

הגדרה מדעית לקול הברה

ראשי פרקים

א. מבוא	ו. הדמיית מערה
ב. קול הברה בשופר ובמקרים נוספים	ז. תוצאות ניסוייות
ג. מחלוקת הרמב"ם והרא"ש בדין "קול הברה"	ח. מסקנות הלכתיות מהניסויים
ד. אימתי זמנו וצורתו של "קול הברה"	ט. השלכות הניסויי על מערכות מודרניות
ה. תדרים וגלי קול	י. סיכום
	יא. הערת-נספח מאת הרב ישראל רוזן



א. מבוא

המשנה במסכת ראש השנה ג,ה קובעת שעל מנת לצאת ידי חובת מצוות שופר, יש לשמוע את קול השופר ולא קול הברה. על כן מי ששומע קול הברה למשל ממי שתוקע בתוך בור - אינו יוצא ידי חובה. הראשונים והפוסקים לא ביארו מהו אותו קול הברה, וכיצד ניתן להבחין האם הקול ששמענו הוא קול שופר או קול הברה. כמו כן, המונח "קול הברה" חדר גם לנושאים נוספים בהלכה, לדוגמה במצוות שמיעה באמצעות כלים מודרניים כרמקול¹ ומכשירים לכבדי שמיעה.² מטרתנו, במאמר זה, היא לנסות להגדיר לראשונה בצורה מדעית³ מהו קול שופר ומהו קול הברה,⁴ ולאפשר שימוש בכלים מדעיים כדי להבחין ביניהם.⁵ על פי העיקרון שאנו מציעים, ניתן לבדוק בצורה מדעית לגבי כל מכשור, האם הוא מקיים את תנאי קול השופר או שהינו מוגדר כקול הברה.

1. ראה הרב שלמה זלמן אוירבך, תחומין טז (תשנ"ו) עמ' 21-23 (מנחת-שלמה קמא סי' ט; מאורי-האש השלם, חלק ב עמ' תקנט-תקסד); הרב גדליה אורנשטיין, שמיעת הבדלה באמצעות רמקול, תחומין כו (תשס"ו) עמ' 457-462; הרב ישראל רוזן, מיקרופון ורמקול בשבת, תחומין טו (תשנ"ה) עמ' 371-392; הרב אשר וייס, קונטרס שבועי, בית מדרש לתורה והוראה שנה ו, קובץ כח, תשס"ו.
2. ראה מו"ר הרב נחום אליעזר רבינוביץ, השימוש בשתל קוכלארי, תחומין לא (תשע"א) עמ' 27-32; ד"ר ישראל ברמה, השתל הקוכלארי והגדרת החרש בהלכה, תחומין כד (תשס"ד) עמ' 173-178; הרב ישראל רוזן שינוי זרם חשמלי בשבת - עקרון הלכטכני ויישומיו, תחומין כו (תשס"ו) ובעיקר בעמ' 94-97; הרב רא"ם הכהן, שו"ת בדי-הארון או"ח סי' כא.
3. [הערת מערכת: ראו הערת-נספח בשולי המאמר מאת הרב ישראל רוזן]
4. הרב פרופ' זאב לב במאמרו בנועם - שנתון לבירור בעיות בהלכה, ספר עשרים ושלושה (תשמ"א) עמ' קפה-רח דן בנושא מבחינה עיונית-תיאורטית. הוא העלה סברה שלא כל התדרים ישמעו מחוץ לחדר אך תלה זאת בגודל הפתח ובכך שתדרים נמוכים (אורכי גל גדולים) לא יצליחו לצאת החוצה.
5. המאמר הוא סיכום של חלק מעבודת מחקר לתואר שני במסגרת המגמה למדע הלכה וחינוך בשיתוף עם הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת בר-אילן, תשע"ו. העבודה המקיפה כוללת ניסויים נוספים במערכות תקשורת וטלפוניה וכן פרטים טכניים והלכתיים מרובים שלא ניתן היה לכלול במאמר זה. יצוין כי בקובץ ירושת-פליטה (פורסם בשנת תש"ו) סי' י ניסה הרב נתן נטע שליטל (ראב"ד במונקטש) לבחון את ההבדל בין קול השופר הנשמע בטלפון לקול המקורי וטען כי הוא זהה. לא ברור כיצד ביצע ניסוי זה.

ב. קול הברה בשופר ובמקרים נוספים

המשנה במסכת ראש השנה (ג,ה) דנה בכשרות שופר שנסדק וניקב. בהמשך המשנה דנה באדם שתוקע לתוך בור:

התוקע לתוך הבור או לתוך הדות או לתוך הפיטס - אם קול שופר שמע, יצא; אם קול הברה שמע - לא יצא. וכן מי שהיה עובר אחורי בית הכנסת, או שהיה ביתו סמוך לבית הכנסת, ושמע קול שופר, או קול מגילה - אם כיוון ליבו - יצא, ואם לאו, לא יצא. אף על פי שזה שמע וזה שמע, זה כיוון את ליבו וזה לא כיוון.

ברור מהמשנה שישנו סוג קול, הקרוי "קול הברה", שהינו פסול למצוות שופר. ראשית, יש לברר האם דין "קול הברה" שייך רק בשופר או גם במצוות נוספות.

לכאורה נראה כי דין זה נוגע למצוות שופר בראש השנה בלבד. כך כתב בשו"ת מנחת-יצחק (ח"ב סי' קיג) שדין זה של "קול הברה" הוא ייחודי בשופר, ואינו קיים בדין קריאת התורה/מגילה,⁶ וכן במצוות שמיעה נוספות. באופן דומה לגבי יציאה ידי חובה ברמקול, כתבו בעל מנחת-אלעזר (ב, עב) ובעל מנחת אהרן (ר"א מילבסקי סי' יח) שעיבוי קול קורא המגילה ברמקול אינו פוסל, ויצאו השומעים ידי חובה, ורק בשופר - מעכב, וזאת משום דין "קול הברה" הפוסל בו, ורק בו (כל זה לשיטה שיש איסור "קול הברה" ברמקול). אמנם משמע בשו"ת הלכות-קטנות (ח"ב סי' רעו) שגם ביתר הדינים יש דין קול הברה, וכן כתב בשו"ת אגרות-משה (או"ח ח"ב סי' קח).

