

# Värien merkitys hyönteisten ekologiassa ja ilmastonmuutokseen sopeutumisessa

Sonja-Maria Mattila



LuK-tutkielma  
Biologian tutkinto-ohjelma  
Oulun yliopisto  
Marraskuu 2022

## Sisältö:

1. Johdanto .....	3
2. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ekosysteemeihin ja lajien vuorovaikutussuhteisiin .....	4
2.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteisiin.....	5
2.1.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteisten vuorovaikutussuhteisiin .....	6
2.2. Kuinka hyönteiset sopeutuvat ilmastonmuutokseen .....	7
3. Värit hyönteisillä .....	8
3.1. Värien luokittelua .....	8
3.2. Värien toiminnot hyönteisillä .....	9
3.2.1. Ruumiin suojaaminen .....	10
3.2.2. Visuaaliset signaalit.....	10
3.2.3. Fysiologinen sopeutuminen.....	12
3.2.4. Värien päällekkäiset roolit ja näiden tuomat konfliktit .....	12
4. Perhoset malliorganismina .....	13
4.1. Värit perhosten vuorovaikutussuhteissa .....	14
4.1.1. Värit perhosten parittelukäyttäytymisessä .....	15
4.1.2. Miten värit auttavat perhosia petojen välttelyssä .....	16
4.2. Miten ilmastonmuutos vaikuttaa perhosiin .....	17
5. Pohdinta ja johtopäätökset .....	19
6. Lähteet .....	22

Kannen kuva: Christian Cadéré, canva.com

## 1. Johdanto

Ekosysteemit joka puolella maailmaa käyvät läpi nopeita muutoksia. Ilmaston lämpeneminen, saasteet, ihmisten lisääntynyt maankäyttö sekä lajien levittäytyminen maapallolla vaikuttavat lajeihin ja populaatioihin. Vaikutukset eivät rajoitu yksilötasolle vaan ovat monimutkaisia ja monitasoisia, sillä muutokset koskevat myös yksilöiden ja lajien välisiä vuorovaikutussuhteita ja tätä kautta koko ekosysteemin toimintoja ja rakennetta (Tylianakis ym., 2008).

Hyönteiset ovat lajimäärällisesti suurin selkärangattomien ryhmä ja elintärkeä osa toimivaa ekosysteemiä (Badejo ym., 2020). Ne pitävät huolta maaekosysteemien vakaudesta osallistumalla ravinnekiertoon, pölytykseen, siementen levitykseen sekä maaperän rakenteen ja hedelmällisyyden ylläpitoon samalla toimien tärkeänä ravintona useille eri lajiryhmille. Tätä kautta ne säätelevät myös muiden lajien populaatioita (Scudder, 2017). Näin ollen niiden säilyminen on erityisen tärkeää maapallon biodiversiteetin kannalta sekä ekosysteemien puolustautuessa ilmastonmuutoksen negatiivisilta vaikutuksilta.

Ilmastonmuutoksen on havaittu vaikuttavan myös hyönteisten ekologiaan (Menzel & Feldmeyer, 2021). Ihmisen toiminnan ja muuttuvan ilmaston myötä hyönteisten elinympäristöt, elinkierto, käyttäytyminen sekä vuorovaikutussuhteet tulevat muuttumaan merkittävästi. Tämä tulee vaikuttamaan negatiivisesti sekä hyönteisten omaan että myös muiden lajien selviytymiseen sekä vaikeuttamaan sopeutumista muuttuviin olosuhteisiin entisestään (Yang ym., 2021). Tässä työssä otin tarkastelun kohteeksi erityisesti värien roolin muuttuvien olosuhteiden keskellä. Väreillä ja kuvioilla on suuri merkitys lajien suojautumisessa, signaloinnissa sekä fysiologisessa adaptaatiossa (Badejo ym., 2020). Fenotyyppinen plastisuus sekä fysiologiassa, käyttäytymisessä että fenologiassa on tärkeässä roolissa lajien yrittäessä sopeutua muuttuvaan ilmastoon ja ympäristöön (Hill ym., 2021).

