

יורה מדע

גיליון חודשי להלכה, מדע וטכנולוגיה

גיליון 15 – אלול תשפ"ב

הצבעים בהלכה (א)

הקדמה

הצבעים ותכונותיהם העסיקו ומעסיקים את רוב ככל יושבי תבל, ברמה זו או אחרת. בעולם המדע ובתעשייה, מושקע מאמץ רב במחקר ופיתוח בנושא הצבעים ובנושאים הנוגעים להם, אך כמעט כל אחד מאיתנו משקיע מדי פעם מחשבה בדברים הנוגעים לצבע.

גם בעולם ההלכה – הלכות רבות נוגעות בצבע של דברים שונים. בפרשת נגעי הצרעת אנו פוגשים הלכות רבות התלויות בצבע הכתם שעל העור, הבגד או הבית, וגם בצבע השערות שבתוך נגע העור או צבע הבגד שעליו מופיע נגע¹. אך בנוסף לדיני נגעים, שבהם נושא הצבע מופיע בצורה די מפורטת כבר בתורה שבכתב, ישנן הלכות רבות התלויות או לפחות קשורות לצבע. ביניהן: ציצית, סת"ם, קידוש, ארבעת המינים, טריפות, טהרת המשפחה, מקוואות, מילה ובגדי כהונה.

בגלל שנושא הצבעים הוא נושא גדול, אפשר לומר שנספיק לקבל רק טעימה ממנו במסגרת הגיליונות. בגיליון זה, בהסבר המדעי נכיר מושגים בסיסיים בנושא הצבעים, נראה הסבר לתופעת הקשת בענן ונלמד על צבע השמים וצבע השמש בשקיעתה ובזריחתה. בדיון ההלכתי נדון בזמן קריאת שמע של שחרית, במשמעות של אות הקשת ובברכה על ראיית הקשת.

הסבר מדעי

גלי אור והמושג 'אורך גל'

גלי האור הם חלק מ'משפחה' גדולה של גלים אלקטרומגנטיים, שמורכבים משדה מגנטי ושדה חשמלי שמשתנים בתדירות מסוימת. נפגשנו איתם בגיליון 6, והכרנו חלק מתכונותיהם. בגיליון זה, נשוב לדבר על 'אורך הגל' של אותם גלים – תכונה שתעסיק אותנו לא מעט בהקשר של הצבע.

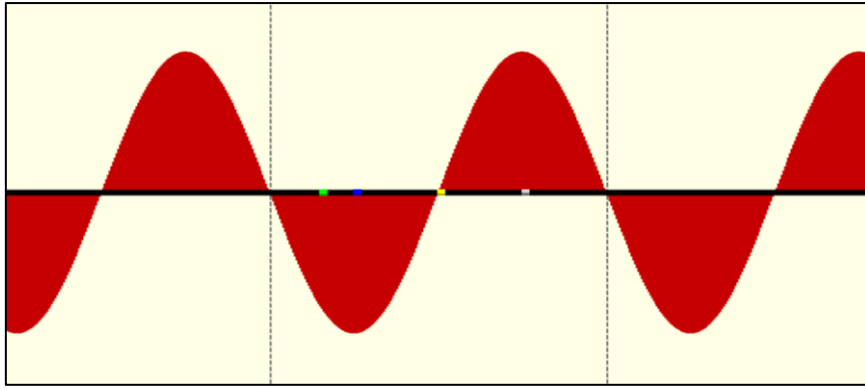
כדי לפשט את המושג, נדמיין שהצלחנו לגרום לגל אלקטרומגנטי שמתקדם בתוך וואקום² לעצור לזמן מה, ולא להתקדם במהירותו העצומה – הלא היא 'מהירות האור'. כשהגל עוצר, נוכל לראות שיש בכל נקודה לאורך כיוון ההתקדמות של הגל שדות חשמליים ומגנטיים שונים. לא מדובר על מציאויות חומריות, אלא על כוחות פיזיקליים השוררים בנקודות אלו. ערכי עוצמת השדה בנקודות שלאורך כיוון התקדמות הגל, משתנים בצורה מחזורית, כשהמרחק בין תחילת מחזור השתנות לסופו (שהוא גם תחילת המחזור הבא), הוא 'אורך הגל' של אותו גל.

