסטומרי לתזוזה אופקית	
0.0016	רתום	
0.0016	זיז רתום – על סמך פלדה	
0.0008	זיז רתום – על סמך בטון	
0.0008	זיז רתום על סלע	
0.0013	זיז רתום על חצץ	
0.0016	זיז רתום על חול	
0.0024	זיז רתום על כלונסאות	

## 5.2 שיטות אנליטיות מומלצות

שיטות אנליזה לתופעות דינמיות ייקבעו על פי איפיון הבעייה, הדיוק הנדרש, היתכנות והתאמה למציאות, מצב הידע העדכני.

### 5.2.1 אנליזה סטטית שקילה

במקרים בהם ניתן להתעלם מתלות העומס בתדר פעולתו לחלוטין או חלקית מתרומת פאזת העומס הדינמי, אם כקירוב ראשוני אם כהחלטה סופית, ניתן להחליף את העומס הדינמי בהגבר דינמי מייצג ולבצע אנליזה סטטית שקילה. שיטת הגבר מקובלת היא:

$$\beta = y_{\text{dyn}}/y_{\text{stat}} = 1 + \sqrt{1+h/y_{\text{stat}}}$$

כאשר:

$h$  – גובה הפלת מסה

$y_{\text{dyn}}$  – שקיעת רכיב מבני תחת הפלת המסה

$y_{\text{stat}}$  – שקיעת רכיב מבני תחת הנחה סטטית של המסה

ההגבר מופעל כ מקדם הגדלה על העומס הסטטי המייצג את הפעולה הדינמית.

לתשומת לב: יש לזכור מספר גורמים:

מדובר בהגבר אשר לגביו ניתן להניח כי יש תאימות לינארית ליחס בין התגובה הדינמית לתגובה הסטטית של אותה עוצמת עומס.

ההגבר הנובע מנוסחה זו מבטא הפלת מסה קשיחה אינסופית כלומר שאינה משתתפת בבליעת אנרגיה.

### 5.2.2 אנליזה מודאלית

בבעיות בהן ריבוי דרגות חופש, ניתן לבצע אנליזה מודאלית. מספר דרגות החופש כמספר המודים הנבחרים.

יש לבחור מספר מודים משתתפים ולהוכיח התכנסות על פי אופי הבעייה, החלטה משותפת עם לקוח או כל מגבלה אחרת מוכחת.

### 5.2.3 אנליזה דינמית ישירה

האופציה הטובה והמומלצת ביותר לפתרון בעיות תגובה דינמית של מבנים הינה בצוע אנליזות תגובה דינמית ישירה ומליאה. באופן זה מתבצע פתרון ישיר של משוואות התנועה המליאות. בכך מוקטנות הספקות הטמונות בהנחות הנדסיות.

יש לבצע אנליזה דינמית ישירה באמצעות כלי מחשוב מוכח.

#### 5.2.4 אנליזות לא לינאריות

במקרים מסויימים נדרשת אנליזה דינמית לא לינארית.

דרישות לאנליזה לא לינארית ממוקדות בשני מקרים עיקריים:

אי לינאריות חומרית: תגובת חומר בתחום לא לינארי או בתחום אלסטו-פלסטי או בתחום פלסטי

אי לינאריות גיאומטרית: תגובה גיאומטרית במידות גדולות אשר אינה מאפשרת התייחסות לתצורה מקורית לא מועמסת.

#### 5.2.5 אנליזה ספקטרלית – PSD

בפעולת עומסים אקראיים (random vibration) יש להעביר את מערך הגדרת העומס הדינמי ממישור הזמן למישור התדר ולאפינו כ:  $g^2/Hz$  Vs. Hz.

גראף זה נקרא PSD – power spectral density. בספרות ניתן למצוא גראפים תקינים המאפיינים סוגי ציוד שונים.

בהעדר הגדרה תקינה בספרות העולמית, ניתן לבצע מדידות time history כלומר במישור הזמן, ולהמיר אותם למישור התדר כך שגם ההורדינטה מקבלת משמעות של  $g^2/Hz$ .

אנליזה זו יש לבצע באמצעות כלי מחשוב מוכח אשר פותרת את המבנה במישור התדר תוך שימוש במנוע רנדומיאלי ומאפשרת לקבל תגובות במישור התדר.

#### 5.2.6 פונקציית תמסורת ופונקציית קוהרנטיות

בעת בצוע מדידות תגובה דינמית במבנה יש להתמקד בשתי פונקציות מדודות משמעותיות לצורך הערכת התגובה הדינמית ואיתור מקורה.

שתי הפונקציות הללו ניתנות לחישוב על ידי ציוד המדידה ועל כן יש להקפיד להשתמש במערכות אשר מצוידות ביכולת חישוב זו.

פונקציית תמסורת מציגה יחס בין סיגנל (אות) מעורר לבין סיגנל (אות) התגובה. בכך ניתן לכמת את ההשפעה הדינמית על תגובות מכאניות המשמשות לתכן כגון שקיעות, כוחות פנימיים (מומנטים, כוחות ציריים וכד').

פונקציית קוהרנטיות מצביעה על הקשר בין כוח מעורר לבין תגובה דינמית. ערך הפונקציה נע בין 0 ל 1 כאשר 1 מצביע על קשר ישיר בין הכוח המאלץ לבין התגובה הנמדדת במקום מסויים ואילו הערך 0 מצביע על חוסר קשר בין המאלץ לנמדד.



בחישוב סופי של פונקציית תמסורת יש להביא בחשבון את פונקציית הקוהרנטיות על מנת לבסס אינדיקציה מובהקת לגבי הגברים אפשריים. מקובל לכפול את פונקציית התמסורת בריבוע ערכה של פונקציית הקוהרנטיות.

### 5.3 קביעת מאמצים דינמיים עקב הלמים

לצורך פרוצדורת תכן מבנה תחת עומסי הלמים ומתוך כוונה לעמוד על פוטנציאל נזק בפעולת הלמים אלה, ניתן להגדיר מאמץ מודאלי המאפיין את תגובת המבנה תחת ספקטרום תגובות הלמים באופן הבא:

$$\sigma_{\max} \approx C E v_{\max}/c \approx C v_{\max} \sqrt{E\rho}$$

כאשר:

$\sigma_{\max}$  – מאמץ כפיפה מודאלי מקסימלי

C – מקדם יחסי (נתון בספרות)

$v_{\max}$  – מהירות מודאלית מקסימלית תחת העומס הדינמי

c – מהירות האור בתווך המבנה

E – מודול יאנג

$\rho$  – צפיפות מסה

### פרק ו - קריטריונים לתגובות דינמיות

#### 6.1 כללי

תגובות מבנה לעומסים דינמיים ייבחנו בשני ערוצי בדיקה כלהלן:

1. מכלול קריטריונים לרגישות משתמשים.

2. קריטריון כשל מבני. מנגנון הכשל הוא היווצרות הגברים רזוננטיים כתוצאה מהפעילות הדינמית, עד לכדי התפתחות תגובה מכאנית קריטית מעבר לתסבולות מוכתבות בתקני התכן הרלוונטיים השונים.

#### 6.2 רגישות משתמשים

רגישות משתמשים היא תגובה אנושית תלוית פרמטרים רבים כגון:

- גיל ומין;
- תנוחה – עמידה, ישיבה, שכובה;
- כיוון פעולת התנודות יחסית לגוף;
- אופי פעילות המשתמש – מנוחה, הליכה, ריצה;

- תדירות הופעת התנודות והשעה ביממה ;
- הנחת התנודה ;
- ומעל לכל - הגורם הפסיכולוגי האנושי.

לפיכך ערכה ייקבע בתחום שיוגדר להלן: <sup>1</sup>ניתן לחלק את רגישות המשתמש לשני תחומים: הרגישות לתאוצת תגובת המבנה - בתחום בו תדר הפעילות עד 10 הרץ ורגישות למהירות תגובת המבנה - בתחום מ 10 הרץ ועד ל 100 הרץ כמפורט בטבלה 6.1 להלן.

טבלה 6.1 - תחומי הרגישויות לתאוצה ולמהירות על פי תחומי התדרים

סבירות התחושה	תחום תדר 1 הרץ – 10 הרץ שיא תאוצה (מ''שנ <sup>2</sup> )	תחום תדר 10 הרץ – 100 הרץ שיא מהירות (מ''שנ')
לא מורגש	0.034	0.0005
מורגש	0.1	0.0013
מפריע	0.55	0.0068
בלתי נסבל	1.8	0.0138

יש להעריך בחישוב (בתכן מבנה חדש) או במדידה (עבור מבנה קיים) את התגובה הדינמית בה תאופיין הפעילות הדינמית כעומס תלוי זמן המייצג את הפעילות. תוצאות האנליזות או וגם המדידות יהיו כל התגובות המכאניות קרי: תזוזות, מהירויות ותאוצות, כל אלה תלויי זמן. משך המדידה, או פרק הזמן בו תבוצע האנליזה (משך החשיפה) יהיו לא פחות מ 10 פעמים זמן המחזור באופן (במוד) הראשון של הרכיב הנבדק

$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}$$

ותחושב תאוצה אפקטיבית כלהלן: את התאוצה האפקטיבית יש להשוות אל נתוני טבלה 6.1 על מנת לקבוע את רמת רגישות המשתמשים. רמת סבירות התחושה בהתאם לטבלה 6.1 תיקבע במסגרת פרוגרמת תכנון המבנה. במידה ולא נקבעה רמת סבירות ניתן לקבוע רמות תאוצה לפי טבלה 6.2 שלהלן.