דין זה ש"קול הברה" הוא רק בשופר ניתן לדייק גם מהמשנה עצמה (ראש השנה ג,ה). במשנה מופיעים שני דינים: "התוקע לתוך הבור... אם קול הברה שמע - לא יצא; וכן מי שהיה עובר אחורי בית הכנסת... ושמע קול שופר או קול מגילה, אם כוון לבו - יצא. ואם לאו - לא יצא", רואים שבמקרה של קול הברה - המשנה נקטה רק את התוקע בשופר, ואילו לגבי כוונה, בשמיעה מאחורי בית כנסת - המשנה נוקטת קול שופר או קול מגילה. משמע מחלוקה זו שרק בשופר יש דין "קול הברה".

ג. מחלוקת הרמב"ם והרא"ש בדין "קול הברה"

הגמרא בראש השנה (כז,ב) דנה מי הנושא של המשנה לגבי התוקע בבור, האם יצא (קול שופר) או לא (קול הברה):

אמר רב הונא: לא שנו אלא לאותן העומדים על שפת הבור, אבל אותן העומדים בבור יצאו. תניא נמי הכי: התוקע לתוך הבור או לתוך הדות - יצא. והתנן, לא יצא? אלא לאו שמע מינה כדרב הונא, ש"מ. איכא דרמי להו מירמא: תנן התוקע לתוך הבור או לתוך הדות - לא יצא; והתניא יצא? אמר רב הונא: לא קשיא, כאן לאותן העומדים על שפת הבור כאן לאותן העומדים בבור.

רב הונא (ולפי גרסת הרא"ש - רב יהודה) מסביר שדין המשנה מדובר לאותם העומדים חוץ לבור, אך אותם העומדים בבור - יוצאים ידי חובתם תמיד. רב הונא אף מביא לכך סיוע מברייתא שפוסקת שיוצאים ידי חובה, ובעקבות כך מעמיד שמדובר לאותם העומדים בבור. הבי"ח (או"ח תקפז ד"ה מקום הראוי) מוסיף שאע"פ שהתוקע

6. המנחת-יצחק כתב בח"א סי' לז (אות ז) שגם במגילה יש פסול קול הברה, אך בח"ב סי' קיג הביא את שיטת הרב פרנק שחילק ביניהם.

יוצא ידי חובה כיוון שעומד בתוך הבור ושם שומע את התקיעה, השומע מחוץ לבור לא יוצא ידי חובה, כי זה תלוי בשמיעה ולא בתקיעה.⁷

רש"י בסוגיה (ראש השנה כז, ב ד"ה אותן) מסביר על העומדים בבור, שהם לעולם שומעים קול שופר, ומשמע שאותם העומדים חוץ לבור שומעים לעיתים קול שופר (ואז יוצאים ידי חובה) ולעיתים קול הברה (ואז לא יוצאים).⁸ באופן דומה פסק הרמב"ם בהלכות שופר סוכה ולולב א, ח:

התוקע בתוך הבור או בתוך המערה - אותן העומדין בתוך הבור והמערה, יצאו. והעומדין בחוץ: אם קול שופר שמעו - יצאו, ואם קול הברה שמעו - לא יצאו.

מפורש ברמב"ם, שאף אותם העומדים בחוץ יכולים להבחין האם זה קול הברה או קול שופר, והדבר תלוי בשמיעת האדם.

הרא"ש במקום (פ"ג סי' ח) חולק על הבנה זו. לדעתו לא ניתן להרגיש בהבדל בין הקולות, ולפיכך כיצד יכול האדם להבחין בכך? האם זה תלוי במרחק מהבור? בעומק? לכן סובר הרא"ש שהגמרא אינה מחלקת בין מרחקים שונים מהבור, ותמיד העומדים בבור יוצאים ידי חובה, והעומדים בחוץ - לא יוצאים. כשיטה זו פסק בנו בטור (או"ח סי' תקפז).

כאמור, הרמב"ם במשנה תורה פסק את הלכה בלשון: "התוקע... בתוך המערה", אע"פ שבמשנה כתוב: "לתוך הבור או לתוך הדות (או הפיטם)". בעקבותיו פסק השו"ע (או"ח תקפז סעיף א) שהתוקע לבור או מערה - מי שבפנים יצא, ומי שבחוץ - תלוי בשמיעתו (כרש"י ולא כרא"ש): אם קול שופר שמע - יצא, ואם שמע קול הברה - לא יצא.

מהיכן הוסיף הרמב"ם מערה? הרמב"ם בפירוש המשנה לראש השנה ג, ה כתב שבור הוא הפירה בגוף הקרקע, ואילו דות (ובלשונו חדות) היא בריכה שכתליה גבוהים על פני הקרקע. ניתן לפרש שמערה היא הדות, והרמב"ם שינה את הלשון, לאור הסברו בפירוש המשנה.⁹

השו"ע (או"ח תקפז, א) פסק כשיטת הרמב"ם שחוץ לבור לעיתים שומע קול שופר ולעיתים שומע קול הברה. הטי"ז (שם סי"ק א) מעיר שלמרות זאת, כיוון שבדברים רבים איננו סומכים על בקיאותנו, ובפרט שהרא"ש סובר שאי אפשר לברר דבר זה, תמיד

7. כנזכר בטור (סי' תקפה) ולכן מברכים "לשמוע קול שופר".

8. להרחבה בשיטת רש"י, וכן בשיטות ראשונים נוספות, ראה הרב פרופ' לב (לעיל הערה 4).

9. כך פירש מו"ר הרב נחום רבינוביץ בספרו יד-פשוטה על הרמב"ם, הוצאת מעליות, מעלה אדומים, תשמ"ד. במשנה-ברורה (ביאור-הלכה תקפז ד"ה או לתוך המערה) הסביר שדות הוא מקום מכוסה, ולכן הרמב"ם החליף את דות למערה, כיוון שהחידוש הוא שקול הברה קיים בדות בגלל הכיסוי. בספר ימי-שלמה (לרב שלמה קמחי, הלכות שופר סוכה ולולב, א, ח, ד"ה ודע) הסביר שהרמב"ם נקט לשון מערה, כיון שחזר בו ממה שכתב בפירוש המשנה, וסובר שדות היא מערה מתחת לפני הקרקע ולא על גביו, כי ע"ג הקרקע אין קול הברה (ע"פ המגן-אברהם או"ח סי' תקפז ס"ק א). ייתכן שהרמב"ם הלך כאן בעקבות הגאונים (אוצה"ג ר"ה סי' סא עמ' 47) שהסבירו את הצורך לתקוע בבורות משום גזרות הגויים שלא לקיים מצוות, ודבר זה שכיח מאוד בהיסטוריה דווקא במערות (מערות רבות נמצאו במקומות שונים בארץ, מתקופת החשמונאים ומתקופת מרד בר-כוכבא). בביאור-הלכה (או"ח תקפז ד"ה או לתוך המערה) מאריך בביאור הדעות השונות מהו הדות בשיטת רש"י והרמב"ם.

