

מירי צלוק  
ייעוץ אקולוגי-סביבתי; ארגון TIME

אורי שיינס  
החוג לביולוגיה וסביבה, אוניברסיטת חיפה-אורנים

## על הקשר בין הרס הטבע והתפרצות מגפות זואונוטיות

11 יוני, 2020

גיליון אביב 2020 / כרך 11(1) / קורונה וסביבה

סקירות

### תקציר

בארבעים השנה האחרונות ישנה עלייה דרמטית במגפות זואונוטיות חדשות, כמו מגפת הקורונה COVID-19. מחלות זואונוטיות מתפתחות אצל בעלי חיים וזולגות לבני האדם. בד בבד, האנושות גורמת להכחדת המגוון הביולוגי על פני כדור הארץ בקצב הרסני. קיים קשר בין הפגיעה בטבע ובמערכות האקולוגיות לבין האבולוציה של מחלות זואונוטיות, ההתפשטות שלהן והזליגה שלהן לאדם.

מגוון ביולוגי עשיר נמצא קשור לשכיחות נמוכה יותר של מחלות זואונוטיות בתופעה המכונה אפקט הדילול, וכן ידוע כי גורמים הפוגעים במגוון הביולוגי מגבירים זליגת מחלות לאדם. הרס בתי גידול יוצר קיטוע ונקודות מגע רבות יותר בין ריכוזי האדם לשטחי טבע (אפקט שוליים) ולבעלי חיים המאכסנים פתוגנים. כמו כן, בבתי גידול מופרים מתפשטים מינים כוללניים (generalist species) המאכסנים פתוגנים ומעבירים אותם ביעילות מוגברת. נוסף על כך, בשטחים מקוטעים נוצרת אבולוציה מזוהת בין גניפים ומינים מאכסנים, המגבירה את הסיכוי להיווצרות גניף פתוגני. ציד וסחר בחיות בר מגבירים את הסיכוי להתפרצויות מגפות חדשות, כמו שככל הנראה קרה עם גניף הקורונה, דרך מגע ואכילה של דם ואיברים פנימיים.

שינוי האקלים צפוי להגביר התפשטות של מחלות זואונוטיות. עליית הטמפרטורה הממוצעת מאפשרת את התרחבות התפוצה וגידול האוכלוסייה של וקטורים למחלות מאזורים טרופיים לכיוון ריכוזי אוכלוסייה בחצי כדור הארץ הצפוני.

הטבע הוא בעל ערך רב פשוט מעצם קיומו, ומשבר הקורונה צריך להוביל להבנה שמניעת הפגיעה בטבע ובחיות הבר חיונית להישרדות האדם. הבנת התפקיד של מערכות אקולוגיות בריאות בהגנה מפני מגפות צריכה להתבטא בכך ששמירת טבע תהפוך ליעד מרכזי בסדר העדיפויות העולמי והלאומי.

### מבוא

מגפת הקורונה הנוכחית COVID-19 גרמה למיליוני חולים ברחבי העולם ולמאות אלפי מקרי מוות, עם השלכות כלכליות וחברתיות מרחיקות לכת<sup>[34]</sup>. הקורונה היא מחלה זואונוטית חדשה ומקורה ככל הנראה בעטלפים. בארבעים השנים האחרונות ישנה עלייה משמעותית בהתפרצות מחלות זואונוטיות חדשות, כמו מגפת הקורונה, המתפתחות אצל בעלי חיים וזולגות לבני אדם. כ-72% מהפתוגנים החדשים שנמצאו בעשורים האחרונים מקורם בחיות בר<sup>[29,16]</sup>. מחלות זואונוטיות חדשות (emerging zoonotic disease) הן איום גובר על בריאות האנושות, כיוון שההשפעות שלהן לא ידועות, אין חיסון ואין תרופה בנמצא<sup>[16]</sup>. במקביל לעלייה בהתפרצות המחלות הללו ישנה עלייה בהרס המערכות האקולוגיות ובהכחדה המונית של מינים<sup>[5]</sup>. קיימים מנגנונים רבים הקושרים את הפגיעה האנתרופוגנית במגוון הביולוגי להתפרצות מחלות זואונוטיות<sup>[35]</sup>. מאמר זה יסקור את הקשר בין מגוון ביולוגי לבין התפרצות מגפות זואונוטיות, וכן יבחן שלושה גורמים מובילים לאובדן מגוון ביולוגי – הרס בתי גידול, סחר בחיות בר ושינוי האקלים – ואת הקשר ביניהם לבין מגפות, בדגש על