### טבלה 6.2 - תאוצות סף לאיזורי שימוש שונים

<sup>1</sup> להכין נספח הכולל את החסברים (מעין קומנטרי) כגון: על כן - אין יכולת קביעה חד משמעית אלא תחום סטטיסטי תלוי משתנים רבים. ניתן להמליץ כי היות ובחלקה, רגישות משתמשים הינה תלויה חשש מכשל אפשרי, ניתן להפיג חששות אלה באמצעות אנליזות נושאות תוצאות חיוביות בערוץ המקביל, ערוץ הכשל.

שימוש	$a_{eff}$ – תאוצה
	<b>אפקטיבית</b>
	(שנ"מ <sup>2</sup> /מ')
אזורי עבודה רגישים במיוחד (חדרי ניתוח, מעבדות למדידה מדוייקת וכו')	0.03
מגורים (דירות, בתים, בתי חולים)	0.05
משרדים שקטים, משרדים עם חלל פתוח	0.08
משרדים רגילים (בתי ספר, משרדים)	0.15
סדנאות ובתי מלאכה	0.25
גשרי הולכי רגל	?

### 6.3 תנודות בסביבה של ציוד רגיש

ההתייחסות להשפעת תנודות מבנים על ציוד רגיש הממוקם בהם נחלקת לשניים.

#### 6.3.1 השפעה ישירה על ציוד לפי הנחיות יצרן הציוד.

במידה ויצרן של ציוד האמור להיות מותקן במבנה נוקב באינדיקציה אשר מהווה סף לתפקוד תקין של הציוד, יש לבצע אנליזות ומדידות המוכיחות אי חריגה מסף זה.

בדרך כלל ינקוב היצרן ברמות תאוצות ומהירויות אשר הופעתם במבנה תגרום לציוד לתפקד באופן לקוי.

סימוכין מקובל בעולם לבדיקות ואימות תפקוד של לוחות וציוד אלקטרוני הינו הספר *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, מאת David S. Steinberg

#### 6.3.2 קריטריון השפעה כללי מקובל בעולם.

קריטריון כללי לצורך תכנון מבנים האמורים להכיל ציוד רגיש לתנודות נקרא *Vibration criteria* ובקיצור VC. הקריטריון מושתת על חישוב ומדידה של מהירויות התגובה הדינמית במבנה. הקריטריון מחולק ל 5 קטגוריות המכונות VC-A עד VC-E.

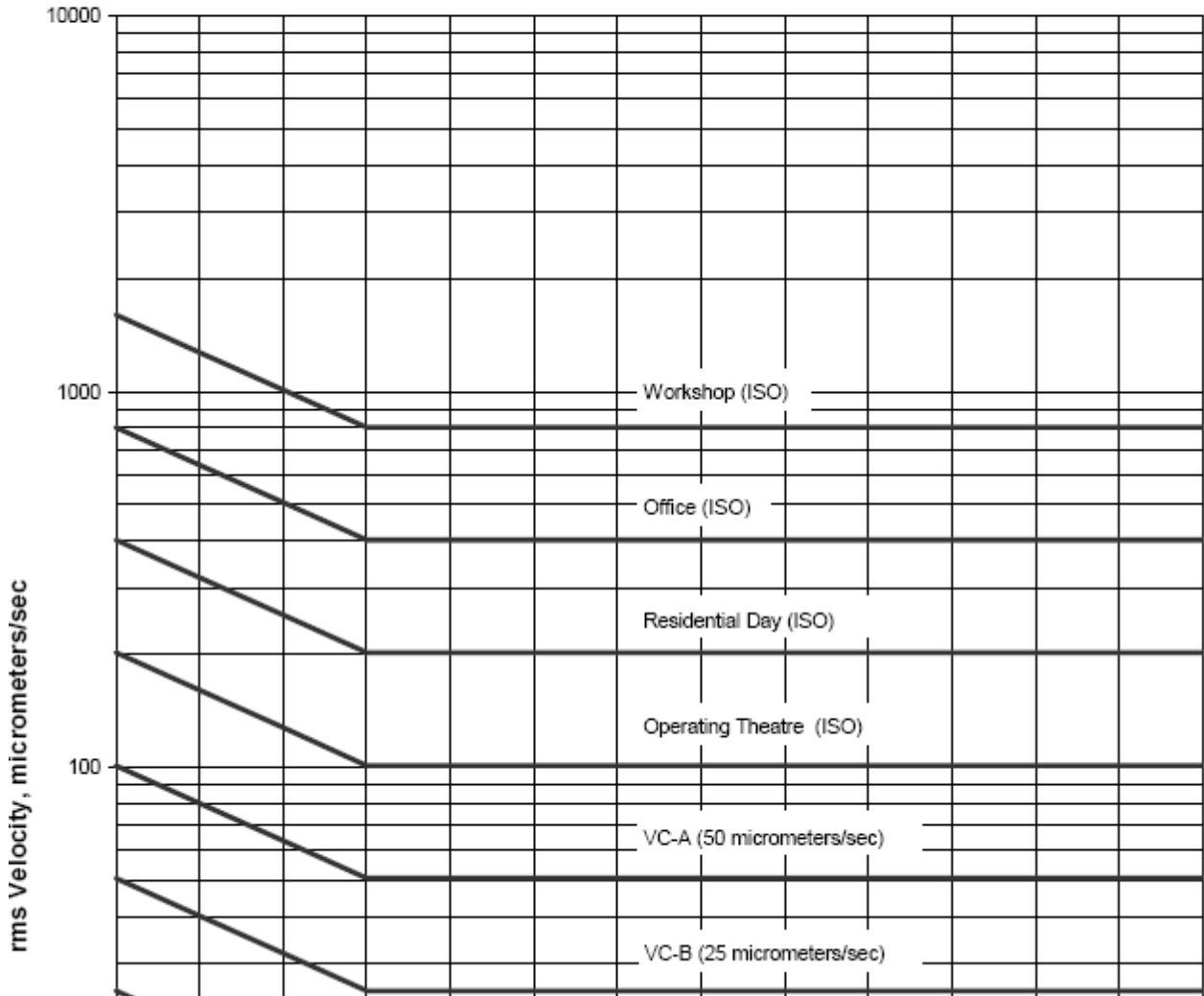
להלן טבלה המציינת את קטגוריות רגישות האפליקציה.

על בעל המתקן להחליט ולקבוע מה מידת הרגישות מתוך 5 הקטגוריות בה יש לעמוד.

**Table 1: Application and interpretation of the generic vibration criterion (VC) curves (as shown in Figure 1)**

Criterion Curve (see Figure 1)	Max Level (1) micrometers/sec,rms	Detail Size (2) microns	Description of Use
Workshop (ISO)	800	N/A	Distinctly feelable vibration. Appropriate to workshops and nonsensitive areas.
Office (ISO)	400	N/A	Feelable vibration. Appropriate to offices and nonsensitive areas.
Residential Day (ISO)	200	75	Barely feelable vibration. Appropriate to sleep areas in most instances. Probably adequate for computer equipment, probe test equipment and low-power (to 20X) microscopes.
Op. Theatre (ISO)	100	25	Vibration not feelable. Suitable for sensitive sleep areas. Suitable in most instances for microscopes to 100X and for other equipment of low sensitivity.
VC-A	50	8	Adequate in most instances for optical microscopes to 400X, microbalances, optical balances, proximity and projection aligners, etc.
VC-B	25	3	An appropriate standard for optical microscopes to 1000X, inspection and lithography equipment (including steppers) to 3 micron line widths.

**Figure 1: Generic Vibration Criterion (VC) Curves for Vibration-Sensitive Equipment - Showing also the ISO Guidelines for People in Buildings (see Table 1 for description of equipment and uses)**



**מקורות גורמי תנודה שכיחים במבני מעבדות**

אמפליטודה (inch)	תדר (Hz)	טיפוס
$10^{-2}$	4-20	קומפרסור אוויר
$10^{-3}$	5-40	ציוד תפעולי
$10^{-3}$	5-25	משאבות (ואקום), זרימה צמיגה ובלתי צמיגה)

$10^{-4}$	7-40	שירותי מבנה
$10^{-5}$	0.5-6	צעידת בני אדם
$10^{-4} - 10^{-2}$	100-10000	אקוסטיקה
$10^{-5} - 10^{-2}$	עד 20	ציוד ניקוב
$10^{-5} - 10^{-4}$	50-400	שנאים
$10^{-5} - 10^{-3}$	עד 40	מעליות
0.1	גובה המבנה/46 במטרים	תנודות מבנה
$10^{-5}$	1-5	תנודות עקב רוח
$\pm 0.15g$	5-20	מסילות רכבת
$\pm 0.001g$	5-100	תעבורה בכביש סואן

#### 6.4 שירות וכשל מבנים תחת עמיסה דינמית

##### 6.4.1 שירות

מצב גבולי של שירות למבנים תחת עמיסה דינמית הינו הסף הנדרש למניעת סדיקה, קילוף צבע או וגם חיפוי, תזוזות מצטברות או וגם הזדקנות מואצת.