המחשה של הרעיון שתיארנו, מופיעה בתרשים הבא³:

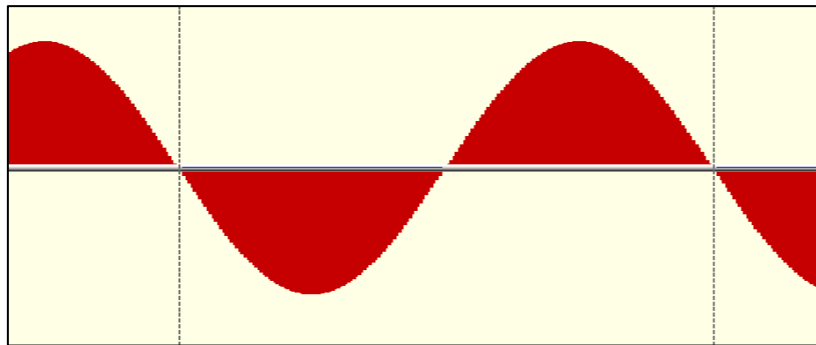
¹ צבע הבגד אינו מוזכר בתורה שבכתב בפירושו, אלא נלמד מהיקש. ראה דברי הרמב"ם (הלכות טומאת צרעת, פרק יב, הלכה ז') והכסף משנה (שם).

² נדבר כאן על וואקום, כדי שלא נצטרך להיכנס לדיוקים מורכבים הנוגעים למעבר של גלים אלקטרומגנטיים דרך חומרים שונים. אור די דומה לוואקום מהבחינה הזו, אך לא בצורה מושלמת.

³ שנבנה באמצעות התוכנה Open SCAD.



הגל מתקדם מימין לשמאל דרך מרכז התרשים, כשבכל נקודה בו, עוצמת וכיוון השדה החשמלי⁴ מסומנים באדום. יש להדגיש, שהסימונים האדומים אינם באים לסמל דבר מה שתופס מקום, אלא אך ורק את עוצמת השדה החשמלי בכל נקודה על פני ציר ההתקדמות של הגל. לדוגמה: בנקודה האפורה – שורר שדה חשמלי חזק בכיוון מעלה, בנקודה הכחולה – שורר שדה חשמלי חזק בכיוון מטה, בנקודה הירוקה – שורר שדה חשמלי בינוני כלפי מטה ובנקודה הצהובה – לא שורר כלל שדה חשמלי. הקווים השחורים המקווקווים מגבילים מחזור שלם של השתנות עוצמת שדה, מתוך מחזורים רבים שיש בגל, והמרחק בין קוים אלו הוא אורך הגל. לשם השוואה, אורך הגל של הגל המופיע בתרשים הבא הוא גדול יותר, כי מחזור בודד נמתח על פני מרחק גדול יותר:



גלי האור, הם גלים אלקטרומגנטיים שהעיניים שלנו רגישות להם, ומסוגלות לתרגמן באמצעות המוח להרגשה בעלת משמעות חזותית. מדובר פחות או יותר על גלים בעלי אורך גל שבין 400 ל-700 ננומטר (ננומטר=מיליארדית המטר, כלומר מטר חלקי מיליארד). גלי האור הסגולים הם בעלי אורך גל בסביבות ה-400 ננומטר, והאדומים הם בעלי אורך גל בסביבות ה-700 ננומטר. בין שתי הקצוות האלה נמצאים כל הצבעים הנראים בתופעת הקשת בענן⁵. מעבר לטווח זה, נמצאים העל-סגול (Ultra-Violet) והתת-אדום (Infra-Red), שאיננו יכולים לראות בעין. הצבעים המופיעים בקשת – שכל אחד בהם נוצר על ידי גל בודד, או קבוצת גלים בעלי אורך גל שווה, הם רק חלק קטן מהצבעים שהמוח שלנו מכיר. רוב הצבעים מורכבים משילוב של גלים בעלי אורכי גל שונים. על כך נדבר בעזרת ה' בגיליון הבא.