העומדים חוץ לבור- צריכים לשמוע את התקיעה פעם נוספת. אמנם לעניין ברכה, רק אם ברור לו ששמע קול הברה (שבזה גם הרמב"ם מודה שלא יצא) יוכל לברך שוב.

מטרתנו בחלק הניסוי היא לבדוק בצורה אובייקטיבית מה מתרחש בתוך המערה ומה מחוצה לה מבחינת הספקטרום של אות השמע. באמצעות מדדים אלו נסביר את ההבדל בין שיטת הרא"ש שתמיד מחוץ לבור נחשב קול הברה, ובין שיטת רש"י, הרמב"ם והשו"ע שרק לעיתים זה קול הברה, אך משמע שייתכן ויהיה גם קול שופר.

ד. אימתי זמנו וצורתו של "קול הברה"

בנוסף להכרעה בין הרמב"ם והרא"ש יש לדון בעוד מקרים הנספחים לדיון בקול הברה:

1. האם קול הברה הוא מושג סובייקטיבי שתלוי בשמיעתו של האדם, שעשויה להשתנות בין אנשים שונים וכן בזמנים שונים: לדעת רוב הפוסקים מצוות אינן צריכות כוונה, ולכן לא צריך להתכוון בשביל לצאת ידי חובה. אמנם, בהמשך המשנה (ראש השנה ג,ה) מופיע הדין שהשומע מאחורי בית כנסת ולא כיוון ליבו לא יצא. הגמרא מבארת (ראש השנה כח, ב) שגם לסוברים שמצוות אינו צריכות כוונה, שמיעה זו ללא כוונה, נחשבת כשמיעת נעירת חמור בעלמא, ולכן זהו קול חמור ולא קול שופר.¹⁰ רואים אם-כן, שלמרות שמצוות אינן צריכות כוונה, יש משמעות סובייקטיבית לשמיעתו של האדם, והיא יכולה להעניק לשמיעה מעמד שונה בהתאם לכוונה.¹¹ לפיכך יהיה עלינו להראות שקול הברה גם ניתן לזיהוי סובייקטיבי.

2. האם מדובר דווקא בקול שונה מבחינה איכותית או גם עוצמת הקול השונה יכולה לגרום לקול הברה. המשנה ברורה בביאור-הלכה (או"ח תקפו ד"ה "או לתוך המערה") הביא את שיטת הט"ז שגם מי שעומד מאחורי בית כנסת בריחוק מקום, ייתכן ושומע "קול הברה". אמנם הביאור הלכה הביא את שיטת החולקים (מטה יהודה ועוד) אך פסק לחוש להלכה לשיטת הט"ז. רואים שלשיטתו גם שינוי בעוצמה (כמות) ולא רק באיכות יכול להיחשב לקול הברה. אמנם ברור שאם בעל התוקע תוקע תקיעה חלשה, הרי שכל השומעים הנמצאים בבית הכנסת יוצאים ידי חובה, אע"פ שהקול חלש. ההבדל ממקרהו של הט"ז, ששם התקיעה הייתה טובה, והשומע לא שמע בעוצמה דומה לעוצמת התקיעה של התוקע, ולכן לשיטתו השמיעה מחוץ לבית כנסת יכולה להיחשב כ"קול הברה".

3. האם קול הברה נובע מתוך הקול המקורי שהתבלבל (כמו במקרה במשנה שהקול משתנה בזמן יציאתו מהבור) או שגם קול חיצוני יכול להיחשב לקול הברה. ערוך-השלחן (או"ח תקפו ט) כתב שיש להיזהר לא להשתעל בזמן התקיעות מחשש לקול הברה. באופן דומה דעת מהרי"ל (מובא בבאר-היטב או"ח תקפו ס"ק ה) שיש להיזהר לא להקיא ולא להביא תינוקות לביהכ"נ, מחשש לקול הברה. רואים שלשיטתם גם קול חיצוני שאינו קשור כלל לקול השופר ולא נובע ממנו - יכול להיחשב לקול הברה.

4. המשנה-ברורה (ביאור-הלכה או"ח תקפו ד"ה ואם קול הברה) כתב לגבי הד: "ודע עוד דטבע הוא לתקוע בין ההרים או ביער נשמע קול החוזר, ומדסתמו הפוסקים ולא הזכירו דיש ליזהר בענין זה, משמע דאין זה ערבוב הקול אלא הקול נכפל אחר שנגמר הקול הראשון". ויש להבין: ביחס לקול מקורי המעורב עם קול הברה פוסק המשנה

10. ראה מאמרנו כוונה במצוות במשנת הרמב"ם, המעיין מה, ב (תשס"ה) עמ' 36-46.

11. במאמרנו שם מבואר שיש הבדל בנושא הכוונה בין תקיעת שופר למקרא מגילה. דבר זה מתאים לשיטות הסוברות שגם דין "קול הברה" הוא רק בשופר ולא ביתר מצוות השמיעה (כמנחת-אלעזר ושיטתו).

ברורה להחמיר (בפרט שזה מצווה דאורייתא) אף אם היה שיעור תקיעה באות המקורי, וכן אם היה רק ריחוק מקום (כשיטת הט"ז בסעיף הקודם). אם-כן, כיצד ניתן להקל בקול שכולו "קול הברה"? אלא צריך להסביר שגם הד הנו קול ברור, אך הבעיה בקול הברה היא הערבוב. אם הקול הוא קול אחד, בין אם הוא מקורי ובין אם הוא חוזר - הרי שאפשר לצאת בו ידי חובה, ואינו "קול ההברה". במקרה והקול מעורבב ומכיל שני סוגי קול (קול מקורי וקול חוזר) - אז יש בעיה. בניסוי אכן ראינו שבמידה וקיימים שני קולות (קול מקורי וקול חוזר) הם עלולים לבטל אחד את השני מבחינת תדרים, וכך ליצור קול שאינו מכיל את תדר הבסיס של הקול המקורי.¹²

ה. תדרים וגלי קול

המונח תדר מייצג תופעה מחזורית של אות. ניתן להסתכל על כל אות (שמיעה, ראייה וכדומה) בתור גרף רציף בזמן המכיל ערך שונה בכל יחידת זמן נתונה. התדר מייצג תופעה שחוזרת על עצמה כל יחידת זמן נתונה, וקצב השינוי נמדד במספר המחזורים המתבצעים ביחידת זמן. באותות שאנו נעסוק במאמר זה, אותות דיבור, ניתן לחלק כל אות לצירוף של אותות שונים, שכל אחד מהווה אות מחזורי.