הקריטריון לעמידה ברמת שירות (serviceability) מבוסס על מהירות התגובה המכאנית של המבנה לעומסים הדינמיים. תחומי המהירות לקביעת רמת השירות תלויים במספר גורמים על פיהם יש לסווג את המבנים ואת התופעות המכאניות הרלוונטיות כמפורט בטבלה 6.1.

להלן מספר טבלאות המציגות את נתוני המהירויות המשמשות קריטריונים לרמת השירות הנדרשת. אל המהירויות הנקובות בטבלה יש לייחס את המהירות הוקטוראלית כלומר את שורש סכום ריבועי המהירויות בכיוונים x, y, z :

Building Class	Frequency range where the standard value is applicable [Hz]	Maximum resultant velocity, $v_i$ [mm/s]	Estimated maximum vertical particle velocity, $v_{max}$ [mm/s]
1. Industrial buildings of reinforced concrete, steel construction	10 - 30	12	7.2 - 12
	30 - 60	12 - 18	7.2 - 18
2. Buildings on concrete foundation. Concrete walls or brick walls	10 - 30	8	4.8 - 8
	30 - 60	8 - 12	4.8 - 12
3. Buildings with brick cellar walls. Upper apartment floors on wooden beams	10 - 30	5	3 - 5
	30 - 60	5 - 8	3 - 8
4. Especially sensitive buildings and historical buildings	10 - 30	3	1.8 - 3
	30 - 60	3 - 5	1.8 - 5

Table J.1: Standard values for piling, sheet piling, vibratory compaction and traffic [J.1]

Maximum vertical particle velocity $v_{max}$ [mm/s]	Effect on buildings
2	• Risk of damage to ruins and buildings of great historical value
5	
10	• Risk of cracking in normal residential buildings with plastered walls and ceilings
10 - 40	• Risk of damage to normal residential buildings (no plastered walls and ceilings)
	• Risk of damage to concrete buildings, industrial premises, etc.

Table J.2: Recommended values for vibratory compactor [J.3]

$$v_i = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Type of building and foundation	Recommended vertical velocity $v_{max}$ [mm/s]
• Especially sensitive buildings and buildings of cultural and historical value	1
• Newly-built buildings and/or foundations of a foot plate (spread footings)	2
• Buildings on cohesion piles	3
• Buildings on bearing piles or friction piles	5

Maximum particle velocity [mm/s]			Effects
Sand, Gravel, Clay	Moraine, Slate-stone, Lime-stone	Granite, Gneis, Sandstone	
18	35	70	• No noticeable cracking • Fine cracks and fall of plaster (threshold value) • Cracking • Serious cracking
30	55	110	
40	80	160	
60	115	230	

Table J.4: Risk of damage in ordinary dwelling houses with varying ground conditions [J.4]

Type of structure	Ground vibration - peak particle velocity, $v_{max}$ [mm/s] ([in/s])	
	At low frequency* < 40 Hz	At high frequency > 40 Hz
• Modern homes, drywall interiors • Old homes, plaster on wood, lath construction for interior walls	19 (0.75)	51 (2.0)
	13 (0.5)	51 (2.0)

\* All spectral peaks within 6 dB (50%) amplitude of the predominant frequency must be analyzed.

Table J.5: Safe levels of blasting vibrations for residential type structures [J.6]

Type of structure	Vibration velocity $v_j$ [mm/s]			At plane of floor of uppermost full storey (all frequencies)
	At foundation			
	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz*	
1. Buildings used for commercial purposes, industrial buildings and buildings of similar design	20	20 - 40	40 - 50	40
2. Dwellings and buildings of similar design and/or use	5	5 - 15	15 - 20	15
3. Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, do not correspond to those listed in lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. buildings that are under preservation order)	3	3 - 8	8 - 10	8

\* For frequencies above 100 Hz, at least the values specified in this column shall be applied

## 6.5 השפעת תנודות על המבנה

(הערה: פרק זה מבוסס על DIN 4150-3).

### תכולה

פרק זה מגדיר שיטה למדידה ולהערכה של ההשפעה של תנודות על מבנים שמתוכננים (או תוכננו) בעיקר לשאת עומסים סטטיים. הפרק חל על מבנים שאין צורך לתכננם לפי תקנים מיוחדים ככאלו שנושאים עומסים דינמיים.

הפרק מגדיר ערכים מנחים [guideline values]. עמידה בהם מבטיחה מניעת השפעה שלילית על שימושיות המבנה [structure's serviceability]. **אזכורים נורמטיביים**

DIN 1311-1

DIN V 4150-1

DIN 45669-1

DIN 45669-2

DIN EN 1594

### 6.5.2 מושגים

להלן מושגים רלוונטיים לפרק זה: (בנוסף לאלו המופיעות ב-DIN 1311-1):

6.5.2.1 תנודה: תנודה מכנית של גופים מוצקים אשר עלולה ליצור נזק או אי-נוחות.

6.5.2.2 נזק: השפעה קבועה [permanent] של תנודה שפוגעת בשימושיות [serviceability] המבנה או אחד מרכיביו.

6.5.2.3 ערכים מנחים [guideline values]: ערכים שנקבעו על פי ניסיון. עמידה בערכים אלו מבטיחה כי לא יגרם למבנה נזק.

6.5.2.4 תנודה קצרת מועד: תנודה בתכיפות נמוכה מכדי לגרום להתעייפות מבנית או לתהודה.

6.5.2.5 תנודה ארוכת מועד: כל סוגי התנודות אשר אין מכוסות בהגדרה ל"תנודה קצרת מועד" בסעיף 6.3.3.4 לעיל.

### 6.6.3 עקרונות להערכת השפעת תנודות על מבנים

#### כללי



תתי פרקים 6.3.5 ו-6.3.6 מגדירים שיטות למדידת ולהערכת פרמטרי תנודה. אם לא נעשה שימוש בשיטות אלו, אזי יש לקבוע את המאמצים הדינמיים המתפתחים במבנה במדידה או באנליזה (לדוגמא, כמתואר בתתי-פרקים 6.4.2 ו-6.4.3, בהתאמה). את התוצאות יש להשוות למאמצים המותרים תוך התחשבות בתדירות ההופעה של התופעות. חשוב להדגיש כי השיטות המפורטות בתתי-פרקים 6.4.2 ו-6.4.3 אינן מתאימות להערכת נזקים קלים [minor damage] כפי שאלו מוגדרים בתת-פרק 6.4.5. לעיתים, התנודות אינן ניתנות לסיווג על פי ההגדרות בסעיפים 6.3.4 ו-6.3.5. כקצרות מועד בלבד או ארוכות מועד בלבד במקרים כאלו, יש להעריך את המבנה הן על פי תת-פרק 6.5 והן על פי תת-פרק 6.6.

במקרים בהם עולה הצורך, יש לקחת בחשבון גם את תזוזות היסודות כהשפעה בלתי ישירה של התנודה (ראה לדוגמא נספח C).

#### **הערכת מאמצים בהתבסס על מדידות**

ניתן להסיק לגבי המאמצים במבנה התונד ולהעריך את עוצמתם ע"י מדידה ישירה של העיבורים במבנה ושימוש בחוקים הקונסטרוטיביים המתאימים [כאן המקור הגרמני משתמש במונח שלדעתי אינו מתאים – mass law].

המשרעת והתדירות של התזוזות, מהירויות, ותאוצות הנמדדות במבנה יכולות לשמש בסיס להערכת העיבורים והמאמצים.

ניתן להעריך את המאמצים בקורות ובטבלות התונדות קרוב לתהודה על בסיס המשרעת של המהירות, בהינתן כי המדידה נעשית בנקודה בה המשרעת היא מקסימאלית. במקרה שכזה, אין צורך במידע לגבי תנאי השפה והקשיחות של הרכיב.

#### **הערכת מאמצים על פי אנליזה**

האנליזה להערכת מאמצים תבוצע על פי שיטות עדכניות [state of the art methods]. ערכים לשימוש באנליזה יכולים להילקח באמצעות שיטות החיזוי המתוארות ב-DIN-V-4150-1 או DIN-4150-1.

#### **מאמצים מותרים**

אימות יציבות המבנה תעשה תוך שימוש במקדמי הביטחון הנתונים בתקנים ובתקנות הנוגעים בעומס דינמי נוסף, תוך התחשבות בסוג ובמשך העומס הדינמי המופעל, בשיטת המדידה, המאפיינים של חומרי הבניה, ובסוג המבנה.