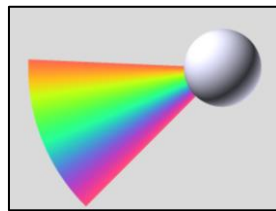
הקשת בענן

כאשר גלי אור עוברים אחד לחומר אחר הם 'נשברים', כלומר סוטים מכיוון ההתקדמות המקורי שלהם לכיוון אחר. אפשר לראות ביטוי של התופעה הזו, כאשר ממלאים כוס שקופה עד חציה במים, ומכניסים לתוך המים כפית. בהסתכלות על הכפית, ייראה שינוי בין החלק שמחוץ למים לבין החלק שבתוך

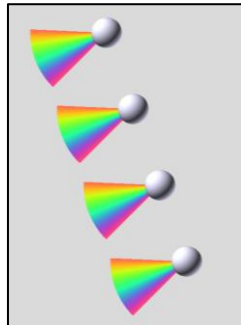
⁴ כדי שלא לסבך, לא הוצג כאן גם השדה המגנטי. הסבר מלא יותר קיים בגיליון 6.

⁵ בתנ"ך נזכרת תמיד הקשת כ'קשת בענן'. למעשה אין צורך דווקא בענן, אלא מספיקה כל התקבצות של טיפות רבות של מים מכל צורה שתהיה. ברמה העקרונית, גם באמצעות טיפות זעירות של חומרים אחרים, כגון אתנול (האלכוהול המצוי במשקאות חריפים), אפשר ליצור קשת, אך תכונותיה תהיינה מעט שונות מהקשת הרגילה.

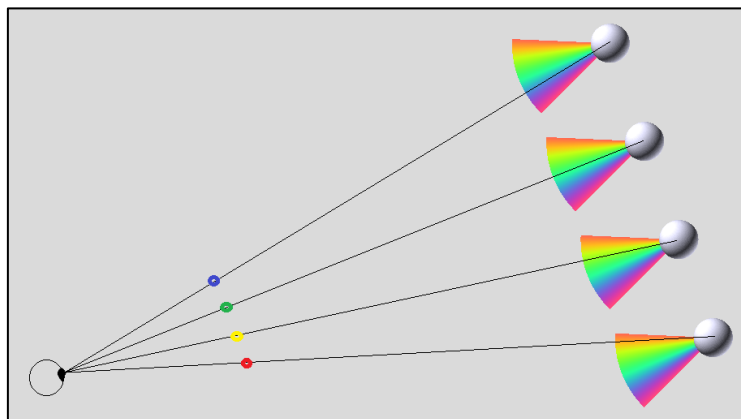
המים. שינוי זה נובע מה'שבירה' שעוברים גלי האור ביציאתם מהמים אל האויר, בדרך לעין שלנו. השינוי בכיוון גל האור תלוי ב'אורך הגל' של הגל שעובר שבירה, וזה מאפשר את תופעת הקשת, כפי שנראה. תופעת הקשת, שבה נפרשים לעינינו צבעים רבים לפי הסדר, נובעת מאותו שינוי בזווית השבירה בין הגלים השונים. כפי שהזכרנו, גלי האור בעלי אורכי הגל השונים מתורגמים במוח כצבעים שונים, כשלכל אורך גל יש את הצבע שלו. השמש שולחת גלים רבים בטווח גדול של אורכי גל. בצורה פשוטה, אפשר לומר שאור השמש כולל את כל צבעי הקשת, אבל בגלל שהם נשלחים ביחד, העין לא מבחינה בצבעים השונים. כל גל כזה 'נשבר' בזווית אחרת – בהתאם לאורך הגל שלו, ומגיע לעין מכיוון קצת שונה. כך נפרשים לפנינו כל אורכי הגל שענינו מסוגלת לקלוט בתור צבעים שונים, כשהם מסודרים לפי אורך הגל שלהם⁶. נפרט מעט את התהליך. בתחילה נתייחס לטיפת מים זעירה, שבה פוגע אור השמש. האור נכנס לתוכה ועובר שלוש תופעות: שבירה, נפיצה והחזרה פנימית. לא נבאר את המסלול הזה, כדי לא לסבך, אלא נתייחס לתוצאה הסופית: הטיפה מחזירה את אור השמש כשהוא ממוין בכיוונים שונים לפי אורך הגל. המחשה של תוצאה זו מופיעה בתרשים הבא⁷:



כאשר יש כמות עצומה של טיפות באויר, בכולן מתרחש אותו תהליך, כמעט בהתאמה מושלמת, משום שאור השמש, המגיע ממרחק, פוגע בכולן בזווית כמעט אחידה. המחשה חלקית של מה שקורה מופיעה בתרשים הבא, ובו מיוצגות ארבע טיפות מתוך כל הכמות העצומה של טיפות באויר:



כאשר הצופה מסתכל אל השמים, לכיוון האזור שבו מרוכזות טיפות המים, הוא מסתכל על כל טיפה בזווית שונה, וממילא מקבל מכל טיפה גלי אור בצבע אחר. המחשה של הרעיון מופיעה בתרשים הבא:

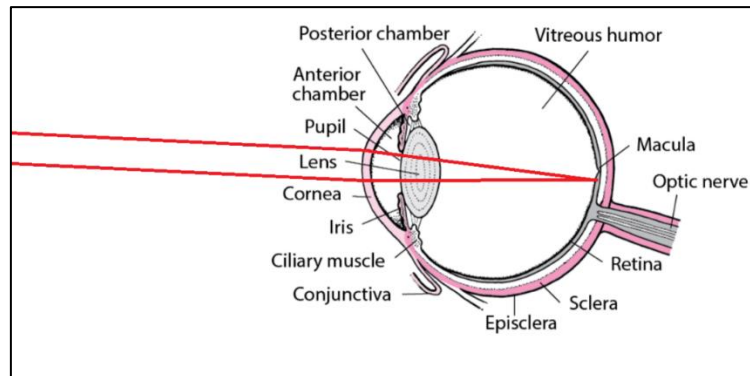


⁶ גם אור הירח, המחזיר אלינו אור שמש שפוגע בו, יכול ליצור קשת בתנאים מסוימים, אך הדבר נדיר יותר מאשר בשעות היום. התייחסות הלכתית לאפשרות זו, מופיעה בספר חזון עובדיה (טו בשבט וברכות, עמ' תעא-תעב).
⁷ שנבנה גם הוא באמצעות התוכנה Open SCAD.

על כל קו בין העין לטיפה מצוין עיגול בעל צבע דומה לצבע שמקבלת העין מכיוונה של אותה טיפה – בהתאם לאורך הגל הספציפי שהטיפה מחזירה לכיוון העין באותה זווית. בגלל שהאדם מסתכל בפועל על כמות עצומה של טיפות, ולא על ארבע בלבד, כפי שמופיע בתרשים, הוא יראה את כל אורכי הגל ולא רק ארבעה צבעים בודדים. הסבר זה מבאר מדוע הקשת מחולקת לגווניים שונים ורבים, הממוקמים זה לצד זה. הקשת תיראה דווקא בזווית מסוימת, ודווקא בצורת חצי עיגול, אך לא נסביר במסגרת זו את הסיבה לכך, כי ההסבר קצת מורכב⁸.

תרגום גלי האור לצבע על ידי העין והמוח

הרשתית של העין האנושית, נמצאת בחלק הפנימי של גלגל העין, ודבוקה לחלקו האחורי – שנמצא בצד הנגדי לאישון. עליה מתרכזים גלי האור מהסביבה, באמצעות העדשה והקרנית, הנמצאות סמוך לאישון. תיאור כללי של גלי אור מכיוון מסוים המתרכזים על נקודה ברשתית, מופיע באיור הבא⁹:



הקנים האדומים מסמלים את קרני האור שרוכזו על הנקודה ברשתית. הקרניים מכל כיוון מתרכזות על נקודה אחרת ברשתית, וכך מקבלת העין מידע על האור המגיע מכיוונים שונים בסביבה. ברשתית ישנם שני סוגי חיישנים ('פוטו-רצפטורים'):

- קנים (rods) – הרגישים מאד לאור, אך לא מבדילים בין אורכי גל שונים.
 - מדוכים¹⁰ (cones) – בעלי רגישות נמוכה יותר, אך יכולת הבדלה בין אורכי גל, המאפשרת הבדלה בין צבעים.
- בתנאי תאורה גרועים, רק הקנים מסוגלים להעביר למוח מידע על האור בסביבה, ולכן יש קושי בהבחנה בין צבעים בתנאים כאלה. בעין האנושית ישנם שלשה סוגי מדוכים:

- סוג L – הרגיש בעיקר לגלי אור בתחום גלי האור הארוכים (Long), כלומר: צבעים באזור האדום.
- סוג M – הרגיש בעיקר לגלי אור בתחום גלי האור הבינוניים (Medium), כלומר: צבעים באזור הירוק.
- סוג S – הרגיש בעיקר לגלי אור בתחום גלי האור הקצרים (Short), כלומר: צבעים באזור הכחול-סגול.