את האות המחזורי (=תדר) מקובל למדוד במספר מחזורים לשנייה, שהיחידות לכך הן הרץ (Hertz ובקיצור Hz), ולסמנו באות f . אות מחזורי הוא אות סינוסי "טהור", כך שהתדר הינו מספר מחזורי ה"סינוס" בשנייה. ככל שזמן המחזור של אות הינו ארוך יותר (דהיינו לוקח לו משך זמן רב יותר עד שמסיים מחזור) הרי שהתדר קטן יותר, ע"פ הנוסחה $f=1/T$ (זמן מחזור). הדיבור של האדם מורכב מתדרים רבים היוצרים את מרחב הקולות שיוצאים מפיו. כך גם בכלי נגינה. ההבדל בין קול בס לבין קול סופרן הוא התדר. האדם הממוצע שומע תדרים שהינם בין 50 ל-20,000 פעמים בשנייה (Hz). ככל שהאדם מתבגר, חלק מהתאים שאחראים על התדרים הגבוהים נעלמים, ולכן הוא שומע רק עד 16,000 הרץ ואף למטה מכך. לצורך השוואה, בעלי חיים כעטלפים יכולים לשמוע עד 100,000 הרץ.

לרוב כלי הנגינה יש תדר "טבעי" (תדר יסוד) בו הכלי רוטט בשעה שמפעילים אותו. הצליל המופק הינו סופרפוזיציה (חיבור) של כל התדרים שהופקו, אך ישנו תדר בסיס שבולט מעל יתר התדרים. לתדר הבסיס ישנו בדרך כלל גם "הרמוניות", שהם צלילים בתדרים שהינם כפולה של תדר היסוד. ההרמוניות גם יכולות להשפיע על הספקטרום המתקבל, כיוון שכל הרמוניה (בתנאי שהיא כפולה מדויקת) חוזרת בפועל על האות המקורי, בתדרות גבוהה יותר (נקודת האיפוס שווה, בהינתן פאזה התחלתית זהה). השופר הינו סוג של כלי נשיפה, המכיל תדר בסיסי שנע בין 350 ל-550 הרץ. התדר, העוצמה והיציבות תלויים מאוד בסוג השופר, אך גם בתוקע, בצורת החזקת הכלי,

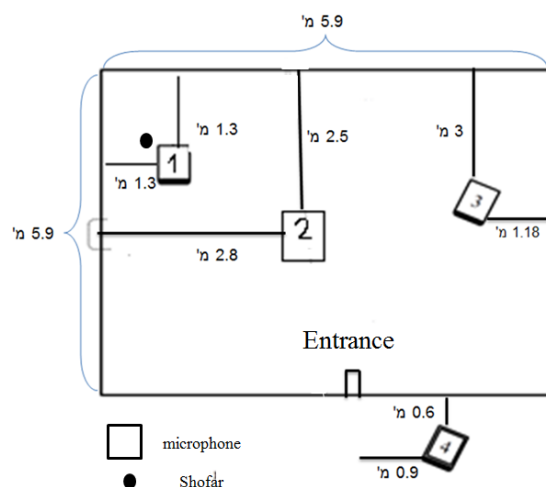
12. הרב משה לעווערטוב דן בגיליון 'המאור' (ע"ד סידור גט פיטורין ומגילה והבדלה והזמנה לד"ת בטלפון שופר בבת קול בהד הרים או בקול הברה, גליון שד (שנה מא תשמ"ח), עמ' 13-16) לגבי קיום מצוות דרך טלפון ודומיהם. ביחס לדיני אישות יש חלוקה בין קול הברה לבת קול. לגבי בת קול מפורש במשנה יבמות (טז,ה) שאדם הצועק בראש ההר שיגרשו את אשתו, ניתן להשיאה על סמך זה. לעומת זאת "קול הברה" מופיע במסכת גטין (פט, א) כעדות על זנות שאינה וודאית. קול הברה הוא הערבוב (קול השופר ו"דחקות הבור") אך קול שופר שנשמע בברור **לאחר** סיום הקול המקורי - אפשר לצאת בו, ובוודאי בשעת הסכנה והדחק (ותלה זאת בפייטן שכתב "פשעיו תעיר בקול קולות שופר", פיוטים למוסף יום א' של ראש השנה).

בכוח שהוא מפעיל עליו ובעוד פרמטרים שונים.¹³ בכל תקיעה יש מלבד התדר הבסיסי גם הרמוניות בתדרים שקרובים לכפולות התדר הבסיסי. כך לדוגמא עבור תדר בסיס של 400 Hz, נמצא כפולות ב- 800, 1200, 1600, 2000, 2400 Hz, ויתכנו גם נוספות. היחסים בין ההרמוניות משתנים בכל תקיעה לפי הפרמטרים שהזכרנו, אך בדרך כלל לא תהיינה הרמוניות מעבר ל 6000 Hz.

1. הדמיית מערה

מטרת עבודתנו הייתה להגדיר מבחינה מדעית/הנדסית "קול הברה". מכיוון שממשמעות לשון המשנה נראה כי היו שומעים קול הברה במערות ובורות, והיה הבדל מבחינת הנשמע בין מי שהיה עומדים בתוכם לאלו שעומדים מחוצה להם - ביקשנו לבדוק את קול השופר בתוך הדומה ככל הניתן למציאות זו. לשם סימולציה של בור/מערה בתנאי מעבדה, בחרנו להשתמש בחדר אקוסטי. חדר אקוסטי מאפשר לבצע סימולציה מעבדתית, ולבחון תופעות שונות בתנאים "אידיאליים". החדר הינו אטום לרעש חיצוני. בנוסף לכך, ניתן לבנות את החדר בצורות שונות (ע"י שינוי מצב הקירות) כך שהאות שיושמע בתוך החדר יעבור תהליך שונה של הדהוד. רמת ההדהוד נקבעת לפי אורך התגובה המהדהדת האפקטיבי,¹⁴ וכך אפשר לכוון מהו אורך ההדהוד שאנו

מעוניינים בו בניסוי. בצורה זו ניתן לדמות את החדר למערה, בה נמצאים קירות מהדהדים (מעצם טבעה), ולכוון עבור כל ניסוי את רמת ההדהוד הרצויה. יכולת זו היא הבסיס עבורנו בביצוע הניסוי.