מהירות התנודה ביסודות בניינים מספקות אמות מידה להערכת התפתחות תנודות מבניות קצרות מועד. ההערכה בפרק זה של התקן מתבססת על המקסימום של הערך המוחלט,  $v_{i,max} / (i=x,y,z)$ , של אותות המהירות הבלתי ממושקלים (unweighted),  $v_i(t)$ , הנמדדים בביסוס המבנה (לשם קיצור,

פרמטר זה נקרא להלן  $v_i$ ). [פרטים נוספים על אופן המדידה מובאים בתת-פרק 5.4.

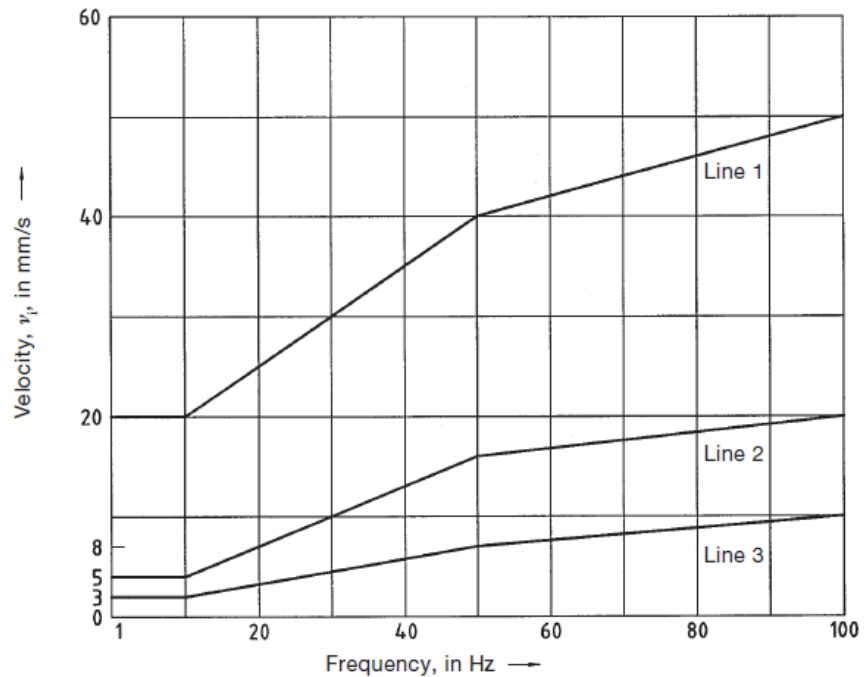
התנודה הנמדדת במישור התקרה הגבוהה ביותר הנשענת על הקירות החיצוניים מספקת אף היא מידע משמעותי לשם הערכה זו. במקרה זה, ההערכה מתבססת על הערכים המירביים של שני הרכיבים האופקיים. הערכים הנמדדים בנקודה זו בהתאם לתת-פרק 5.4 יכולים לשמש לקביעת התגובה האופקית של המבנה להרעדה בביסוס.

טבלה 1 וציור 1 מספקים ערכים מנחים [guideline values] עבור  $v_i$  בביסוס ובמישור התקרה הגבוהה ביותר עבור סוגים שונים של בניינים. הניסיון מראה כי עמידה בערכים מנחים אלו, מונעת נזק בשירות. במידה שנזק מתרחש בכל זאת, ניתן להניח כי הוא נובע מסיבות אחרות. חריגה מסוימת מהערכים המובאים בטבלה 1 אינה מובילה בהכרח לנזק, אולם היא מראה כי חקירה נוספת הכרחית. טבלה 1 : ערכים מנחים למהירות התנודה לצורך הערכת ההשפעה של תנודות קצרות מועד על מבנים

ערכים מנחים עבור המהירות $v_i$ במ"מ/שנייה				סוג המבנה	שורה
תנודה אופקית של התקרה הגבוהה (כל התדירויות)	תנודה בביסוס בתחום תדירויות				
	50-	10-50	1-10		
40	40-50	20-40	20	בניינים למסחר, תעשייה, ובניינים בתצורה [design] דומה	1

15	15-20	5-15	5	בנייני מגורים ובניינים בתצורה ובאכלוס דומה	2
8	8-10	3-8	3	מבנים אשר, בשל רגישותם המיוחדת לתנודות, אינם ניתנים לסיווג תחת שורות 1 ו-2 והם בעלי חשיבות ערך מהותי (לדוגמא, בניינים לשימור)	3
* בתדירויות הגבוהות מ-100Hz הערכים הנתונים בטור זה יכולים לשמש כערכי מינימום.					

הערה: ערכי הביניים לתדירויות השונות ייקבעו לפי ציור 1



ציור 1 – עקומות עבור

**הערכים המנחים המפורטים בטבלה 1 למהירויות הנמדדות בביסוס**

כדי לקבוע איזה מבין תחומי התדירויות המופיעים בציור 1 מתאים, יש להתייחס לתדירות המאפיינת את תחום המהירות הרלבנטי. יש לנקוט זהירות מיוחדת לגבי המדידות בתחומי תדירויות נמוכים.

למטרות אנליטיות, האופיין של האות צריך להילקח בחשבון גם הוא, לדוגמא ע"י הפעלת חלון נתונים מתאים (ראה לדוגמא נספח D).

למבני הנדסה אזרחית (לדוגמא מבני בטון מזויין המשמשים כמערכות ביסוס [abutments of foundation pads] ניתן להגדיל את הערכים בשורה 1 של טבלה 1 במקדם של עד 2, בהינתן כי לא נוצר סיכון כתוצאה מתהליכים מכאניים בקרקע [לדיון].

### 6.5.6.2 השפעה על תקרות

כאשר תנודות קצרות טווח גורמות לתנודה בתקרות, אם הרכיב האנכי  $v_z$  הנמדד בנקודה שבה המהירות מקסימאלית (בד"כ במרכז התקרה) אינו גדול מ-20 מ/מ/שניה אזי לא צפויה פגיעה בשימושיות התקרה. במקרה של בנינים המתוארים בשורה 3 בטבלה 1, יתכן ויש להפחית ערך גבולי זה כדי למנוע נזק קל [minor damage].

### 6.5.6.3 השפעה על צנרת טמונה [buried pipework]

טבלה 2 מציגה ערכים מנחים להערכת ההשפעה של תנודה על צנרת טמונה. ערכים אלו מבוססים על ההנחה כי הצינורות מיוצרים ומושמים תוך שימוש בטכנולוגיה עכשווית. אם זה אינו המקרה, נדרשת התייחסות מיוחדת. התייחסות מיוחדת נדרשת גם במקרים בהם לתהליכים מכאניים בקרקע עלולה להיות השפעה מזיקה [deleterious] על הצינור, או כאשר ישנם מצבי מאמצים שונים בצמתים/מחברים (לדוגמא צמתים/מחברים עם המבנה).

הערכים הנתונים בטבלה 1 עבור יסודות מתאימים גם לשני המטרים הראשונים (בקרב המבנה) של צנרת גז וצנרת מים. למידע נוסף בנוגע לצנרת הובלת גז, ראה DIN-EN-1594. [לדיון]

בהערכת צנרת ניקוז יש להשתמש בערכים הנתונים בשורה 3 של טבלה 2

טבלה 2 : ערכים מנחים למהירות תנודה לשימוש בהערכת ההשפעה של תנודות קצרות מועד על צנרת טמונה.

ערכים מנחים למהירות הנמדדת על גבי הצינור $v_i$ בממ//שניה	סוג (חומר) הצינור	שורה
100	פלדה (כולל צינורות מרותכים)	1
80	חרס, בטון, בטון מזויין, בטון דרוך, מתכת (עם או ללא אגפים)	2

50	בניה [masonry], פלסטיק	3
----	------------------------	---

#### 6.5.6.4 מדידות

מכשור לביצוע מדידות בהקשרן לפרק זה יעמדו בדרישות המפורטות בתקן DIN-45669-1 ובפרוצדורות המתוארות בתקן DIN-45669-2. כדי למדוד תנודות בביסוס, יש למקם את הגשושים [pick-ups] לשלושת כיווני המדידה קרובים זה לזה על רצפת קומת הקרקע [on the ground floor] של המבנה הנבחן, על מערכת הביסוס, על הקיר החיצוני, או בגומחה [recess] בקיר זה. בבניינים ללא מרתף, נקודת המדידה תמוקם לא גבוה מ-0.5 מ' מעל הקרקע. נקודת המדידה ימוקמו בשאיפה בצד הבניין הפונה למקור הרעידות. יש להקליט את ההשתנות בזמן [time history] של התנודה האנכית (ציר z) והתנודות האופקיות (ציר x וציר y הנטויים בזווית ישרה זה לזה) כאשר אחד מכיווני המדידה מקביל לקיר צידי של הבניין. למבנים בהם שטח קומת הקרקע גדול, יש לבצע מדידות במספר נקודות מדידה בו זמנית.