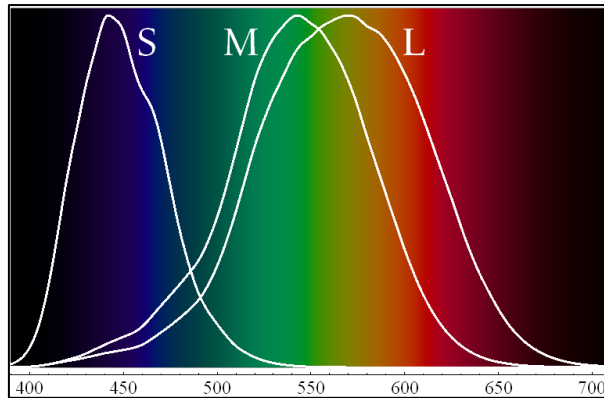
כשני שליש מהמדוכים בעין הם מסוג L, כשליש מסוג M ורק אחוזים בודדים מסוג S. בעקבות התפלגות זו, ראיית העין את צבע האדום היא בעלת רזולוציה גבוהה יותר מראיית הכחול. בגרף הבא¹¹ מתוארת רגישותו של כל אחד מסוגי המדוכים לאורכי גל שונים (המספרים בתחתית הגרף הם אורכי גל, הנתונים ביחידת הננומטר, והצבעים בגרף הם הצבעים התואמים לכל אחד מאורכי הגל):

⁸ בויקיפדיה באנגלית, ערך 'Rainbow', קיים הסבר די מפורט.

⁹ מתוך: <https://www.msmanuals.com/home/eye-disorders/biology-of-the-eyes/structure-and-function-of-the-eyes> בשינוי קל.

¹⁰ או 'חרוטים'.

¹¹ הלקוח מאתר ויקיפדיה, ערך 'מדוך'.



נסביר את התקשורת בין החיישנים הללו למוח, בעזרת דוגמה: כאשר מגיע לנקודה מסוימת ברשתית אור בעל אורך גל 600 ננומטר, מדוכים מסוג S אינם מייצרים גירוי כלל, מדוכים מסוג M מייצרים גירוי בינוני ומדוכים מסוג L מייצרים גירוי חזק. כשהמוח מקבל שלוש רמות גירוי כאלה, הוא מתרגם אותם למשהו באזור הכתום-אדום. בדומה לזה, כל אורך גל מייצר שלישיית ערכים של גירוי האופיינית רק לו. אין שני אורכי גל שהם בעלי אותה סדרה של שלוש רמות גירוי לשלושת סוגי המדוכים.

פיזור ריילי

אחת התופעות הנפוצות בגלי אור היא 'פיזור'. משמעות התופעה היא שגלי אור משנים את הכיוון הראשוני שלהם לכיוונים אקראיים בעקבות פגיעה בחומר כלשהו. זאת בשונה מהשבירה שאותה פגשנו, ובה שינוי הכיוון תלוי בגורמים ידועים מראש פחות או יותר, ומתרחש בצורה די אחידה. ישנם כמה אופנים של פיזור, ולכל אחד התכונות המיוחדות שלו. אחד מהפיזורים הנפוצים, הוא 'פיזור ריילי', שנגרם מחלקיקים מאד קטנים (המצויים בין השאר באטמוספירת כדור הארץ), ונקרא על שם המדען ג'ון ויליאם סטראט ריילי, שגילה אותו. בפיזור ספציפי זה, גלים קצרים (בעלי אורך גל קצר) מתפזרים הרבה יותר חזק מגלים ארוכים.