גודל החדר הוא 5.9X5.9 מטרים, כפי שניתן לראות בתמונה 1. בחרנו נקודת שידור, שתהיה רחוקה מהיציאה, ומאידך לא צמודה לאחד מקירות המעבדה (מסומן במפה כנקודה שחורה ובמקרא כ-shofar). לצורך הקלטה בחרנו ארבע נקודות: שלוש בתוך החדר ואחת מחוצה לו. נקודה ראשונה (1) צמודה לנקודת השידור

ומדמה את קול השופר שלא עבר עדיין עיבוד בחדר ולא מושפע (באופן משמעותי) מהדהוד (כמובן שהחוזרות מהקיר מגיעות גם לנקודה זו, אך יחסית לעוצמת הקול מהשופר בנקודה זו - הן זניחות).

נקודה שניה שנבחרה היא תמונה 1: תיאור מבנה החדר האקוסטי שבו התבצע הניסוי במרחק כשני מטרים משם (2)

באמצע החדר - קרוב למקור ורחוק מהקירות. נקודה שלישית במרחק 3.14 מטרים (3)

13. ע"פ: Almeida et al: (2013) "Clarinet input and output parameters", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 134, No. 3, p. 2247 - 2255. באותו שופר יהיו הבדלים בין תוקעים שונים, ואפילו באותו תוקע על פי צורת החזקת השופר.

14. ירידת עוצמה של 60 dB יחסית לכניסה נחשבת כסוף התגובה.

נבחרה כך שתהיה קרובה לקירות ורחוקה יחסית מהמקור וגם מהפתח, במקום בו השפעת ההדהוד התוך חדרי גדולה. הנקודה הרביעית נבחרה מחוץ לחדר (4), במרחק 90X60 ס"מ מהפתח, בכדי לדמות את האדם שעומד מחוץ לבור/מערה. בניסוי השתמשנו בשופרות סטנדרטים. הייתה הקפדה על שופר כשר (ולא סדוק), על מנת שהקול היוצא ממנו יהיה חלק. כמו כן נבדקו מספר שופרות שונים (שצפוי כי לכל אחד מהם יהיה תדר בסיס שונה, והרמוניות שונות, כתלות באורך השופר ובפיתוליו) בכדי לוודא שהתוצאות המתקבלות חוזרות על עצמם בכל המקרים. כמו כן היה צורך גם לבדוק בעלי תקיעה שונים, ולבחון את השפעתם על התוצאות המתקבלות.

לשם מציאת קול שופר ומאפייניו, הוקלטו מספר תקיעות של שופרות שונים באמצעות מכשיר ההקלטה. על ההקלטה נעשה עיבוד באמצעות תוכנת Matlab וכך חושבו המאפיינים הספקטראליים של האות. ההקלטה התבצעה קרוב מאוד לשופר (נקודה 1 בתמונה), כך שלא היה חשש, שחלק מהאות המוקלט הוא קול הברה. לשם מציאת קול הברה ומאפייניו, הוקלטה תקיעת השופר באמצעות מכשיר ההקלטה מחוץ לחדר האקוסטי (נקודה 4 בתמונה). ניתוח התוצאות נעשה בדומה לאפיון קול השופר, באמצעות עיבוד של תוכנת Matlab, ובאמצעות השוואה בין הרכיבים הספקטראליים של האות. כשבאים לדון בתופעת התפשטות גלי שמע בתוך מערה/בור או כל מקום בעל תופעת הדהוד¹⁵ יש צורך להבין כיצד התופעה מתרחשת ואיך ניתן למדוד אותה. עד תחום התדר הנמוך (תחום שרדינגר) ההדהוד מיוצג כגלים. מעל תחום זה - ההדהוד הופך להיות קרניים (לא מתפתחים גלים) עם הרבה החזרות. בחדר גדול תדר זה הינו מתחת לתחום השמע, כ- 100 Hz, לעומת חדר רגיל שהוא נע בין 300-1000 Hz. ההחזרות המתבצעות מהקירות מתחלקות לשתיים. בזמן הקרוב (עשרות מילי שניות) ההחזרות הינן וקטור אקראי של החזרות, שקשה מאוד למדידה. אך, עם התקדמות הזמן, ההחזרות שמגיעות מכל מקום ניתנות למידול בצורה שמייצגת את התגובה של המבנה הגאומטרי של האזור.

ברור שישנה השפעה לרמת ההדהוד של החדר גם עבור ההקלטות המתבצעות בתוך החדר, אך ההשפעה המכרעת ביותר הינה עבור ההקלטה מחוץ לחדר, שהיא קול הברה. על-כן, התבצע ניסויים שונים של מדידת קול הברה, ברמות שונות של הדהוד, תוך מדידת ההשפעה של הרמה על אות המוצא, עבור אות ידוע (שידור אות מוקלט זהה בשני הניסויים).

ביצוע ההקלטות בו-זמנית הן של הכניסה והן של המוצא (מחוץ לחדר) מאפשר לנתח את השינויים הספקטראליים שהתרחשו בהרמוניות השונות עקב "יציאת" קול השופר מהחדר. חיפוש השינוי (ביחסי ההרמוניות בספקטרום) ייעשה על שלב התקיעה במצב יציב, ולא בתחילתו (תופעת הברה מתרחשת רק לאחר שלב ה"מעבר" של האות, בחלק היציב).

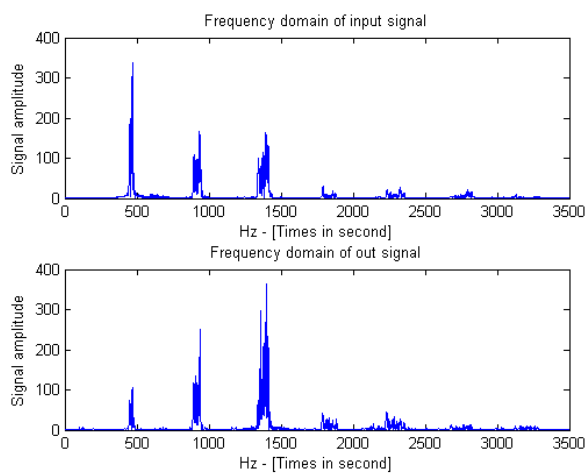
שיטה נוספת להשוות ביניהן יכולה להיות לאחר סיום האות, בשלב בו נשאר ההדהוד בלבד, ללא אות מקור. כמובן לשם כך צריך שהאות יסתיים בבת אחת, ולא ידעך לאט. בכדי לבחון זאת הוקלטה תקיעת שופר, ובאמצעות תוכנת Matlab הורד החלק האחרון של ההקלטה, כך שנחתך כל סיום ההדרגתי של האות. כששידרנו אות זה דרך המיקרופון - ניתן היה לחשב את השפעת ההדהוד על האות מחוץ למערה, בשלב ההדהוד בלבד (לאחר סיום התקיעה).