בנוסף על המדידות הנערכות בביסוס ובתקרה העליונה, לעיתים יש לבצע מדידה בכיוון האנכי בתקרות בהן ניתן לצפות לתנודה החזקה ביותר. במקרים כאלו, נקודת המדידה תמוקם במרכז התקרה (ראה תת-פרק 5.2).

גשושים למדידה בתקרה העליונה ימוקמו על או בסמיכות (קרוב ככול שניתן) [immediately next to] לאלמנטי בניה קונסטרוקטיביים [structural masonry] כך ששני כיווני המדידה האופקיים, x ו-y, בזווית ישרה זה לזה ואחד הכיוונים מקביל לקיר צידי.

במדידת על צנרת, גשושים למדידה ימוקמו באופן ישיר על הצינור, במידה והדבר אפשרי. כחלופה, ניתן למקם את הגשוש על משטח הקרקע מעל הצינור, למרות שבמקרה כזה ניתן רק לבצע הערכות (ראה נספח 1D).

לכל מדידה, יש לערוך דו"ח מדידה כמתואר בנספח A.

#### 6.5.7 הערכת השפעה של תנודות ארוכות טווח

##### 6.5.7.1 השפעה על המבנה כמכלול

ערכים מנחים לערך הגבוה מבין שני הרכיבים האופקיים הנמדדים בתקרה העליונה עבור סוגי מבנים שונים מופיעים בטבלה 3. הניסיון מראה כי עם עמידה בערכים אלו, נזק לא יתרחש. עליה קלה על הערכים המופיעים בטבלה 3 אינה מובילה בהכרח להיווצרות נזק. במידה והערכים עולים בצורה ניכרת על אלו המופיעים בטבלה 3, ניתן לחשב את המאמצים כמתואר בתתי-פרקים 6.4.2 ו-6.4.3 ולהעריכם כמתואר בתת-פרק 6.4.4. במקרה של מבני מסגרות רבי קומות, ניתן לחשב את הרכיב הדינמי של המאמץ גם על בסיס ההזזות היחסיות של קצוות רכיבים אנכיים (הסטים קומתיים).

במידה שהבניין נתון לתנודה הרמונית, הערכים המקסימאליים עשויים להתפתח בתקרות שאינן בהכרח התקרה העליונה. הערכים הנתונים בטבלה 3 תקפים גם למקרה זה.

כאשר נעשה שימוש בנקודות יחוס אחרות, נדרשת אנליזה נפרדת.

טבלה 3 : ערכים מנחים למהירות התנודה לצורך הערכת ההשפעה של תנודות ארוכות מועד על מבנים

שורה	סוג המבנה	ערכים מנחים עבור המהירות vi בממ'/שניה תנודה אופקית של התקרה הגבוהה (כל התדירויות)
1	בניינים למסחר, תעשייה, ובניינים בתצורה [design] דומה	10
2	בנייני מגורים ובניינים בתצורה ובאכלוס דומה	5
3	מבנים אשר, בשל רגישותם המיוחדת לתנודות, אינם ניתנים לסיווג תחת שורות 1 ו-2 והם בעלי חשיבות ערך מהותי (לדוגמא, בניינים לשימור)	2.5

#### 6.5.7.2 השפעות על תקרות

לצורך הערכת התנודות ברכיבים כגון תקרות וקירות, ניתן לקבוע את העומס הדינמי כמתואר בתתי-פרקים 6.3.4.2 ו-6.3.4.3.

במקרה של תנודות בכפיפה בסמוך לתהודה, מצב מביא לרוב לתנודה של תקרות באמפליטודות גדולות, ניתן לקרב את התוספת הדינמית למאמצים באמצעות השיטה המובאת בתת-פרק 4.2 ומתוארת להלן.

עבור קורות ותקרות מתוחות בכיוון אחד בחתך מלבני (כלומר  $y_{max}/i=1.73$  כאשר  $y_{max}$  הוא המרחק אל הסיב הקיצוני ו- $i$  הוא רדיוס האינרציה) בעלות קשיחות קבועה ונתונות לעומס משקלי, ועבור תנודה באופן טבעי [natural mode], מאמץ הכפיפה המקסימאלי  $\hat{\sigma}_{max}$  מוגדר ע"י משוואה (1), ללא תלות בממדים של המערכת התונדת:

$$\hat{\sigma}_{max} = 1.73 \left( \frac{E_{dyn} \rho G_{tot}}{G_{beam}} \right)^{0.5} k_n \hat{v}_{max} \quad (1)$$

כאשר:

$\hat{v}_{max}$  שיא המהירות לאורך הקורה

$E_{dyn}$  מודול האלסטיות הדינמי של הקורה

$\rho$  צפיפות החומר

$G_{tot}/G_{beam}$  מקדם ההעמסה, כאשר הקורה נושאת עומס מחולק אחיד בנוסף למשקלה העצמי

$G_{tot}$  המשקל העצמי של הקורה + עומסים אחרים

$k_n$  מקדם האופיין הטבעי [eigenmode coefficient]

מקדם האופיין הטבעי תלוי בתנאי השפה ובמספר המוד. למרות זאת, לשני אלו השפעה מועטה בלבד ולמעשה הערכים עבור  $k_n$  נעים בין 1 ל-1.3. עבור תקרות המתוחות בשני כיוונים, מאמצי הכפיפה המחושבים לעיל נחשבים גם הם לערכי מקסימום.

הניסיון מראה כי מהירויות תנודה אנכיות עד ל-10 מ"ש/שניה אינן גורמות נזקים בתקרות במבנים המופיעים בשורות 1 ו-2 בטבלה 3, גם אם מאמצי התכן המקסימליים מנוצלים במלואם. תנודה מסוג זה מורגשת באופן ברור [clearly perceptible]. עבור מבנים כדוגמת אלו שמופיעים בשורה 3 של טבלה 3, לא ניתן לקבוע ערכים מנחים עבור תנודה אנכית.

אין לשייך נזק קל (תת-פרק 6.3.4.5) באופן אוטומטי לעומס הדינמי ובמקרה כזה חקירה נוספת דרושה.

### 6.5.7.3 השפעה על צינורות טמונים

בהערכת ההשפעה של תנודות ארוכות טווח על צינורות טמונים ניתן להפחית את הערכים המנחים הנתונים בטבלה 2 ב-50% ללא אנליזה נוספת.

ההגבלים הנתונים בתת-פרק 5.3 תקפים גם כאן באופן אנלוגי.



#### 6.5.7.4 מדידות

במידה שהבניין נתון לתנודה הרמונית, יש לבצע מדידות במספר תקרות בו זמנית כדי לקבוע במדויק את אופן התנודה. עבור תנודות בתדירות העצמית הנמוכה ביותר, ניתן בדרך כלל לבצע מדידות בתקרה העליונה בלבד. ניתן להעריך בקירוב את התדירות העצמית הנמוכה ביותר בבניינים בעלי חמש קומות ויותר  $f_i$  בהרץ כ-  $10/n$  כאשר  $n$  הוא מספר הקומות.

כאשר מעריכים תנודות אופקיות במבנה כמכלול, יתכן ויש צורך, במקרים מיוחדים, לקחת בחשבון אפשרות של תנועה סיבובית המישורי בתקרות וכן סיבוב גוף קשיח.

התדירות העצמית של תקרות בד"כ גדולה מ  $10 \text{ Hz}$ , וברוב המקרים, רק התזוזות האנכיות הן המשמעותיות. לפיכך, התנודה האנכית צריכה להימדד בנקודה בה מתפתחת המהירות המירבית, בד"כ במרכז הטבלה.

לכל מדידה, יש לערוך דו"ח מדידה כמתואר בנספח A.

#### 6.6 . תגובה לעומסי פיצוץ

ניתן לטפל בתגובת מבנה לעומס פיצוץ המתרחש ליד המבנה בשני אופנים.

##### 6.6.1 אנליזות דינמיות

ניתן לבצע אנליזה דינמית תחת עומס לחץ דינמי המאפיין את הפיצוץ. נתונים אלה כלולים במדריך האמריקאי אשר יצא במשותף על ידי חיל האוויר, הצבא וחיל הים האמריקאי "Structures to resist the effect of accidental explosions", department of the army, the navy and the air force, Washington, DC יש לאפיין את עוצמת הפיצוץ על ידי אפיון כמות TNT בק"ג.

יש לנקוב במרחק מקור הפיצוץ מן המבנה וחלקי המבנה הרלוונטיים לניתוח.

##### 6.6.2 אנליזות CFD

ניתן לבצע אנליזות CFD (Computational Fluid dynamic) אשר מייצגת את גל ההדף הנוצר כתוצאה מן הפיצוץ, את מעבר גל ההדף באוויר החופשי עד למבנה ואת האינטראקציה בין גל ההדף לבין המבנה. חישובים אלה ייעשו על ידי מומחים לנושא.