פיזור זה הוא ה'אחראי' לצבע הכחול של השמים, בכל כיוון שאינו לכיוון השמש. גלי האור המגיעים אלינו ממרחבי השמים שלא מכיוון השמש, מגיעים אלינו בעקבות פיזור של אור השמש לכיוונים שונים, על ידי חלקיקים המצויים באטמוספירה של כדור הארץ. בגלל שגלי האור הקצרים מתפזרים באטמוספירת כדור הארץ יותר טוב, מגיעים לעינינו יותר גלים כאלה, שצבעם נוטה לכחול, וכך השמים נראים כחולים. זאת בשונה ממי שנמצא בירח לדוגמה, שכל השמים מעליו חשוכים, ואור מגיע אליו רק מכיוון השמש. פיזור זה הוא גם ה'אחראי' לצבע האדום של השמש בשקיעה. כשהשמש שוקעת, האור שמגיע ממנה בקווים ישרים לעינינו, כלומר האור שבא מהכיוון שבו השמש נראית, עובר נתח גדול של האטמוספירה, ובדרך הזו הוא מתפזר ב'פיזור ריילי'. בגלל שהפיזור של גלי האור הקצרים – הנוטים לכחול, הוא החזק ביותר, נשאר בעיקר צבע של גלים קצרים – הנוטים לאדום. והוא בעיקר מגיע לעינינו בקווים ישרים מכיוון השמש. בכתובת ההסבר המודעי נעזרתי בין השאר באתר ויקיפדיה (בעברית ובאנגלית) ובספר 'לטעום מהשמים' של ד"ר ברוך סטרמן.

דיון הלכתי

זמן ציצית, תפילין וקריאת שמע של שחרית

בשלחן ערוך בהלכות ציצית (או"ח, סימן יח, סעפים א ג) מופיע שמצוות ציצית נוהגת רק ביום, משום שכתוב בפרשת ציצית "וראיתם אותנו", ובחשכת הלילה אין אפשרות לראות. הזמן שמוגדר לעניין זה כיום הוא משעה שיכול להבחין בין חוטי התכלת לחוטי הלבן של הציצית. הגדרה זו – "משיכיר בין תכלת ללבן"

מופיעה גם בהקשר של זמן תפילין וזמן קריאת שמע¹². כפי שהוסבר בהסבר המדעי לעיל, הקנים – שהם החיישנים הרגישים מאוד לאור, אך לא מבדילים בין הצבעים השונים, מצליחים לזהות חפצים גם באור קלוש. אך כדי להבחין בגווניו, יש צורך באור מספיק חזק, שיגרה גם את המדוכים – החיישנים המבדילים בין צבעים שונים, אך רגישים פחות לאור.

הקשת בענן בתור אות ברית

לאחר המבול, הקב"ה כורת ברית בינו לבין כל באי עולם, על כך שלא יביא עוד מבול על הארץ. בתור אות לאותה ברית נותן הקב"ה את הקשת, כפי שמתואר בפרשת נח (בראשית, פרק ט, פסוקים יב-טו):

וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים זֶאת אוֹת הַבְּרִית אֲשֶׁר אֲנִי נֹתֵן בֵּינִי וּבֵינֵיכֶם וּבֵין כָּל נֶפֶשׁ חַיָּה אֲשֶׁר אִתְּכֶם לְדֹרֹת עוֹלָם: אֶת קַשְׁתִּי נִתְּתִי בְּעָנָן וְהִיְתָה לְאוֹת בְּרִית בֵּינִי וּבֵין הָאָרֶץ: וְהָיָה בְּעָנְנִי עָנָן עַל הָאָרֶץ וְנִרְאָתָה הַקַּשְׁתִּי בְּעָנָן: וְזָכַרְתִּי אֶת בְּרִיתִי אֲשֶׁר בֵּינִי וּבֵינֵיכֶם וּבֵין כָּל נֶפֶשׁ חַיָּה בְּכָל בְּשָׂר וְלֹא יְהִי עוֹד הַמַּיִם לְמַבּוּל לְשַׁחַת כָּל בָּשָׂר:

נתינת הקשת בתור אות לברית מעלה שאלה: האם תופעת הקשת לא הייתה קיימת עוד לפני המבול? הרי, כפי שלמדנו בהסבר המדעי, תופעה זו תלויה בתכונות פיזיקליות של האור והמים, שלכאורה היו אותו האור ואותם המים עוד לפני המבול? שאלה זו מתחזקת בעקבות דברי המשנה במסכת אבות (פרק ה, משנה ו) האומרת שהקשת נבראה (עם עוד כמה דברים) בערב שבת בין השמשות¹³.