בני אדם היו קורבן למחלות מידבקות משחר האנושות. עם זאת, הרבה מהמחלות המידבקות העיקריות שמשכנות חיים התבססו רק אחרי תחילת העידן החקלאי, כשנוצרו מצבורי אוכלוסייה גדולים מספיק לתחזק את הפתוגן [35]. מגע מוגבר של האדם עם בעלי חיים מגביר סיכויי זליגה של מחלות זואוונטיות חדשות לאדם. בעידן המודרני בעקבות צפיפות האוכלוסייה, מעבר הולך וגדל לערים והתנועה הגלובלית התכופה של אנשים וסחורות גובר הסיכוי שפתוגן שהועבר לאדם יתבסס באוכלוסייה ויגרום להתפרצות מגפה [35, 10].

מגפת הקורונה הנוכחית COVID-19 נגרמת מנגיף בשם SARS-COV-2. בעוד שמקור הנגיף והסיבות להתפרצותו לא ידועות לאשורן, הסברה המדעית הרווחת היא שמדובר בנגיף זואוונטי ומקורו בשוק חיות בר [13]. נגיף הסארס גרם למגפה ב-2003 עם 10% תמותה מקרב הנדבקים ברחבי העולם. ככל הנראה, גם אז המקור היה שוק חיות בר בסין, ואזהרות רבות התרעו על התפרצויות חוזרות של מגפות משווקים אלה [7, 6]. מגפת ה-MERS, ממשפחת הקורונה אף היא, הייתה קטלנית עוד יותר, עם כ-30% תמותה מקרב הנדבקים. מקורה כנראה בגמלים בקטאר, אך גם לנגיף זה יש מקור אבולוציוני בעטלפים [3].

## הכחדה ופגיעה במגוון ביולוגי

האנושות גורמת להכחדה נרחבת של מיני צמחים ובעלי חיים בקצב גבוה פי 100–1,000 מקצב ההכחדה ב-10 מיליון שנה האחרונות. ההערכה היא שכמיליון (!) מינים נמצאים בסכנת הכחדה, ושהאדם מניע את ההכחדה ההמונית השישית בהיסטוריה של כדור הארץ [5].

במערכות אקולוגיות רבות הוכח קשר בין מגוון ביולוגי גבוה לבין הקטנת הסיכון שמחלות זואוונטיות יעברו לבני אדם, בתופעה המכונה אפקט הדילול [6] (dilution effect). בחברות אקולוגיות עם מגוון חיות בר גדול יותר נצפתה ירידה במגוון הפתוגנים, כולל נגיפים, חיידקים וטפילים רב-תאיים; קשר זה נשמר בסוגי מערכות אקולוגיות ובקבוצות בעלי חיים שונות [8]. לעיתים מתקיים הקשר ההפוך, כך שמגוון חיות בר גדול תורם למגוון גבוה יותר של מאכסנים פוטנציאליים לפתוגנים במערכת האקולוגית, כלומר למינים המשמרים את הפתוגן באוכלוסייה שלהם לאורך זמן ושהם מקור להדבקה למינים אחרים ולאדם. עם זאת, השינוי בהרכב חברות אקולוגיות עקב פעילות האדם אינו אקראי, ולרוב מביא להתגברות מינים מעבירי פתוגנים [25]. כמה מנגנונים יכולים להסביר את אפקט הדילול. ראשית, לקבוצות טקסונומיות מסוימות, כגון עטלפים, מכרסמים ומינים הקרובים לאדם פילוגנטית כדוגמת פרימטים, פוטנציאל גבוה יותר מאחרות לשמש מינים מאכסנים למחלות זואוונטיות [24]. לפיכך, בחברות עשירות במגוון מינים, השכיחות של מינים מאכסנים קטנה יחסית בהרכב החברה האקולוגית, כך שהסיכוי שפתוגן ידביק מין המתאים לשמש מאכסן למחלה זואוונטית – יורד. במחלות המועברות בידי מיני וקטורים, כגון יתושים או קרציות, יורד הסיכוי שהווקטור ייקח מנת דם ממין שיש בו פרטים נגועים [25].