**נספח א: דוגמא לטופס דו"ח מדידה**

Table A.1: Test report form

Line	Type of information	Details
1	General: a) Testing agency b) Client c) Contract identification d) Person carrying out measurement e) Time and date of measurement	
2	Type of vibration: a) Source b) Operating conditions	Blasting (charge, ignition stages, number of drill holes, series, etc.) Pile driving (equipment used, type of pile used) Machinery (speed, load, etc.) Traffic (rail traffic, trucks, etc.) Frequency of occurrence
3	Structure: a) Designation b) Classification c) Description	Address Type of building according to the tables in this standard Type of structure, size, foundation, structural condition
4	Site and location a) of source of vibration b) of the measurement points and their distance from the source, and measurement direction	Sketches giving heights
5	Environmental conditions	Details of rock and soil, ground water, structural condition of building, weather conditions (frost, storm, etc.), extraneous sources of vibration (e.g. traffic)
6	Subjective observations	Perceptible secondary effects (e.g. rattling of objects)
7	Measuring chain: a) Pick-ups, natural frequency of equipment, damping coefficient, frequency response, operating frequency range b) Signal conditioning equipment c) Recording devices d) Tools for analysis	Accelerators, velocity or displacement pick-ups  Filters, amplifiers Magnetic tape recorder, plotters, PCs Frequency analyzers, software
8	Results of measurement: a) Measured quantities and frequencies b) Derived quantities c) Duration and occurrence of effects	
9	Signatures	

נספח ב :

**אמצעים להגבלת ההשפעות של תנודות**

באופן נורמאלי, תנודות שמקורן מחוץ למבנה מועברות באמצעות הקרקע ודועכות עם הגדלת המרחק מהמקור. לפיכך, ניתן להפחית את ההשפעות של תנודות מבניות ע"י הגדלת המרחק בין מקור התנודה ובין המבנה הקולט. בנוסף, ניתן לעשות שימוש באמצעים הבאים במטרה להגביל את ההשפעה של התנודות

**ב-1 פעולות במקור התנודה**

ב- 1.1 אמצעים כנגד תנודות קבועות עם הרמוניות הנגרמות ע"י מכונות (מכונות תונדות [oscillatory screens], מנועים, מדחסים, מסורים, וכיו"ב).

- א. איזון המכונה
- ב. תוספת או שיפור מערכת האיזון.
- ג. במקרים בהם מתרחשת תהודה, שינוי המהירות.
- ד. בידוד מפני תנודות ע"י מיקום המתקן על גבי אלמנט אלסטי (עבור ערעור בתדרים הגדולים מ-3 Hz).

#### **ב-1.2 אמצעים כנגד הלמים הנגרמים ע"י מכונות**

בידוד המתקן כנגד תנודות.

#### **ב-1.3 אמצעים כנגד תנודות הנגרמות ע"י תנועה**

- א. הקמה ותחזוקה של משטח מיסעה חלק.
- ב. תחזוקה סדירה של משאיות, קרונוט, ומסילות.
- ג. תחזוקה סדירה של כלי הרכב מסילתיים.
- ד. בידוד מסילות כנגד תנודות.
- ה. הקטנת המהירות

#### **ב-1.4 אמצעים כנגד תנודות הנגרמות ע"י פיצוצים**

שינוי שיטת הפיצוץ, לדוגמא, ע"י מטענים שונים לכל שלב ייזום, שינוי סדר הפעלת המטענים, שינוי עומק הקדחים.

#### **ב-1.5 אמצעים כנגד תנודות הנגרמות ע"י עבודות בינוי**

- א. מעבר לשיטות בניה המאופיינות בעוצמת תנודות נמוכה.
- ב. שימוש בפטישי וברציה בעלי תדירויות גבוהות יותר.
- ג. הימנעות מתהודה.

#### **ב-2 פעולות ואמצעים במבנה הקולט**

- א. ציוד המבנה במשככי תנודה דינמית (צעד אפקטיבי במיוחד כנגד תהודה ובמקרים בהם הריסון המבני מינימאלי)
- ב. בידוד המבנה כנגד התנודה (עבור תדירויות ערור גדולות מ-5 הרץ).
- ג. בצע שינויים והתאמות במבנה כדי להימנע מתהודה.

#### **ב-3 פעולות ואמצעים לאורך מסלול השידור**

א. הגדלת המרחק בין המקור ובין המבנה הקולט.

ב. במקרים מיוחדים, ניתן לחפור תעלות [חפיר, trench] או למקם אלמנטים בקרקע בקרבת מקור

התנודות או בקרבת המבנה הקולט.

כאשר היסודות עלולים להיות נתונים לשקיעות דיפרנציאליות, יש לנקוט באמצעים מתאימים לחיזוק מערכת הביסוס בהתאם (לדוגמה ע"י [sinking a deep foundation]).

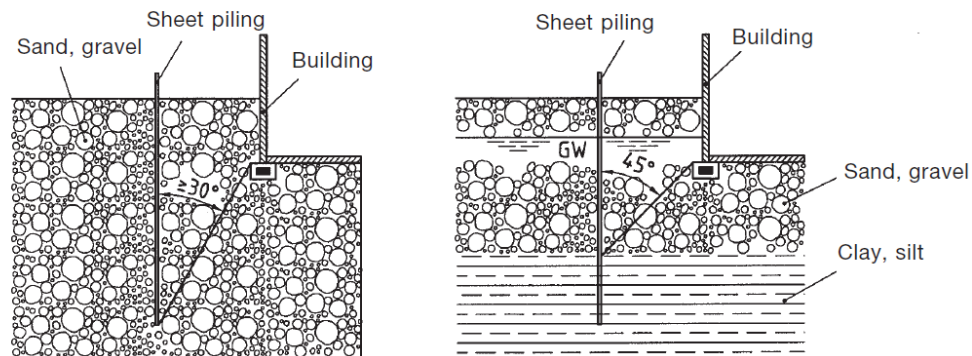
### נספח ג : השפעה של תנודות על הקרקע

#### Appendix C

##### Effects of vibration on soil

Non-cohesive soil tends to settle, for instance when vibrating rams are used nearby to drive sheet piling. For this reason, the distance between the vibration source and the building foundation should be such that an angle of at least 30° to the vertical is formed as shown in figure C.1. For piling extending below the groundwater table, an angle of 45° is more suitable, as shown in the figure.

This tendency is considerably lower in the case of percussive driving methods (e.g. when using diesel or pneumatic rams).



GW – Groundwater table

Figure C.1: Distance between sheet piling and building (schematic)

Even at great distances from the vibration source, vibration-induced foundation settlement can still occur at vibration severities which are normally not expected to cause structural damage. For this to occur, the soil has to be very sensitive to vibration (as is non-cohesive, uniformly graded sand or silt, for instance), and the vibration has to be continuous or frequent.

Since few investigations have been made regarding dynamically-induced settlement, it is recommended that expert advice be sought.

Another effect vibration has on soil is liquefaction, when sand or silt at the groundwater level suddenly loses its bearing capacity as a result of dynamic effects. During earthquakes, this process can lead to damage as serious as the collapse of buildings. Since the vibration covered by this standard normally lies well under the vibration magnitudes which occur during strong earthquakes, these effects should only be expected under the most unfavourable circumstances.

נספח ד :

### מידע נוסף בנוגע למדידות על גבי צנרת ועל הערכת תדירויות

#### ד-1 מדידת תנודות על גבי צנרת

מדידות להערכת ההשפעה של תנודות על צנרת יש לבצע, בשאיפה, באופן ישיר על גבי הצינורות. במידה וניתן, צינורות טמונים יחשפו רק בנקודת המדידה. הגשוש ימוקם כפי שמתואר בתת-פרק 5.3 בתקן

DIN-45669-2. התגובה בזמן לתנודות [time history] תימדד בכיוונים  $x$ ,  $y$ , ו- $z$ , כאשר אחד מהם מתלכד עם ציר הצינור.

יש להסיר את הבידוד בנקודת המדידה, למרות שלציפוי דק יש השפעה מועטה על התוצאות [לדיון בנוסח שבמקור]. כדי לאפשר מיקום הגשוש על משטח אופקי, ניתן למקם בסיס מבטון או מטיח [plaster?] על הצינור.

מיקום הגשוש על גבי הצינור עלול לעיתים קרובות להתגלות כמשימה מורכבת. כאשר מקור התנודות אינו בסמוך לצנרת, או שהוא ממוקם בסמוך אבל בעומק גדול בצורה משמעותית מעומק הצינורות, ניתן לבצע מדידות על פני הקרקע. חקירות קודמות הראו שתנודות שנמדדות על פני השטח, גדולות בד"כ [כך במקור] מאלו הנמדדות על גבי צינורות.