Perhoset ovat hyönteisistä tunnetuimpia värityksensä ja näyttävyytensä ansiosta, ja värit ovat saaneet monen tutkijankin huomion puoleensa (Bálint ym., 2012). Perhoset eivät ole hyvä malliorganismi ainoastaan hyönteisten värien tutkimisessa vaan myös ilmaston muutoksen vaikutusten tutkimisessa. Perhoset nimittäin reagoivat nopeasti ja herkästi ympäristössä tapahtuviin muutoksiin ja heijastavat sitä myös muiden lajien hyvinvointiin. Siispä perhosten ollessa sekä habitaattispesialisteja että ekosysteemien avainlajeja, on tutkimusten eteneminen

ja luonnonsuojeluekologisten ratkaisujen löytäminen erittäin tärkeää koko maapallon biodiversiteetin ja monimuotoisuuden kannalta (Hill ym., 2021).

Tässä työssä tuon esille värien toimintoja hyönteisillä sekä useita väreihin sidonnaisia selviytymis- ja sopeutumisstrategioita erityisesti hyönteisten maailmasta. Esittelen tarkemmin myös perhosten väriekologiaa ja tuon esille myös muutamia esimerkki lajeja. Työ käsittelee ilmastonmuutoksen tuomia vaikutuksia erityisesti hyönteisten ekologiaan ja esille tuodaan myös värien osuus hyönteisten sopeutumisprosesseissa sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksia hyönteisten väriekologiaan.

## 2. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ekosysteemeihin ja lajien vuorovaikutussuhteisiin

Muuttuvat maailmanlaajuiset ympäristötekijät luovat levottomuuksia sekä paikallisessa että ajallisessa mittakaavassa vaikuttaen sekä pitkä- että lyhytaikaisesti ekosysteemeihin (Yang ym., 2021). Ympäristötekijät vuorovaikuttavat toistensa kanssa ja vaikutukset menevät usein myös päällekkäin luoden suuriakin seuraamuksia ympäristössä ja eliöstössä. Suurimmat muutokset ovat ilmastonmuutos, muutokset maan käytössä, uusien kemikaalien tuntemattomat ja tunnetut vaikutukset sekä lisääntynyt maailman laajuinen organismien kuljettaminen ja kulkeutuminen. Ilmastonmuutos tuo tullessaan myös erilaisia äärisääilmiöitä kuten lämpöaalloja, tulvia, maastopaloja, kuivuutta sekä trooppisia myrskyjä (Yang ym., 2021). Nämä tekijät aiheuttavat sukupuuttoja, vaikuttavat lajien levinneisyyteen ja vaikuttavat laajasti myös lajien välisiin sekä antagonistisiin että mutualistisiin vuorovaikutussuhteisiin (Tylianakis ym., 2008).

Bioottiset vuorovaikutukset kuten saaliskäyttäytyminen, parasitismi ja pölytys ovat erittäin tärkeässä roolissa biodiversiteetin ylläpidossa, ekosysteemin sopeutumisessa muutoksiin sekä ihmisillekin tärkeiden ekosysteemipalveluiden ylläpidossa. Vaikka ekosysteemit ja niissä tapahtuvat vuorovaikutukset vaihtelevatkin paljon keskenään, tiedetään että ilmastonmuutos ja muut globaalit muutokset vaikuttavat kaikkiin organismeihin ja ekosysteemeihin (Tylianakis ym., 2008). Ilmaston lämpeneminen itsessään ei välttämättä ole edes isoin ongelma, vaan sen mukana tulevat muut ympäristöongelmat, kuten lisääntynyt maan käyttö ja tätä kautta organismien häirintä ja niiden elinympäristöjen tuhoutuminen. Myös ihmisten ja maiden välinen yhteys ja kaupankäyntiväylät laajentuvat muun muassa arktisten alueiden vapautuessa kulkuväyläksi, joka tuo mukanaan lisääntyvän vieraslajien määrän, lämpöä

kestävien lajien yleistymisen sekä huonosti sopeutuvien lajien katoamisen (Menzel & Feldmeyer, 2021).