הסבר נוסף לאפקט הדילול הוא שבחברות עם מגוון ביולוגי נמוך יותר נפגע המארג האקולוגי, כך שמתקיימים פחות מינים מתחרים ופחות טורפים, ומתאפשרת ההתפשטות של מינים כוללניים (generalist species) מינים אלה מותאמים למגוון רחב של בתי גידול ומקורות מזון, וחלק מהם הופך למותאם לסביבת האדם [9]. מינים כוללניים נושאים לרוב יותר פתוגנים וחודרים לסביבות האדם, ובכך מגבירים סיכויי זליגת מחלות [25]. למשל, מחקר שבדק 16 מיני מכרסמים ברחבי מזרח אסיה מצא שבבתי גידול שמופרים על-ידי חקלאות, כריתת יערות או עיור, נמצאו יותר מכרסמים כוללניים הנושאים יותר פתוגנים המסוכנים לאדם [21].

לא רק מגוון המינים הכולל משפיע על מחלות זואוונטיות, אלא גם מצב השימור של חיות הבר. מחקר שבחן נוכחות של 142 נגיפים זואוונטיים אצל יונקים מצא מתאם ישיר בין גודל האוכלוסייה העולמית של המין, מצב השימור שלו לפי ה-IUCN וגודל תחום התפוצה של המין, לבין עושר מיני הנגיפים הזואוונטיים שהוא מאכסן. מיני היונקים עם האוכלוסיות הגדולות ביותר הם מינים מתפרצים ומינים פולשים, שהתאימו את תנאי המחיה שלהם לסביבת האדם, או חיות משק [15].



פרסוף גמדי (*Rhinolophus hipposideros*) בעת שנת החורף שלו. עטלפים ממשפחת הפרספיים (*Rhinolophidae*) הם מינים מאכסנים לקורונה | צילום: Matthieu Gauvain, Wikimedia, CC BY-SA 3.0

## הרס בתי גידול ומחלות זואונוטיות

קיים מתאם גבוה בין הרס בתי גידול לבין זליגת מחלות מבעלי חיים לאדם. מודלים הראו שאחוז השטח שהומר לשימוש האדם עשוי לנבא גודל מגפה זואונוטית צפויה<sup>[12]</sup>. בין הגורמים העיקריים המגבירים הסתברות שמין יונק מסוים יתפקד כמאחסן למיני נגיפים זואונוטיים רבים, נמצא פיתוח עירוני מואץ בשטח התפוצה של המין<sup>[24]</sup>.

לפי דו"ח ארגון IPBES, כ-75% מכלל השטח היבשתי של כדור הארץ הומר לשימוש האדם על-ידי חקלאות, בירוא יערות, גידול ערים, תעשייה ועוד<sup>[5]</sup>. בתי הגידול הטבעיים שנותרו נפגעים מקיטוע היוצר שטחים טבעיים קטנים במרחב פגוע. כ-70% מהיער הנותר בעולם נמצא במרחק של פחות מקילומטר בלבד מקצה היער. קיטוע לבדו גורם לירידה של עד 75% במגוון הביולוגי, לאובדן המגוון הגנטי של אוכלוסיות חיות בר ולהכחדת מינים<sup>[14]</sup>.

קיטוע בתי הגידול מגדיל את אורך השוליים בין הליבה של שטחים טבעיים לבין המעטפת (matrix) של שטחים מופרים. **אפקט שוליים** זה יוצר נקודות מגע רבות יותר בין ריכוזי האדם לבעלי חיים נשאי מחלות, כלומר, פרטים שהודבקו בפתוגן ועשויים להעבירו, כך שיש יותר סיכוי שמחלות יעברו. במחלות מסוימות הוכח שהמגפה לא החלה מהדבקה בודדה של האדם מבעל חיים, אלא שהדבקות חוזרות ונשנות הובילו בסופו של דבר לכלל מגפה; כך שככל שעולה הסיכוי למגע, עולה הסיכוי להתפרצות<sup>[19]</sup>. באזורים ברחבי אפריקה ובדרום אמריקה שהיו בהם קווי מגע קרובים בין האדם לחיות בר, אחוז ניכר יותר של העטלפים היה נגוע בנגיפים ממשפחת הקורונה. באסיה באזורים עם ניצול מוגבר של חיות בר נמצא מתאם לשכיחות נגיף זה<sup>[3]</sup>. גם התמרת בתי גידול לשטחי חקלאות אחראית לכמחצית מכלל המחלות הזואונוטיות החדשות המתפרצות אצל בני אדם<sup>[26]</sup>. סקירה רחבה בדרום-מזרח אסיה העלתה שלאנשים העובדים בחקלאות יש פי 1.74 סיכון להידבק במחלות מידבקות כגון טיפוס ומלריה<sup>[28]</sup>.