#### ד-2 תפקיד התדירות בתהליך שימוש ב- $v_i$

טבלה 1 מציגה ערכים מנחים עבור תנודה בביסוס כפונקציה של התדירות. ההערכה מתבססת על ביצוע הפרוצדורה הבאה:

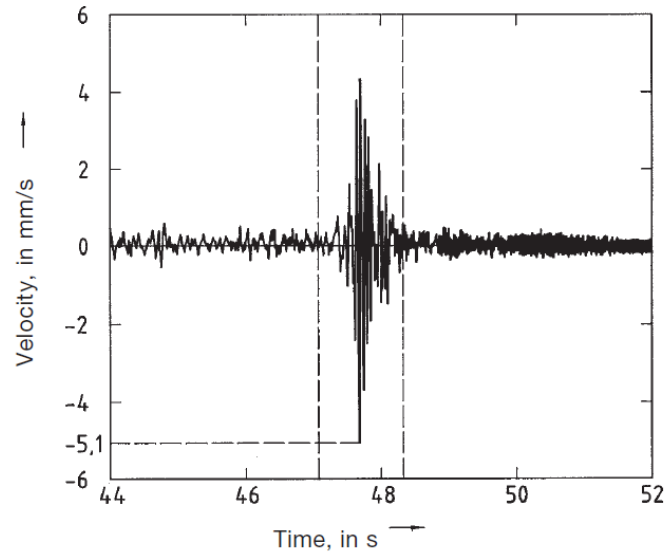
א. מציאת הערך המקסימאלי של המהירות בזמן  $v_i(t)$

ב. קביעת התדירויות המשמעותיות  $f_i$  [significant] מעל  $v_i(t)$ .

השוואת המהירות המקסימאלית  $v_i$  עם הערכים המופיעים בטבלה 1 עבור התדירות המשמעותית. הערה: ספקטרומים צרי תחום [narrow band spectra] מתאימים באופן מיוחד למציאת התדירויות  $f_i$ . כדי להפחית עיוות של הספקטרומים כתוצאה ממשכו ומצורתו של חלון הנתונים, יש להתאים את המיקום ואת המשך של חלון זה לעקומת התגובה בזמן  $v_i(t)$ .

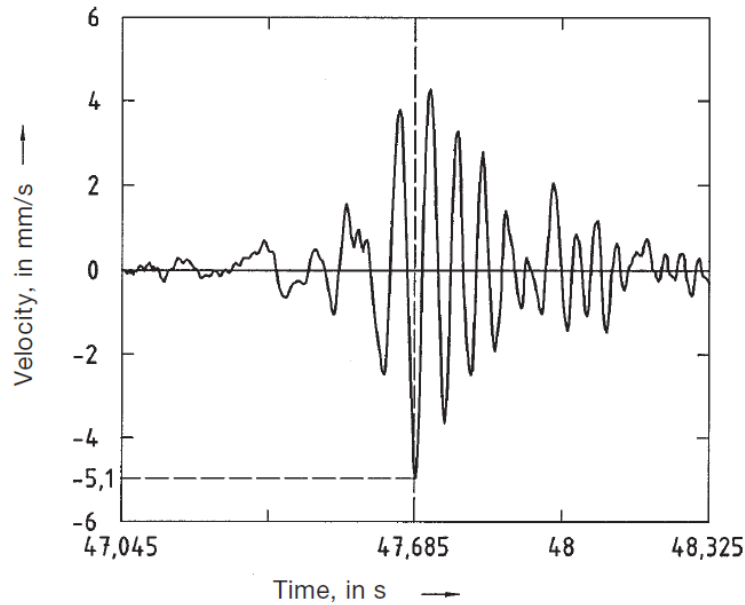
דוגמא: התנעת מכונת בנייה גורמת לתנודה לטווח קצר. לרכיבי המהירות  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ , ו- $v_z(t)$  הנמדדים בביסוס של מבנה סמוך יש תבנית תגובה דומה בזמן (מבחינה איכותנית). גם לספקטרומים תבנית איכותנית דומה. הערך המקסימאלי של הרכיב האנכי  $v_z(t)$  גדול בצורה ניכרת מאלו של הרכיבים האופקיים,  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ . לפיכך, הרכיבים האופקיים אינן נילקחים בחשבון. ציור D1 מציג את התגובה בזמן של הרכיב האנכי  $v_z(t)$  עם ערך מקסימאלי 5.1 ממ/שנייה. החלק העיקרי של התגובה

התחום בקווים המרוסקים בציר D1 מופיע בהגדלה בציר



.D2

ציור ד-1 : תגובה בזמן של רכיב המהירות האנכי עם ערך מקסימאלי 5.1 מ"מ/שניה.



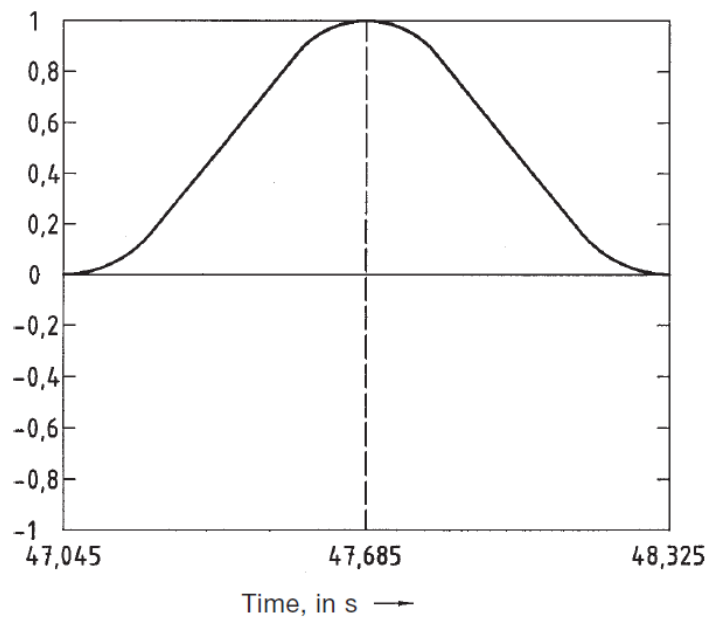
ציור ד-2 : הגדלה של תחום באורך 1.28 שניה מתוך התגובה בזמן המוצגת בציר ד-1.

לפני ההתמרה למישור התדר , התגובה בזמן המוצגת בציר ד-2 מוכפלת ב- Shifted Hanning

window המוצג בציר ד-3 ונתון ע"י :

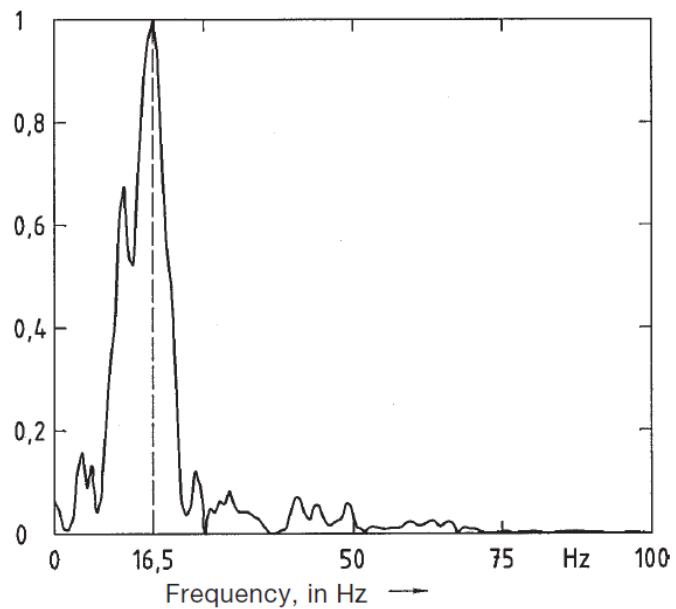
$$hw(t) = \begin{cases} ((1 - \cos(2\pi(t - t_0)/T_0))/2) & \text{for } t_0 \leq t \leq T_0 + t_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

הערך המקסימאלי של החלון מתאים לערך המקסימאלי של  $v_z$ . משך החלון הותאם לאזור המוגדל  
 בציור ד-2 (1.28 שניות).



ציור ד-3: Hanning window מותאם ל-  $v_z(t)$  ( $t_0=47.045$  sec,  $T_0=1.28$  sec)

המכפלה של  $hw(t)$  ו-  $v_z(t)$  מותמרת למישור התדר (ספקטרום) באמצעות התמרת פורייה. הספקטרום מוצג בציור D4 בצורה מנורמלת. הערך המקסימאלי [המשמש לנירמול] מופיע בתדירות  $f_z=16.5$  Hz.



ציור ד-4: ספקטרום מנורמל

הערך הנתון בשורה 2 של טבלה 1 עבור מבנה מגורים והתדירות 16.5 הרץ הוא 6.6 מ"מ/שניה. הערך המקסימאלי המדוד שווה 5.1 מ"מ/שנייה נמוך מערך זה.