מפרשים שונים, וביניהם רבי אברהם אבן עזרא (בראשית, פרק ט, פסוק יד) הסבירו שלאחר המבול היה שינוי מסוים בטבע שאיפשר את היווצרות הקשת. בגלל שהקשת תלויה בכמה תכונות פיזיקליות של האור ושל החומר, וכן בתכונות פיזיולוגיות של הראייה, אפשר לומר שכולן חוץ מאחת כבר היו מותאמים לתופעת הקשת בענן (ואולי זה מה שקרה בבין השמשות של ערב שבת הבריאה), ומה שקרה אחר המבול הוא שגם התכונה האחרונה הותאמה ליצירת התופעה, או לאפשרות של האדם לראותה.

לדעת הרשב"ץ, בספר מגן אבות (על המשנה באבות, פרק ה, משנה ו, שנזכרה לעיל), תופעת הקשת היא טבעית ותכונתה טבעית בבריאה מבין השמשות של סוף ימי הבריאה. עם זאת, הקב"ה מביא ענן שתכונותיו מתאימות ליצירת קשת, דווקא בזמנים שמתאים לציין את האות על הברית שכרת עם העולם על אי-הבאת מבול נוסף¹⁴.

ברכת ראיית הקשת

בגמרא במסכת ברכות (דף נט, ע"א) מופיע שיש לברך על ראיית הקשת ברכה, המזכירה את שבחו של הקב"ה, שכרת ברית על אי-הבאת מבול נוסף ומקיים ברית זו. הגמרא דנה בנוסח הברכה שיש לברך, והדיון על הנוסח ממשך לימי הראשונים והאחרונים. בשלחן ערוך (או"ח, סימן רכט, סעיף א) מופיע הנוסח "ברוך אתה ה' אלהינו מלך העולם זוכר הברית נאמן בבריתו וקיים במאמרו". זה הנוסח שהתקבל בעם ישראל, אך קיימת מחלוקת האם יש להוסיף את האות ו לפני המילה "נאמן". בדבר זה כל אחד יעשה כמנהגו.

בגמרא במסכת כתובות (דף עז, ע"ב) נראה שהקשת שנראית מסמלת דבר שלילי – היא אומרת שמצד מעשי בני האדם, היה ראוי לבוא כעת מבול, והוא לא מגיע רק בגלל שכרת ה' ברית שלא יבוא מבול. כך נראה ממקומות נוספים בדברי חז"ל, שבהם מצוין כשבח לצדיקים שונים, העובדה שלא נראתה הקשת בימיהם¹⁵. בעקבות כך, כתבו המשנה ברורה (סימן רכט, ס"ק א) וכף החיים (סימן רכט, ס"ק א) בשם החיי אדם,

¹² להרחבה, ראה: שלחן ערוך (או"ח, סימן נח, סעיף א; שם, סימן ל, סעיף א), משנה ברורה (סימן יח, ס"ק וסימן נח, ס"ק ב) וכף החיים (או"ח, סימן ל, ס"ק ב).

¹³ אם נרצה להעמיס בדברי המשנה פירוש מעט מחודש, על דרך הרמז, יהיה אפשר לומר כך: תופעת הקשת, כפי שלמדנו, תלויה בתופעות הישגיות, הינפציה וה'החזרה הפנימית'. אלו תופעות שקשורות לפגיעת קרן האור בגבול שבין שני חומרים שונים (במקרה שלנו – הגבול בין טיפת המים לאויר שמסביב לה). ערב שבת בין השמשות הוא בדיוק זמן המעבר בין הקודש לחול, ולכן מתאים שדווקא אז הקשת תברא.

מצד שני, בין השמשות הוא זמן שמוגדר כ'ספק יום ספק לילה', ולא ידוע מתי בדיוק עובר הגבול בתוכו בין היום ללילה. דבר זה מתאים לקשת, שבה מופיעים כל אורכי הגל של האור הנראה בצורה רציפה, כאשר אין גבול ברור למעבר בין אזור שמוגדר כצבע מסוים, לבין אזור שכבר יוגדר כצבע הבא בתור. לדוגמה: יש בקשת אזור צהוב, ולידו אזור ירוק, אך אין שכבת צבע מדויקת שבה הירוק נגמר וממנה מתחיל הצהוב.

¹⁴ התייחסויות נוספות לשאלה זו מופיעות בפירוש רמב"ן על התורה (בראשית, פרק ט, פסוק יב) ובספר שני לוחות הברית (תורה שבכתב, פרשת נח, אור תורה, בהגהה).

¹⁵ ועיין במהרש"א (חגיגה, דף יד, ע"ב).