מטרת הניסוי הייתה לעמוד על השתנות הספקטרום של תדר הבסיס וההרמוניות באות הברה ביחס לאות המקורי, וכיצד זה מושפע מרמת ההדהוד.¹⁶

ז. תוצאות ניסויים

כדי לבדוק את השפעת ההדהוד בתוך החדר/מערה ומחוצה לו, נערכו ניסויים שונים בחדר האקוסטי. הניסויים נערכו בתנאים שונים של הדהוד (ממצב של 300 עד ל-600 מילי שניות), בשופרות שונים, מספר תקיעות בכל שופר וכן תוקעים שונים. בסט ניסויים הראשון התבצעה רק תקיעת שופר בחדר, בעוד שבסדרה השנייה והשלישית בוצעה גם השמעת קול השופר (שהוקלט בניסוי הראשון) דרך מערכת ההגברה. בעזרת השמעת קול ידוע ניתן לשלוט על הכניסה (שהיא הופכת להיות ידועה ולא אקראית) וכן ניתן להפסיק את האות בזמן ידוע, על מנת לבחון את השפעת ההדהוד בסיום האות, בלא שתהיה דעיכה איטית.

תוצאת המחקר היא שניתן להגדיר קול הברה את המקרה שבו מתרחשת התאבכות הורסת של תדר הבסיס, כך שתדר זה כמעט "נעלם", אך יתר ההרמוניות אינן מונחתות (באופן יחסי). בתמונה 2 ניתן לראות ניתוח של אחת מהקלטות השופר. תדר הבסיס של תקיעת שופר זו היה 470 הרץ. בגרף העליון ניתן לראות את תדר הבסיס של השופר יחד עם תדרי ההרמוניות הנלוות לו, ובגרף התחתון ניתן לראות כי תדר זה כמעט נעלם בקול השופר שנשמע מחוץ לחדר/מערה.



תמונה 2: תמונת התדר של הקלטת שופר בניסוי שבוצע. למעלה - ההקלטה הצמודה לשופר, כאשר ניתן לראות כי תדר הבסיס בעל עוצמה גבוהה, ולמטה מחוץ לחדר - תדר הבסיס מונחת משמעותית בכ-75% (מ-320 ל-80). במקביל בהרמוניות הראשונה והשנייה האמפליטודה במוצא עלתה כיוון שסך כל האנרגיה נשמר.

תופעה זו התקבלה עבוד הדהוד של 600 מילי שניות. כאשר הורדנו את רמת ההדהוד ל-300 מילי שניות תדר הבסיס לא הונחת בצורה משמעותית.

כפי שהוסבר בסעיף ד, "קול הברה" מתייחס במקור להבחנה של האדם בשמיעה. על-כן, חייבים לוודא שישנו הבדל ניכר בשמיעה באוזן בין האות שנחשב כקול הברה

16. ע"פ שיטת רש"י והרמב"ם, שהעומדים בחוץ לעיתים שומעים קול שופר ולעיתים קול הברה, אין צורך שמדד השינוי יתרחש בכל המקרים. דרישת הניסוי הינה קריטריון שיתקיים בחלק משמעותי של המקרים.

לבין האות שהינו קול שופר.¹⁷ אמנם, כבר הרא"ש (פ"ג סי' ח) קבע שאיננו בקיאים להבחין בין קול שופר לקול הברה, אך ייתכן כי כוונתו הייתה לומר שכאשר משמיעים לאדם קול - הוא לא ידע האם זה קול שופר או קול הברה. ברם, עדיין חייב להיות הבדל בין שני הקולות, ולכן מטרתנו לוודא שניתן להבחין גם בשמיעה באוזן בין אות הכניסה לאות המוצא.

לכותבי המאמר היה ברור שגם בשמיעה ניכר שיש הבדל בין הקולות, אך על מנת לוודא מדעית תחושה זו, ערכנו בדיקות סובייקטיביות ע"י חמישה מאזינים בכדי לוודא שישנה ההבחנה בין הקול המוקלט מחוץ למערה (קול ההברה) לקול שופר. המאזינים שמעו את הקול המקורי מחד, ומאידך את הקול שעבר בתווך של החדר, ויצר קול המוגדר כ"קול הברה" (המאזינים לא ידעו מהו אות הכניסה ומהו אות המוצא).¹⁸ השומעים התבקשו לומר האם הם מבחינים בין הקולות, ואיזה מתוכם הוא הקול המקורי ואיזה הקול שעבר הדהוד. מטרת הניסוי הייתה לבחון האומנם הניסוי בחדר האקוסטי, נכון גם במישור המעשי, שהרי בזמן חז"ל בוודאי שמעו באוזן ולא ניתחו ספקטרום. בשלושת ההקלטות הראשונות התרחשה הנחתה בתדר הבסיס, ובשתי האחרונות לא התרחשה.

מתוצאות הניסוי עולה שאכן יש אבחנה ברורה בין ההקלטה בתוך החדר לבין ההקלטה מחוצה לו. כמו-כן בולט במיוחד שבשלוש ההקלטות בהם תדר הבסיס הונחת, היה זיהוי כמעט מוחלט של קול השופר לעומת קול ההברה (4 מאזינים זיהו בשלושת המקרים ומאזין אחד בשתי הקלטות מתוך שלוש). לעומת זאת בהקלטות שבהם לא הייתה הנחתה של תדר הבסיס (הקלטות 4 ו-5) הזיהוי היה חלקי (6 מתוך 10). הדבר מחזק את הטענה שהקול הנשמע בחוץ שונה מהקול בפנים, כפי שקובעת הגמרא (ראש השנה כז, ב) שהעומדים בתוך הבור שומעים קול שופר והעומדים בחוץ שומעים קול הברה. כמו כן הראנו שהנחתת תדר הבסיס גורמת לשינוי הקול המקורי. אמנם, גם הקול החיצוני נשמע כמו שופר, אך הוא נשמע שונה מהשופר המקורי.