Ilmaston lämmitessä organismien välinen hierarkia muuttuu sekä yksilö- että lajitasolla. Tämä johtuu muun muassa siitä, että lämpöä sietävät lajit alkavat dominoimaan ekosysteemeissä ja näin muuttavat sen rakennetta (Menzel & Feldmeyer, 2021). Jotta lajit selviytyisivät, niiden on pakko sopeutua muutoksiin muuttamalla niiden käyttäytymistä tai muuta ekologiaa. Sopeutuminen tuo tullessaan muutoksia ekosysteemissä vallitseviin vuorovaikutussuhteisiin. Monet lajit joutuvat muuttamaan vuorokausirytmiaan, jolloin syntyy uusia päällekkäisyyksiä ekologisissa lokeroissa. Vuosi- ja vuorokausirytmien muuttuminen johtaa myös tärkeiden vuorovaikutussuhteiden vähenemiseen, kun lajit elävät eri rytmissä (Hill ym., 2021).

## 2.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteisiin

Ilmastonmuutos uhkaa maailmanlaajuisia biodiversiteettiä heikentäen lajeja ja populaatioita. Ilmaston muutoksella on suuri vaikutus myös hyönteisiin, joiden fenologiassa, käyttäytymisessä, levittäytymisalueissa sekä runsauksissa on havaittu muutoksia ilmaston- ja ympäristömuutoksen seurauksena (Menzel & Feldmeyer, 2021).

Ihmisten aiheuttamat muutokset kuten kaupungistuminen, elinympäristöjen pirstaloituminen sekä maataloudellinen kiihtyminen tuovat mukanaan muun muassa paikallista ilmaston lämpenemistä, saasteita sekä valaistumman ympäristön. Nämä ovat muokanneet hyönteisten elinympäristöön uudenlaiset elinolosuhteet, joihin niiden tulee sopeutua. Muutoksista aiheutuva elinympäristöjen pirstaloituminen ja vähentyminen sekä homogeenisempi ympäristö vaikeuttavat hyönteisten liikkumista, kolonisoitumista ja näin myös sopeutumista entisestään (Yang ym., 2021).

Uusien yhdisteiden vaikutukset niiden päästessä luontoon tuovat myös omat vaikutuksensa hyönteisten hajumuistiin ja -oppimiseen, näköön, lentokykyyn sekä navigointiin. Vaikka kyse ei olekaan enää ainoastaan tappavista hyönteismyrkyistä vaan yhdisteistä, joilla ei ole suoraa negatiivista vaikutusta tai ainakaan kuolemaa tuottavaa vaikutusta, uusien yhdisteiden käytöllä voi kuitenkin olla suuret ja odottamattomat seuraukset. Yhdisteiden päätyessä maaperään ja vuorovaikuttaessa siellä olevien muiden yhdisteiden kanssa, voi syntyä uusia yhdisteitä tai yhdisteet voivat päätyä pohja- ja valumavesien kautta vesistöön, jossa niillä on taas erilaiset vaikutukset eliöstöön. Myös muilla saasteilla, kuten raskasmetalleilla, otsonilla ja vapaille radikaaleilla on huomattu olevan samankaltaisia ominaisuuksia ja seurauksia kuin

ihmisperäisillä yhdisteillä. Kaikki edellä mainitut seikat voivat vaikuttaa hyönteisten stressiin, saalistajilta suojautumiseen, habitaatin valitsemiseen sekä muihin käyttäytymiskuvioihin (Yang ym., 2021).

Eniten tulevat kärsimään lajit, jotka elävät vakaissa ja erityisissä ilmastoissa kuten trooppisilla alueilla tai vuoristoilla (Menzel & Feldmeyer, 2021). Etenkin vuoristoalueet tulevat kohtaamaan erityisen suuren lämpötilamuutoksen ja mahdollisesti suuremman määrän muuttavia vieraslajeja. Ympäristöongelmat kuten tulvat ja kuivuus vaikuttavat myös maanalaisiin pesiin ja erityisesti lentokyvyttömien hyönteisten on vaikea vaihtaa ympäristöönsä tai löytää nopeasti vettä, jolloin niiden on pakko sopeutua (Menzel & Feldmeyer, 2021). Lämpeneminen lisää vaihtolämpöisten hyönteisten metabolisia kustannuksia ja tätä kautta rajoittaa niiden pääsyä resurssien luo (Yang ym., 2021).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteisiin tulisi olla prioriteetti tutkimusaiheissa, sillä ne antavat paljon informaatiota koko ekosysteemin tilasta ja niillä on iso rooli maapallon eliöstön ja monimuotoisuuden muokkaamisessa ja ylläpidossa (Hill ym., 2021). Jotta ilmastonmuutoksen vaikutuksia hyönteisiin voitaisiin ymmärtää paremmin, tulisi tutkimuksissa perehtyä enemmän populaatiotrendeihin, kuumuuden ja kuivuuden sietokykyyn vaikuttaviin tekijöihin sekä populaatio että yksilötasolla, sopeutumiskykyä ja -käyttäytymistä sekä sosiaalisista hyönteisistä puhuttaessa yhdyskunnallisten muutosten vaikutuksia ekosysteemitointoihin (Menzel & Feldmeyer, 2021).