מנגנון נוסף הקושר הרס בתי גידול למחלות זואונוטיות הוא התפשטות מינים כוללניים בשטחים מקוטעים<sup>[9]</sup>. דוגמה לכך היא מחלת הליים, שעשויה להיות קטלנית, ומועברת באמצעות קרציה. המין המאכסן העיקרי בצפון אמריקה הוא עכבר לבן-רגל (*Peromyscus leucopus*), מין כוללני אוכל-כול. מין זה נפוץ יותר במקטעי יער קטנים יותר, שנמצאו בהם גם יותר קרציות הנגועות במחלת הליים<sup>[2]</sup>.

הפרה של בתי גידול גורמת לעלייה בשכיחות המחלות אצל חיות בר, ומגבירה את הזליגה של הפתוגנים לאדם. התדלדלות המשאבים הטבעיים מחריפה את התחרות על משאבי מזון ומגבירה טריפה. מצוקה ולחץ הנגרמים מגורמים סביבתיים אלה, מחלישים את מערכת החיסון של בעלי החיים ובכך מעלים את הרגישות שלהם למיני פתוגנים וכן מגבירים את קצב פיזור הפתוגנים (shedding) מבעלי החיים לסביבה<sup>[1]</sup>. עטלפים במצב גופני ירוד ביערות מופרים ומקוטעים בבורניאו נמצאו נשאים ליותר נגיפים ממשפחת הקורונה וממשפחת האסטרוריוס<sup>[27]</sup>.

תאוריה מדעית חדשה מציעה את מודל האבולוציה המשותפת (coevolution), הקושר בין קיטוע בתי גידול ואבולוציה מהירה של פתוגנים. קיטוע יוצר שטחי מחיה מבודדים של המין המאכסן. בכל מקטע כזה הפתוגן, טפיל (אקטופרזיט או אנדופרזיט) והמאכסן עוברים אבולוציה משותפת

להתאמה ביניהם. מוטציות חוזרות וסחיפה גנטית יוצרות זנים רבים של אותו הפתוגן, כך שגובר הסיכוי שאחד מהם יהיה קטלני ובעל יכולות זליגה לאדם<sup>[36]</sup>.

## ציד ואכילת חיות בר

ציד וסחר בחיות בר מגבירים גם הם את הסיכוי להתפרצויות מגפות חדשות, דרך מגע ואכילה של דם ואיברים פנימיים של בעלי חיים נגועים. סחר בבשר חיות בר פוגע אנושות במגוון הביולוגי של חיות בר ובתפקוד המערכות האקולוגיות, ובמקביל מגביר זליגת מחלות זואוונטיות לאדם ולחיות משק<sup>[17]</sup>. נגיף הקורונה הגיע כנראה משוק "רטוב" (שבעלי החיים נמכרים בו למאכל בעודם בחיים) של חיות בר במחוז ווהאן שבסין (איור 1). גם מגפת הסארס החלה בשוק חיות בר כזה, בשאטן, סין<sup>[4]</sup>. עוד ב-2003, בעקבות מציאת נגיף הסארס בחיות בר בשוק, נאסר הסחר בחיות בר בדרום סין. אך למרות הלקח של אותה התפרצות, הסחר בחיות בר ממשיך<sup>[7]</sup>.

סחר במינים בסכנת הכחדה נאסר באמנת CITES הבין-לאומית כבר משנת 1973. למרות זאת, מסורות תרבותיות, אמונות לגבי כוחות ריפוי של איברי בעלי חיים וצרכת חיות נדירות כסמל סטטוס, מניעות סחר לא חוקי בחיות בר ברחבי העולם בהיקפים שמוערכים בכמיליארד דולר<sup>[33]</sup>.