כמו כן בדקנו האם ניתן לאפיין קול הברה בשלב של סוף התקיעה (מסיום התקיעה עד סוף ההדהוד) ולא קיבלנו אפיון מיוחד לאות בתוך המערה ומחוצה לה.¹⁹

ח. מסקנות הלכתיות מהניסויים

על פי ההסבר שקול הברה זוהי ההתאבכות ההורסת שמנחיתה/מבטלת את תדר הבסיס, ניתן להבין חלק משיטות הפוסקים בהגדרת קול הברה. ראינו שכלי נגינה מכיל תדר בסיס בודד (והרמוניות) בניגוד לדיבור שמכיל אלמנטים נוספים. לפי הסברנו, שקול הברה הינו העלמות תדר הבסיס, מובן מדוע נקטו דין זה בשופר דווקא, ולא במצוות דיבור. רש"י הסביר שקול ההברה מגיע לאחר שמתחיל קול השופר. כמו כן ראינו שלשיטתו קול ההברה הפוסל הוא הערבוב בין קול ההברה לקול השופר. שני נתונים אלו מתאימים מאוד לתוצאות הניסוי. בתחילה העומדים מחוץ למערה שומעים את קול השופר, ורק לאחר מכן מגיע הקול הנוסף שגורם להתאבכות ההורסת, וכך נוצר

17. אין הכוונה שאחד ישמע כקול שופר והשני כקול של כינור. יתכן כי שניהם קול שופר אך הם ניתנים לזיהוי כשונים. כך ניתן להסביר את מה שכתב בעל ירושת הפליטה (לעיל הערה 5) שהקול ששומעים דרך הטלפון דומה לקול השופר, אך הוא איננו זהה לקול השופר המקורי.

18. ההשמעה נעשתה בצורה אקראית, כך שלעיתים אות הכניסה היה האות הראשון ולעיתים אות המוצא היה האות הראשון.

19. הרחבה ביחס לתוצאות הניסויים ניתן למצוא בעבודה המלאה לעיל הערה 5.

"קול הברה". כמו-כן הגורם לקול הברה הוא אות השופר עצמו (ערבוב שלו = התאבכות) ולא קול חיצוני (בניגוד למה שכתב בערוך-השלחן להיזהר לא להשתעל בזמן התקיעות). שיטת הטי"ז שגם בשמיעה מחוץ לבית הכנסת (ריחוק מקום) יש בעיית קול הברה - אינה מתאימה לשיטתנו. לפי תוצאות הניסוי, ההברה נוצרת משינוי ביחסי ההרמוניות (ובעקבות כך שינוי הספקטרום) ולא בשינוי עוצמה.

לרמב"ם ולרש"י לעיתים יוצא ידי חובה ולעיתים לא, ואילו לרא"ש תמיד זהו קול הברה ולא יוצאים ידי חובה. תוצאות הניסוי מסבירות היטב ולמעשה מוכיחות את שיטת הרמב"ם, כיוון שלא תמיד יש הנחתה של תדר הבסיס מחוץ למערה/חדר. רק בחלק מהמקרים (בניסויים שבצענו זה התרחש בכ-30% מהמקרים) נראתה הנחתה של תדר הבסיס, בניגוד לתוך החדר, שם תופעה זו לא התרחשה כלל.

ט. השלכות הניסוי על מערכות מודרניות

על-פי הצעתנו בדבר הגדרת "קול הברה" כהנחתת עד כדי העלמות של תדר הבסיס, ניתן לחזור ולדון במצוות השמיעה במערכות המודרניות. בעיית "קול הברה" קיימת רק כאשר יש שינוי גדול ביחסים בין עוצמות השונות של התדרים באות. ברם, אם יחסי התדרים נשמרים זהים - הגבר או הנחתה (שגם כך יכולים לנבוע ממרחק ממקור הקול) לא משנים את קול השופר. אם האות הנשמע לא משנה את מבנהו ביחס לאות המקור, הרי שמצב זה לא יוגדר כ"קול הברה".

חלק מהפוסקים שדנו באפשרות יציאת ידי חובה באמצעות מכשור אלקטרוני, העלו את הנושא של "קול הברה" (ציץ-אליעזר חלק י סי' מז). ע"פ הקריטריון ניתן כעת לשוב ולבחון את שיטות הפוסקים לגבי מכשור אלקטרוני, והאם הם מתאימים להגדרה המדעית של קול הברה. הרש"ז אורבך סובר שקול הנשמע מרמקול אינו קולו המקורי של התוקע/מדבר, ולכן לא ניתן לצאת ידי חובה בשמיעתו. דין זה אינו נוגע לדיונו בנושא קול הברה.²⁰ הרב פרנק (מקראי-קודש הלכות חנוכה ופורים סי' יא) הבין שכל שינוי מהקול המקורי נחשב קול הברה (אם-כי זה רק בשופר ולא ביתר המצוות). אפשר להבין שלשיטתו כל עוד לא שומעים את האות המקורי, הרי שהדבר נחשב ל"קול הברה" (בדומה לשיטת הרש"ז א שהקול הוא קול הממברנה). אמנם, ניתן להבין שכיוון שהקול ביציאה שונה מהקול המקורי בתכונותיו (לדוגמא: הקריטריון שלנו לגבי הנחתת תדר בסיס) אזי זה נחשב קול הברה. על פי זה ניתן לומר שגם הרב פרנק יודה לקריטריון האמור, ובמכשירים שאינם שומרים על תכונות האות (אולי היו כאלו בימיו) הרי שזהו קול הברה, ובמכשור ששומר על האות הרי זה קול שופר. האגרות-משה (ח"ב או"ח סי' קח) העלה סברא שקול הברה הוא קול לא ברור (ולכן ברמקול מתיר כי הוא חזק וברור). גם סברא זו מתאימה לקריטריון שהצגנו, כיוון ששינוי היחסים בין התדרים השונים גורם לאות להיות פחות ברור ו"חד".²¹ ראינו בניסוי, שכאשר תדר הבסיס מונחת משמעותית, הקול נשמע פחות ברור וצלול, וזהו אם-כן קול הברה.

20. בעניין זה כנראה טעה הרב פרופ' לב (לעיל הערה 4) שחשב כי לא ניתן לצאת ידי חובה שמיעת שופר ברמקול כי הוא גרוע מקול הברה שהוא קול הממברנה ובכך חיזק את דברי הרש"ז א (לעיל הערה 1). ברם דברי הרש"ז א כלל אינם שייכים לקול הברה. הבעיה היא לא חיסרון באיכות הקול הנשמע, אלא כיצד הוא נוצר. לדעת הרש"ז א המרה חשמלית של אות השמע מבטלת את מקורו ולא ניתן להחשיבו כקול יותר. כל דיונו במאמר זה הוא רק לשיטות החולקות על הרש"ז א (החזו"א; הרא"ה קוק; האגרות-משה; מהר"י ענגל; ציץ-אליעזר; מו"ר הרנ"א רבינוביץ ועוד), ולפיכך יש לדון לשיטתם האם יש בעיית קול הברה במכשור שכזה.