#### 2.1.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteisten vuorovaikutussuhteisiin

Ilmastonmuutos vaikuttaa hyönteisten käyttäytymiseen sekä suorasti että epäsuorasti.

Vaikutukset hyönteisten vuorovaikutussuhteisiin tulee usein epäsuorasti, ilmastonmuutoksen vaikuttaessa ensin suorasti esimerkiksi hyönteisten liikkuvuuteen ja levinneisyyteen (Yang ym., 2021). Ilmastonmuutos ja ihmisten maan käyttö jatkuvasti vaikuttavat sekä hyönteisten signaalien että ympäristöstä saatavien vihjeiden rakenteeseen, leviämiseen sekä havaitsemiseen. Esimerkiksi lisääntynyt valon määrä kaupungeissa hankaloittaa akvaattisten hyönteisten navigointia joissa ja puroissa. Lisääntynyt valonmäärä vaikuttaa myös muilla tavoin esimerkiksi bioluminesenssi-signaaleita käyttäviin yöaktiivisiin lajeihin. Valon lisäksi kaupungista tulevat sekä melu- että hajuhaitat häiritsevät hyönteisten ääni- ja hajuaistiin perustuvia signaaleja (Yang ym., 2021).

Ilmastonmuutos muokkaa myös vuodenaikoja (Hill ym., 2021), joka aiheuttaa fenologisia muutoksia useissa eri organismeissa. Hyönteisten elämänkaari on vahvasti sidoksissa

vuodenaikoihin, jonka vuoksi muutokset vuoden ajoissa vaikuttavat myös niihin. Muutokset koskevat muun muassa elämän syklin toimintojen ajoituksia ja sukupolvisuutta, eli syntyvien sukupolvien määrää vuodessa. Joskus muutokset fenologioissa johtavat vuorovaikuttavien lajien fenologisiin yhteensopimattomuuksiin. Näin voi käydä varsinkin, kun kyseessä ovat lajit, jotka reagoivat ilmaston muutokseen keskenään eri tavoin, kuten habitaattispesialistit perhoset (Yang ym., 2021).

Eliöiden fenologisista muutoksista voi kärsiä lajien mutualistiset suhteet, joilla on vaikutuksia tärkeisiin ekosysteemitomintoihin ja -palveluihin (Menzel & Feldmeyer, 2021). Lajien aikataulujen yhteensopimattomuus tuo tullessaan vähentyneitä resursseja kullekin lajille (Hill ym., 2021). Myös kasveissa tapahtuvat muutokset kuten kukinnan aikaistuminen vaikuttavat kasveja ruokana ja isäntäkasveina hyödyntäviin hyönteisiin sekä kasvien ja hyönteisten väliseen pölytyssuhteeseen (Menzel & Feldmeyer, 2021). Erityisesti vaikutus kohdistuu niin kutsuttuihin fenologispesialisteihin, kuten toukkiin, jotka käyttävät isäntänään vain tietyn kasvin tiettyjä kasvuvaiheita kuten kukintoa, hedelmää tai nuppua (Hill ym., 2021).