מחלות האבולה, האיידס ואבעבועות הקוף (monkeypox) הועברו לאדם מבשר ציד לא חוקי של חיות בר (bushmeat) ביערות באפריקה<sup>[12]</sup>. התפרצות מחלת האבולה הקטלנית במרכז אפריקה, הגורמת עד 88% תמותה של החולים בה, הועברה לאדם מאכילת חיות בר וממגע חוזר ונשנה עם גופות של מינים שניצודו. סחר בחיות בר נושאות מחלות אינו נחלתן של מדינות מתפתחות בלבד. בשר ציד רב מגיע מאפריקה לאירופה מדי שבוע<sup>[18]</sup>, ואילו ארה"ב מקבלת 2 מיליון משלוחים של חיות בר ומוצריהן מדי שנה<sup>[11]</sup>.



שוק חיות בר בסין | צילום: Simon Law, Wikimedia, CC BY-SA 2.0

## שינוי האקלים ומחלות זואוונטיות

עקב פליטה נרחבת של גזי חממה בידי האדם, הריכוז הממוצע של פחמן דו-חמצני באטמוספירה נכון ל-2019 היה **413.68 ppm**. שינוי האקלים צפוי להשפיע על בריאות האדם באופנים רבים, ובפרט הוא צפוי להאיץ התפשטות מחלות זואוונטיות, השפעה שצפויה להתגבר בשנים הקרובות<sup>[30]</sup>.

עליית הטמפרטורה הממוצעת גורמת לשטח התפוצה הטבעי של אורגניזמים רבים להתפשט צפונה (רחוק יותר מקו המשווה) או לעלות בגובה, למקום שממוצע הטמפרטורות החדש בו זהה לאקלים המתאים למין<sup>[22]</sup>. עקב כך, שינוי האקלים גורם לשינוי ולהרחבת התפוצה הן של וקטורים הן של מינים מאכסנים למחלות זואוונטיות, ומקרב אותם למרכזי אוכלוסייה גדולים<sup>[20]</sup>.

ההתחממות גורמת גם לגידול אוכלוסייה של וקטורים, בעיקר פרוקי רגליים מוצצי דם. בטמפרטורות גבוהות יותר עולה קצב ההתרבות של חרקים, ואילו פרקי הזמן בין ארוחות דם וזמן הדגירה של פתוגנים בגוף החרק – מתקצרים<sup>[23]</sup>. יתושים צפויים להגביר הפצת מחלות כגון מלריה ודנגה (dengue), הפוגעות במאות מיליוני אנשים בשנה כבר כיום. מחלות זואוונטיות המועברות בידי וקטורים רלוונטיות במיוחד בישראל. בארץ נראתה עלייה במקרי קדחת הנילוס המערבי, שמועברת בידי יתוש ממשפחת הכולכית (בעיקר *Culex pipiens* ו-*Culex perexiguus*) ובמקרים קשים עשויה לגרום לדלקת קרום המוח. הנגיף אנדמי בישראל, עם מקרי התפרצות בקיציים חמים במיוחד. הקדחת צפויה להתפשט עם התפרצויות חוזרות, ככל שהאקלים יתחמם<sup>[23]</sup>. בישראל נראו גם התפרצויות של מחלת הלישמניה (שושנת יריחו) המועברת באמצעות זבוב החול (*Phlebotomus spp.*), שקצב הפעילות והעקיצה שלו מתגבר עם עליית הטמפרטורה<sup>[23]</sup>.

במקביל, שינוי האקלים עשוי להגדיל את קצב ההתרבות של הפתוגנים הזואונוטיים עצמם, להעלות את שכיחותם במינים מאכסנים ולהגביר את קצב הזליגה שלהם אל האדם<sup>[20]</sup>. התחממות מאפשרת לפתוגנים זואונוטיים לשרוד במזון, להתרבות ולעבור מהר יותר<sup>[30]</sup>.

## סיכום ומסקנות

מחקרים מעריכים שבעתיד נראה יותר התפרצויות של מחלות מידבקות חדשות, ולא מהנמנע שהן יהיו גם קטלניות מהקורונה<sup>[29]</sup>. **הבנת התפקיד של מערכות אקולוגיות בריאות בהגנה מפני מגפות אלה צריכה להתבטא בכך ששמירת טבע תהפוך לסעיף מרכזי בסדר העדיפויות העולמי והלאומי.**

חשוב לזכור שה'אחריות' למחלות זואונוטיות איננה על חיות הבר. חיות בר היו נשאות של פתוגנים רבים מקדמת דנא, אך מערכת החיסון שלהן חזקה בהרבה מזו של האדם. לכן, בעוד הן נושאות פתוגנים מבלי להיפגע, הפתוגנים הללו גורמים לאדם לחלות. הניצול, ההרס והפלישה האנושית לתוך בתי הגידול, גורמים לנו לבוא במגע קרוב עם חיות הבר ולהפוך את הפתוגנים הללו למקור למגפות קטלניות.