21. ראה עוד בדעת הציץ-אליעזר (חלק ח סי' יא) שהקול אינו ברור, אך הוא התלבט לאסור זאת אף בשאר דברים, כגון הוראה של הבעל לגרש אשתו דרך טלפון (ח"י סי' מז). ראה גם שו"ת קול-מבשר ח"ב סי' כה.

הסברו של החזון איש (כפי שהבין הרש"י אוירבך במנחת-שלמה ח"א סי' ט) לקול הברה הוא שיש שיהוי בין האות המקורי לאות הנשמע.²² גם הסבר זה יכול להתאים לקריטריון הנחתת תדר בסיס, כיוון שרק כאשר יש שיהוי בין המקור לבין השמיעה, אזי יכולה להתרחש התאבכות הורסת, ורק אז תיווצר הנחתה לתדר הבסיס. כפי שראינו בניסוי, בשניה הראשונה של ההקלטה מחוץ לתדר, אכן לא התרחשה הנחתה של תדר הבסיס, ורק בחלק היציב (לאחר השניה הראשונה) התדר החל "להיעלם".

לכאורה בימינו, ניתן לבדוק ביחס לכל מכשיר (ובעיקר מכשירי השמיעה השונים) האם הוא משנה את יחסי התדרים והאם קצב הקליטה והשידור שלו גבוהים מהקצב הנדרש על מנת לשמר לחלוטין את האות המקורי. אם כל התנאים מתקיימים אזי אין מניעה לצאת ולהוציא ידי חובה מי שעושה שימוש במכשור זה, מצד "קול הברה". כמו כן, במערכות הטלפוניה הדיגיטאלית של היום, לא שייך פסול "קול הברה".

י. סיכום

1. קול הברה הוא מקרה בו תדר הבסיס של השופר נעלם ונשארות רק ההרמוניות.
 2. קול הברה יכול להיווצר כאשר רמת ההדהוד גבוהה מ-300 מילי שניות.
 3. במערכות של מיקרופון ורמקול הדוגמים בקצב מהיר לא יהיה שינוי מהתדרים המקוריים ששודרו ולפיכך אין בהם קול הברה.
 4. מכשירי שמיעה: יש לבחון כל מכשיר בפני עצמו. יש מכשירים בהם מסננים את התדרים השונים וממילא יתכן ותיווצר בהם קול הברה.
- יה"ר שנוכח במהרה לשמוע את שופרו של המשיח ושיתקיים בנו מקרא כתוב "אז תפקחנה עיני עורים ואזני חרשים תפתחנה" (ישעיהו לה, ה).

יא. הערת-נספח מאת הרב ישראל רוזן

הקונצפציה במאמר זה היא שהמושג 'קול הברה' הוא מדעי וניתן להגדירו במעבדה. תפיסתי ההלכתית העקרונית היא שמושג זה, ומושגים הלכתיים נוספים, נקבעים לפי תפיסת בני אדם 'סבירים' וממוצעים ולא לפי הגדרות מדעיות. ראו נספח שכתבתי למאמרו של הרב הלל מרצבך "האם מותר להרוג כינים בשבת?", תחומין לד עמ' 38. הדיון שם הוא סביב אלמנטים זעירים אשר חוש הראיה האנושי איננו מבחין בהם. במאמר זה הדיון הוא סביב חוש השמיעה, וגם בסוגיא זו עמדתי זהה, לפיה התפיסה האנושית האלמנטרית היא הקובעת. ואכן, בהחלט יתכן שפלוגי יטען שהוא שומע קול שופר צלול וחברו יטען כי הקול הוא קול הברה או קול מעורב.

אי יכולת להגדיר מדעית 'קול הלכתי' עולה מדין "תרי קלי לא משתמע" (רש"י ר"ה לד, ב, ונפסק ברמ"א או"ח רפד, ה). ואם ניתן לאשש מדעית קביעה זו, הנה בסוגית קול שופר נאמר (ר"ה כז, א) "תרת קלי מחד גברא לא משתמע" מתרי גברי משתמע... [ואם] חביבא ליה יהיב דעתיה ושמע".... האם ניתן להגדיר מדעית אבחנה בין שמיעת 'תרי קלי מתרי גברי' או 'מ'חד גברא', ובעיקר את המשמעות האקוסטית של 'חביבא ליה'?

22. ראה גם את דעת הראי"ה קוק (אורח-משפט סי' מח) שאומר שניתן לצאת ידי חובה (לכל הפחות בקדושה ובתפילה) באמצעות טלפון/רדיו. לדבריו, "כל שהוא שומע העניין - אין קפידא", כיוון שבפועל הקול משתמר, לא מפריעה העובדה שהקול איננו הקול המקורי. כך גם דעת מהר"י עגל בגליוני-הש"ס על ברכות כה, ב.

גם מהגמ' (גיטין כג, א) "היאך סומא מותר באשתו? בטביעות עינא דקלא" נראה בבירור כי שמיעת קול היא סובייקטיבית לחלוטין, גם לענין הלכתי חמור, ודון מינה.²³

²³ הכותבים אינם מבינים מה מטרת הערה זו: וכי הרב ישראל רוזן כופר בעובדה שדברי חז"ל נאמרו על בסיס מציאות? האומנם אמרה המשנה קול הברה והתכוונה לשמיעה סובייקטיבית בלבד ולא לתופעה שגם הם הכירו?

כותבי המאמר הדגישו כי מדובר בכלי עזר להבנת חז"ל וכי הדברים נבדקו גם בצורה סובייקטיבית על ידי מאזינים שונים.

ברם בכל מקרה ההערה הזו תמוהה: לכאורה אם קולה הברה זה רק סובייקטיבי- מה המקום לשיטת הרא"ש שתמיד מחוץ למערה יש קול הברה? ואולי יש אדם שיצליח לשמוע קול שופר גם מחוץ למערה? יתרה מכך- הפוסקים שאסרו שימוש ברמקול משום קול הברה לכאורה היו צריכים לשיטת הרב רוזן לבחון מה כל מאזין שומע ולפסול שימוש ברמקול רק עבור אנשים ששומעים קול הברה לשיטתם. כיצד יתכן שלא מצאנו אף פוסק (כולל הרב רוזן במאמרו שהבאנו בהערה 1) שמציע זאת? בנוסף, כפי שהראנו במאמר, גם הקול הברה נשמע כמו קול שופר צלול- רק שהקול שונה מהקול המקורי אם כך סובייקטיביות זה לא הנושא.