## 2.2. Kuinka hyönteiset sopeutuvat ilmastonmuutokseen

Kuten on mainittu jo aiemmin, kylmään ilmastoon sopeutuneet lajit kärsivät mahdollisesti eniten ilmaston lämpenemisestä. Selviytyäkseen niiden tulee sopeutua lämpoisempään ilmastoon tai muuttaa kylmemmälle alueelle. Se kumpaan ratkaisuun laji tai populaatio päätyy, riippuu siitä, onko populaatiossa tarpeeksi geneettistä variaatiota ja onko potentiaalinen yleistyvä geeni lämmönsietoa vai lento/liikkumiskykyä tukeva geeni (Bladon ym., 2020). Myös uusien alueiden saatavuus ja erot alueilla olevien resurssien välillä vaikuttavat sopeutumisstrategiaan.

Vaikka muuttuviin ympäristöoloihin kuuluu myös muita uusia haasteita kuten saasteet, maailmanlaajuinen lämpötilan nousu on yksi selkeimmistä sopeutumista vaativista tekijöistä. Yksilöt voivat reagoida muuttuvaan lämpötilaan pääasiassa kolmella eri tavalla: 1. vaimentamalla lämpötilan nousun vaikutuksia fysiologisin ja metabolisin keinoin, 2. muuttamalla käyttäytymistään tai 3. siirtymällä alueelle, jossa on suotuisimmat olosuhteet (Bladon ym., 2020).

Plastisuus käyttäytymisessä on erittäin tärkeä vaihtolämpöisille organismeille kuten hyönteisille, joiden täytyy esimerkiksi etsiä uusi elinalue, joka mahdollistaa niiden ruumiinlämmön pysymisen optimina. Vuoristoalueiden perhoslajit pitävät siipiään kohtisuorasti aurinkoon päin ollessaan levossa, jotta ne saisivat enemmän lämpöä siivilleen

kylminä aikakausina. Samalla tavalla tietyt lajit voivat yrittää välttää liikaa kuumuutta välttämällä aurinkoisia paikkoja, piiloutumalla tai asettelemalla siipensä eri tavoin. Tämä voi kuitenkin kostautua, kun esimerkiksi maastoutumisväritystä ei voida enää hyödyntää yhtä tehokkaasti tai kun esimerkiksi ruuanhankinta-aika vähenee (Hill ym., 2021).

Hyönteiset joutuvat myös muuttamaan niiden ruumiin rakennetta ja väritystä, jotta ne sietäisivät lämpöä ja kuivuutta paremmin. Tällä on mahdollisesti vaikutuksia niiden ulkonäköön ja tätä kautta mahdollisiin signaaleihin tai pedoilta suojautumiseen. Useammissa tutkimuksissa on havaittu, että vähentynyt melanisaatio ja vaihtoehtoiset värit ja kuviot voivat auttaa hyönteisiä selviytymään nousevissa lämpötiloissa (Menzel & Feldmeyer, 2021).

### 3. Värit hyönteisillä

Eläinten värityksellä on monia tarkoituksia ja se osallistuu muun muassa fyysiseen suojautumiseen, signaloimiseen ja fysiologisiin sopeutumisprosesseihin (Badejo ym., 2020). Evoluution ja lajiutumisen kannalta on tullut hyvin tärkeäksi tunnistaa omat lajitoverit. Lajikohtaisia fenotyyppisiä piirteitä kuten väritystä ja kuviointia käytetään usein potentiaalisen parittelukumppanin (Osorio & Vorobyev, 2008), kilpailijoiden sekä mahdollisten uhkien tunnistamiseen (Garcia ym., 2020). Värit ovat hyvin tärkeitä myös ilmastonmuutoksen tuomien haasteiden sietämisessä sekä siihen vaadittavissa adaptaatioprosesseissa. Näihin prosesseihin kuuluu sekä fysiologinen adaptaatio muuttuviin elinoloihin että väreihin perustuvat lajien vuorovaikutussuhteet. Näiden ylläpito on todella tärkeää, jotta ekosysteemi olisi vakaampi ja valmis kohtaamaan ilmastonmuutoksen tuomat haasteet (Badejo ym., 2020).