שיקום מערכות אקולוגיות וחיידוש המגוון הביולוגי הטבעי הראה פעמים רבות תרומה לבריאות האדם וירידה בסיכון להעברת מחלות זואונוטיות<sup>[32]</sup>. שינויים בבתי גידול, כך שיקטינו נוכחות של מינים מאכסנים או וקטורים, ועידוד הדברה ביולוגית עוזרים במניעת הפצה של מחלות זואונוטיות. למשל, שיקום אדמות כבול גרם לירידה במספרן של קרציות נושאות מחלות, וטיפול במינים פולשים הוריד סיכון להעברת מחלת הליים ב-98%<sup>[31]</sup>. על מערכת הבריאות הציבורית לעבוד יחד עם אקולוגים לשיקום בתי גידול, כדי שנראה סביבה בריאה יותר לאדם ולחיות הבר כאחד<sup>[31]</sup>.

יש להמשיך את הטמעת השמירה החקוקה (הסטטוטורית) על מערכות אקולוגיות טבעיות ושטחים פתוחים במערכת התכנון, תוך דגש על שטחים טבעיים מקושרים היטב ברשת של שטחים פתוחים ביניהם. כמו כן, יש לחזק את ההגנה על חיות בר. אף על פי שבישראל אין שטחים רחבים של טבע פרא, היא מרכז נדידה בין-יבשתי לציפורים נודדות, וההגנה עליהן היא אחת התרומות החשובות של ישראל לשמירת טבע מבחינה בין-לאומית.

התפרצות הקורונה מדגימה שכאשר אנו מבינים את הסכנה הישירה להישרדותנו, האנושות מסוגלת לעשות שינויי התנהגות מרחיקי לכת ובעלי השפעה מהירה לשיפור מצב הסביבה. התקווה היא שגם אחרי שמגפת הקורונה תדעך, נזכור ששמירה על הטבע חיונית להמשך קיומנו.

## מקורות

1. Acevedo-Whitehouse K and Duffus ALJ. 2009. Effects of environmental change on wildlife health. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **364**: 3429-3438
2. Allan BF, Keesing F, and Ostfeld RS. 2003. Effect of forest fragmentation on lyme disease risk. *Conservation Biology* **17**: 267-272
3. Anthony SJ, Johnson CK, Greig DJ, et al. 2017. Global patterns in coronavirus diversity. *Virus Evolution* **3**(1): vex012
4. Bell D, Robertson S, and Hunter PR. 2004. Animal origins of SARS coronavirus: Possible links with the international trade in small carnivores. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* **359**: 1107-1114
5. Brondizio ES, Settele J, Díaz S, and Ngo HT (Eds). 2019. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. Bohn (Germany): IPBES
6. Chan JF-W, To KK-W, Tse H, et al. 2013. Interspecies transmission and emergence of novel viruses: Lessons from bats and birds. *Trends in Microbiology* **21**: 544-555
7. Cheng VCC, Lau SKP, Woo PCY, and Yuen Y. 2007. Severe acute respiratory syndrome coronavirus as an agent of emerging and reemerging infection. *Clinical Microbiology Reviews* **20**: 660-694
8. Civitello DJ, Cohen J, Fatima H, et al. 2015. Biodiversity inhibits parasites: Broad evidence for the dilution effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**:8667-8671
9. Devictor V, Julliard R, and Jiguet F. 2008. Distribution of specialist and generalist species along spatial gradients of habitat disturbance and

.fragmentation. *Oikos* **117**: 507-514

Dobson AP and Carper ER. 1996. Infectious diseases and human .10  
population history. *BioScience* **46**: 115-126

Eskew EA, White AM, Ross N, et al. 2020. United States wildlife and .11  
wildlife product imports from 2000–2014. *Scientific Data* **7**: 22

Faust CL, McCallum HI, Bloomfield LSP, et al. 2018. Pathogen spillover .12  
during land conversion. *Ecology Letters* **21**: 471-483

Gorbalenya AE, Baker SC, Baric RS, et al. 2020. The species severe acute .13  
respiratory syndrome-related coronavirus: Classifying 2019-nCoV and  
naming it SARS-CoV-2. *Nature Research* **5**(4): 536-544