**נספח ה -**

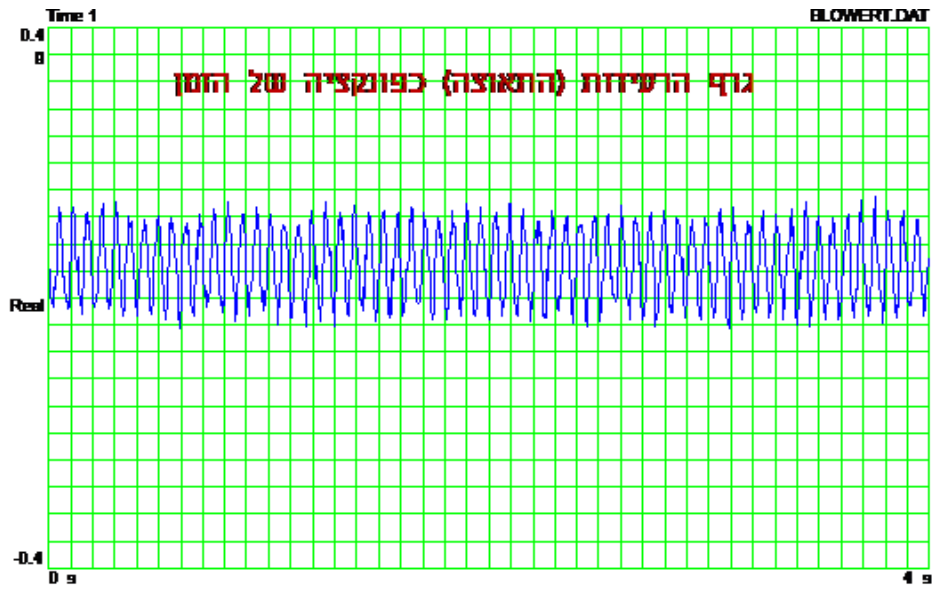


מד תאוצה מוצמד לרצפת מבנה למדידות מודאליות. מד תאוצה מוצמד לרגל מכונה למדידת עירור דינמי לאורך זמן

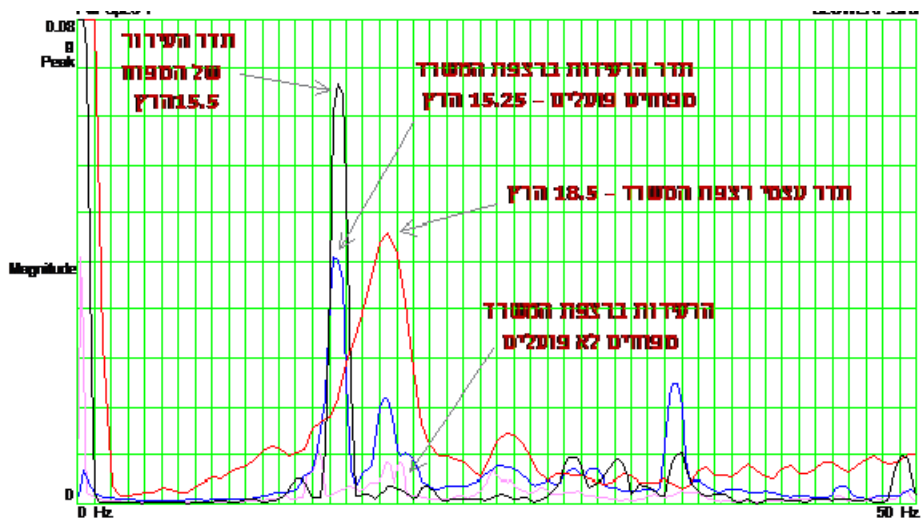


מערך מדידה. מדי תאוצה מפוזרים באולם ונאספים למרכז קליטת נתונים ופענוח בזמן אמת.

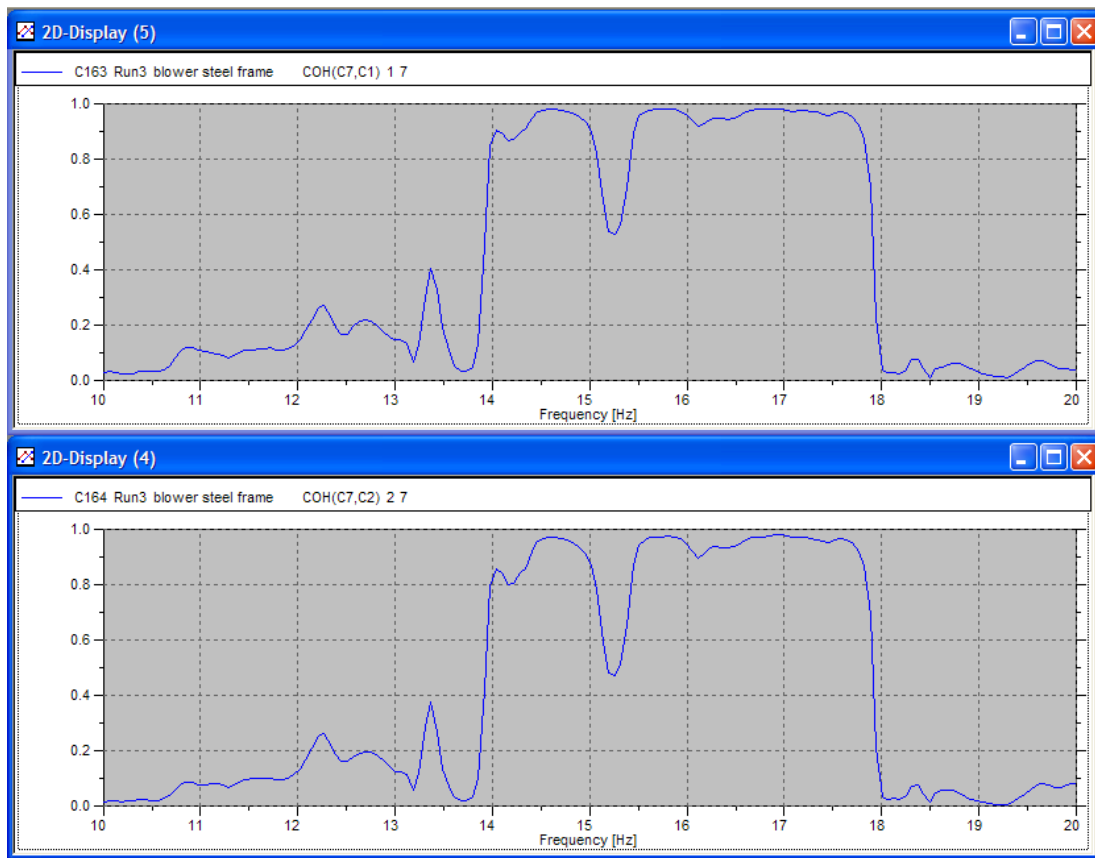




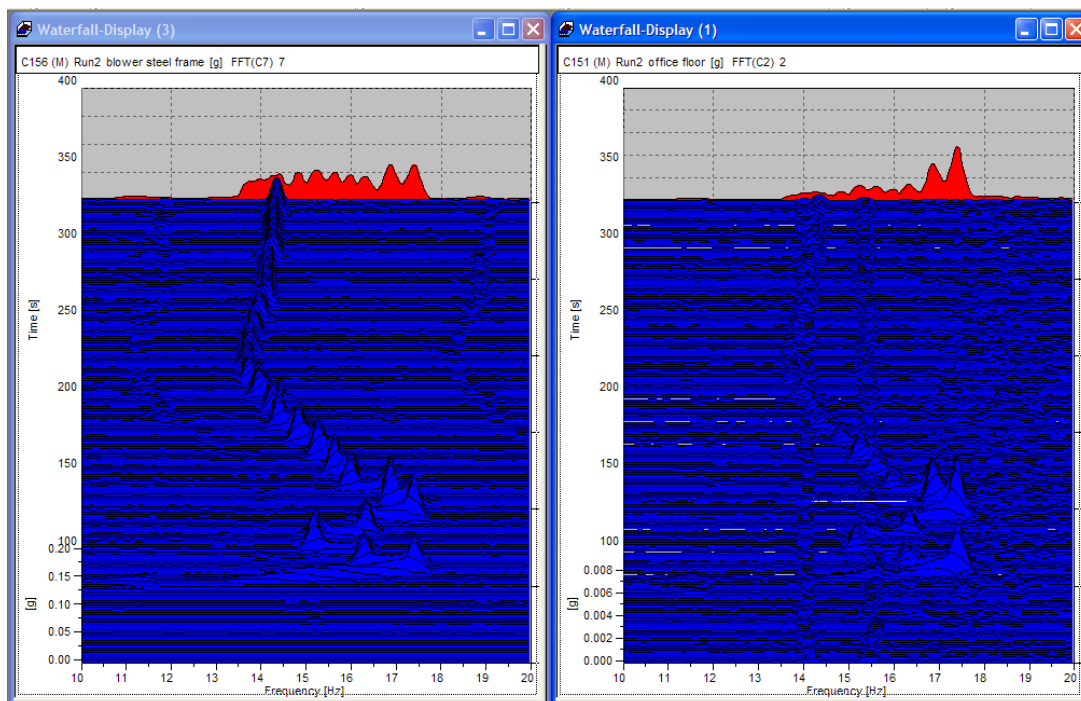
מדידת תאוצות במישור הזמן



פענוח מדידת תאוצות והתמרה למישור התדר.



בדיקת קוהרנטיות



רישום water fall. רישום תלת ממדי, בשלושה צירים: ציר הזמן, ציר התדר, ציר תאוצות. שינוי התאוצות לאורך זמן במישור התדר. ברקע – איסוף והשלכה של רישום לאורך זמן של תאוצות במישור התדר.