Sosiaaliset hyönteiset osallistuvat monien tärkeiden ekosysteemipalveluiden ylläpitoon. Monilla sosiaalisilla hyönteisillä on hyvin tunnistettava väritys (Badejo ym., 2020) sekä hyvin kehittynyt värinäkö (Osorio & Vorobyev, 2008). Hyönteisten ekologia voidaan kuvailla hyvin visuaaliseksi, koska niiden elintavat ja ympäristö vaatii niiltä hyvää värinäköä. Tähän liittyy muun muassa isäntäkasvien ja kumppanien tunnistaminen ja valinta (Briscoe & Chittka, 2001). Muun muassa edellä mainittujen seikkojen vuoksi hyönteiset ovat tärkeitä ja suosittuja malliorganismeja sekä näköön ja väreihin liittyvissä tutkimuksissa että eläinten kommunikoinnin ja vuorovaikutusten tutkimisessa (Badejo ym., 2020).

#### 3.1. Värien luokittelua

Suurin osa hyönteisten väreistä on joko pigmentti- tai rakennevärejä, jolloin värien eri sävyt riippuvat pintaan absorboituvien ja pinnasta heijastuvien valonsäteiden aallonpituuksista.



(Gruson ym., 2019) Pigmentti- ja rakennevärien lisäksi joillain hyönteisillä esiintyy harvinaisempaa bioluminesenssia, jossa entsyymit toimivat itse valonlähteenä. Geenit koodaavat värien ja kuvioden ilmenemistä eläimillä. Tämä mahdollistaa tarkat ja pienimmätkin eroavaisuudet lajien ja yksilöiden välillä sekä erojen säilymisen sukupolvesta toiseen (Badejo ym., 2020).

Pigmenttivärit koostuvat monista eri pigmenteistä ja pigmenttivärit kuten ruskean, punaisen, keltaisen ja oranssin sävyt syntyvät usein monien pigmenttien yhteisvaikutuksesta. Pigmentit sijaitsevat kutikulan, hyönteisen pinnalla olevan suojakerroksen alla. Ne usein keskittyvät tiettyihin kohtiin luoden muun muassa siipien suonikuvion lihasten kiinnityskohtien ja muiden sisäisten rakenteiden ohjaamana (Badejo ym., 2020). Värit syntyvät, kun valonsäteet absorboituvat kuhunkin pigmenttimolekyylisiin valikoivasti perustuen niiden ominaisiin absorptioaallonpituuksiin. Aallonpituudet, jotka heijastuvat pinnasta takaisin havaitaan väreinä (Gruson ym., 2019).

Pigmenttien lisäksi myös pinnan rakenne vaikuttaa havaittavaan väriin ja sävyyn. Muun muassa läpikuultava valkoinen, violetti, ja pinnan metallinkiillot perustuvat nimenomaan hyönteisen pinnalla olevaan rakenteeseen (Badejo ym., 2020). Auringonsäteiden vuorovaikuttaessa pinnan eri nanorakenteiden kanssa syntyy erilaisia optisia ilmiöitä kuten hajasirontaa ja koherenttia sirontaa, interferenssiä ja diffraktiota. Näiden ilmiöiden vuoksi rakennevärit ovat hyvin kirkkaita, puhtaita ja katsomiskulman vaihtuessa sateenkaarenväreissä kimaltelevia (Bálint ym., 2012, Gruson ym., 2019). Rakennevärit ovat yllättävän yleisiä luonnossa ja niitä pidetään yhtenä nerokkaimmista visuaalisista signaaleista. Hyönteisten värit on kuitenkin lähes aina pigmentti ja rakennevärien yhteistulos (Kemp & Rutowski, 2007).

### 3.2. Värien toiminnot hyönteisillä

Värit palvelevat hyönteisiä monin tavoin. Pigmentit, rakenteet ja niiden yhdistelmät tarjoavat monia hyödyllisiä toimintoja, jotka perustuvat kutikulan biokemialliseen rakenteeseen, värien tyyppeihin, selviytymisstrategioihin, käyttäytymiseen sekä yksilöiden fysiologiaan. Tässä kappaleessa esittelen värien kolme päätoimintoa hyönteisillä: 1. fysiologinen ja immunologinen ruumiin suojaaminen, 2. Signaalointi, 3. fysiologinen adaptaatio lämpötilaan, UV-säteilyyn ja kuivuuteen. Esittelen myös värien roolien päällekkäisyyksien aiheuttamia konflikti- ja ristiriitatilanteita (Badejo ym., 2020).