Haddad NM, Brudvig LA, Clobert J, et al. 2015. Habitat fragmentation and .14  
its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* **1**: e1500052

Johnson CK, Hitchens PL, Pandit PS, et al. 2020. Global shifts in .15  
mammalian population trends reveal key predictors of virus spillover risk.  
*Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **287**: 20192736

Jones KE, Patel NG, Levy MA, et al. 2008. Global trends in emerging .16  
infectious diseases. *Nature* **451**: 990-993

Karesh WB, Cook RA, Bennett EL, and Newcomb J. 2005. Wildlife trade .17  
and global disease emergence. *Emerging Infectious Diseases* **11**:1000-  
1002

Katani R, Schilling MA, Lyimo B, et al. 2019. Microbial diversity in .18  
bushmeat samples recovered from the Serengeti ecosystem in  
Tanzania. *Scientific Reports* **9**: 18086

Leroy EM, Rouquet P, Formenty P, et al. 2004. Multiple Ebola virus .19  
transmission events and rapid decline of Central African wildlife. *Science*  
**303**: 387-390

Mills JN, Gage KL, and Khan AS. 2010. Potential influence of climate .20  
change on vector-borne and zoonotic diseases: A review and proposed  
research plan. *Environmental Health Perspectives* **118**: 1507-1514

Morand S, Blasdel K, Bordes F, et al. 2019. Changing landscapes of .21  
Southeast Asia and rodent-borne diseases: Decreased diversity but  
increased transmission risks. *Ecological Applications* **29**: e01886

Moritz C, Patton JL, Conroy CJ, et al. 2008. Impact of a century of .22  
climate change on small-mammal communities in Yosemite National  
Park, USA. *Science* **322**: 261-264

Negev M, Paz S, Clermont A, et al. 2015. Impacts of climate change on .23  
vector borne diseases in the Mediterranean basin – Implications for  
preparedness and adaptation policy. *International Journal of*  
*Environmental Research and Public Health* **12**: 6745-6770

Olival KJ, Hosseini PR, Zambrana-Torrel C, et al. 2017. Host and viral .24  
traits predict zoonotic spillover from mammals. *Nature* **546**: 646-650

Ostfeld RS, and Keesing F. 2000. The function of biodiversity in the .25  
ecology of vector-borne zoonotic diseases. *Canadian Journal of Zoology*  
**78**(20): 2016-2078

Rohr JR, Barrett CB, Civitello DJ, et al. 2019. Emerging human infectious .26  
diseases and the links to global food production. *Nature Sustainability*  
**2**(6): 445-456

Seltmann A, Corman VM, Rasche A, et al. 2017. Seasonal fluctuations of .27  
Astrovirus, but not Coronavirus shedding in bats inhabiting human-  
modified tropical forests. *EcoHealth* **14**: 272-284

Shah HA, Huxley P, Elmes J, and Murray KA. 2019. Agricultural land-uses .28  
consistently exacerbate infectious disease risks in Southeast Asia.  
*Nature Communications* **10**(1): 4299

Smith KF, Goldberg M, Rosenthal S, et al. 2014a. Global rise in human .29  
infectious disease outbreaks. *Journal of The Royal Society Interface* **11**:  
20140950

Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum DD, et al. 2014b. Human .30  
health: Impacts, adaptation, and co-benefits. In: Smith KR, Woodward A,  
Campbell-Lendrum D, et al. (Eds). *Climate Change 2014: Impacts,*  
*adaptation, and vulnerability*. Cambridge (UK) and New York (NY):  
Cambridge University Press

Sokolow SH, Nova N, Pepin KM, et al. 2019. Ecological interventions to .31

- prevent and manage zoonotic pathogen spillover. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **374**(1782): .20180342
- Speldewinde PC, Slaney D, and Weinstein P. 2015. Is restoring an ecosystem good for your health? *Science of the Total Environment* **502**: .276-279
- .UNEP. 2020. CITES Trade Database .33
- .WHO. 2020. Coronavirus disease (COVID-19 Pandemic). May 3rd .34
- Wolfe ND, Dunavan CP, and Diamond J. 2007. Origins of major human infectious diseases. *Nature* **447**(7142): 279-283 .35
- Zohdy S, Schwartz TS, and Oaks JR. 2019. The coevolution effect as a driver of spillover. *Trends in Parasitology* **35**(6): 399-408 .36