### 3.2.1. Ruumiin suojaaminen

Fyysinen suojautumisen sisältää sekä fysiologisen että immunologisen suojautumisen. Fysiologiseen suojautumiseen tummempi kutikula on tehokkaampi kuin vaalea, koska se on vaaleampaa kutikulaa paksumpi. Se suojaa paremmin loisilta ja taudinaiheuttajilta, jotka usein pääsevät hyönteisiin niiden kutikulan läpi. Melaniini on pigmentti, joka osallistuu sekä tummemman värin tuottamiseen että immunologiseen suojautumiseen. Esimerkiksi hyönteisten, joilla on suurempi pitoisuus melaniinia niiden kutikulassa huomattiin olevan vastustuskykyisempi tiettyjä sieni infektoita kohtaan kuin lajien, joiden kutikulassa ei ollut melaniinia (Badejo ym., 2020).

Hyönteiset käyttävät väritystään suojautumaan myös isommilta saalistajilta. Pelkkä tummempi väritys ei kuitenkaan tähän enää riitä vaan niiden täytyy käyttää monimutkaisempia strategioita. Muutamia tällaisia väreihin perustuvia suojelustrategioita ovat suojaväri, häiritsevä kuviointi, vastavarjostus, matkiminen ja vastavalaistus, jotka voidaan kaikki luokitella naamioitumiskategoriaan (Badejo ym., 2020). Näiden strategioiden sekä suoran signaloinnin avulla yksilöt pyrkivät välttämään loukkaantumisen ja pakenemisen tarpeen. Nämä kummatkin ovat huonoja vaihtoehtoja, vaikka yksilöt selviytyisivätkin hyökkäyksestä, sillä ne kuluttavat paljon energiaa ja näin alentavat yksilöiden kelpoisuutta (Allen & Caro, 2017).

### 3.2.2. Visuaaliset signaalit

Monet eläimet käyttävät väritystä signaloimiseen (Finkbeiner ym., 2014). Värien muodot, luminesenssi, sävy sekä polarisaatio vaihtelevat rajattomasti ja kaikki nämä vaihtelut kuljettavat erilaista informaatioita kukin omaa kanavaansa pitkin. Värit voivat signaloida identiteetistä, pahanmakuisuudesta tai kilpailijan ja parittelukumppanien laadusta (Badejo ym., 2020). Näin värit osallistuvat parinvalintaan, valta-asemien ylläpitoon, reviirien puolustamiseen, ryhmäkoordinaatioon ja käyttäytymiseen sekä petojen välttelyyn (Allen & Caro, 2017).

Parittelussa värit auttavat lajien tunnistamisessa sekä kertovat yksilöiden laadusta ja sukupuolesta (Allen & Caro, 2017). Erityisesti rakennevärit toimivat seksuaalisina koristeina kertomassa suoraan yksilöiden laadusta. Monimutkaisten nanorakenteiden uudistaminen ja ylläpitäminen vaatii korkeat ravintoainepitoisuudet ja näin ne kertovat suoraa yksilön ravintoainetasoista ja yksilön fysiologisten prosessien toimivuudesta (Kemp & Rutowski, 2007). Pigmentit taas hyönteiset saavat niiden ruoasta, jolloin värit voivat kertoa myös yksilöiden ravinnonlaadusta, ruuanhankinta taidoista sekä aineenvaihdunnallisesta

potentiaalista (Badejo ym., 2020). Näin ollen värit ovat rehellisiä signaaleja yksilöiden fenotyypisistä tilasta ja tämä todistaa myös, että kalliit ja vaikeasti ylläpidettävät signaalit voivat olla evolutiivisesti vakaita ja pystyvät vastustamaan uusia innovaatioita (Kemp & Rutowski, 2007).

Aposemaattiset signaalit yhdessä maastoutumisvärityksen kanssa on todettu olevan evolutiivisesti kaksi merkittävintä adaptaatiota petojen välttelyssä. Aposemaattiset signaalit pyrkivät ilmoittamaan saalistajalle, että hyökkääminen ei ole kannattavaa. Aposemaattiset signaalit ovat usein kirkkaita värejä kuten punaisia, keltaisia ja oransseja yhdistettynä mustiin kuvioihin (Badejo ym., 2020; Finkbeiner ym., 2014). Nämä vihjeet ovat usein rehellisiä ja kertovat esimerkiksi yksilöiden myrkyllisyydestä. Näin ollen aposemaattisesta signaloinnista voi hyötyä myös saalistajat. Petojen välttelyyn käytetään kuitenkin myös epärehellisiä signaaleja. Nämä signaalit pyrkivät samaan reaktioon saalistajassa kuin rehellisetkin eli että peto jättää saaliin rauhaan. Esimerkkinä lajit, jotka matkivat oikeasti myrkyllisten lajien aposemaattista väritystä, vaikka eivät itse ole myrkyllisiä. On myös useita lajeja, jotka muilla keinoin pyrkivät pelottamaan saalistajan pois, vaikka saalis ei itse olisi millään tavalla saalistajalle vaarallinen (Allen & Caro, 2017).

Signaalit auttavat sekä lähettäjiä että vastaanottajia sopeutumaan paremmin ympäristöönsä. Signaalit vaikuttavat yksilöiden käyttäytymiseen ja voi auttaa niitä parantamaan kelpoisuuttaan (Patricelli & Hebets, 2016). Tämä mutualistinen signaloitisuhte voi olla sekä saman että erilajien yksilöiden välillä (Allen & Caro, 2017). Signaalit voivat sisältää tietoa lähettäjän dynaamisista ominaisuuksista kuten reaktiivisuudesta ja fysiologisesta tilasta tai staattisista ominaisuuksista kuten koosta, sukupuolesta, iästä ja siitä mitä lajia yksilö edustaa (Garcia ym., 2020).

Eläimet sopeutuvat muuttuviin ympäristöoloihin myös muuttamalla värejään ja kuvioitaan. Kyky muuttaa väriä riippuu ympäristössä tapahtuvista muutoksista, tilanteesta sekä yksilön fysiologisesta kunnosta (Batabyal & Thaker, 2017). Näin ollen sekä värit että niiden vaihtelevuus voi sisältää informaatiota signaloijasta sekä sen ympäristöstä (Badejo ym., 2020). Jotkut muutokset voivat tapahtua nopeasti, kun taas jotkut vievät enemmän aikaa. Tähän vaikuttaa tilanteen kriittisyys kuten nopean puolustus mekanismin tarve. Jotkut lajit voivat muuttaa niiden väriä kokonaan, kun taas jotkut voivat vaihtaa vain sävyä, kirkkautta tai kontrastia. Joka tapauksessa tilanne ja sen luomat tarpeet vaikuttavat värityksissä tapahtuviin muutoksiin (Batabyal & Thaker, 2017).

### 3.2.3. Fysiologinen sopeutuminen

Fysiologisella sopeutumisella tässä yhteydessä tarkoitetaan lämpösäätelyä, UV-suojaa sekä kuivumisen säätelyä. Hyvin yleisesti esiintyvä pigmentti melaniini osallistuu kuhunkin näistä toiminnoista. Lämpömelanismihypoteesin mukaan yksilöt ovat tummempia kylmemmissä ilmastoissa ja vaaleampia lämpimämmissä ilmastoissa. Tätä ilmiötä on havaittu monilla hyönteisillä kuten kuoriaisilla, perhosilla, sudenkorennoilla, ampiaisilla ja sirkoilla. Tummempi väri sitoo paremmin auringon valoa ja näin auttaa hyönteisiä pitämään niiden lämpötilan optimaalisena niiden ruumiintoimintojen kannalta myös kylmemmissä ilmastoissa, kuten vuoristoalueilla (Badejo ym., 2020). Tämä ominaisuus auttaa hyönteisiä myös selviytymään joistain ilmaston muutoksen tuomista haasteista, jotka koskevat nimenomaan ilmaston lämpötilassa tapahtuvia muutoksia (Hill ym., 2021).

UV-suojaa hypoteesin mukaan tummemmat yksilöt, joilla on enemmän melaniinia sietävät paremmin auringonsäteilyä, sillä melaniini antaa luonnollisen suojan UV-säteilyä vastaan. Melaniini osallistuu myös kuivuuden säätelyyn, sillä melaniini heikentää kutikulan läpäisevyyttä, jolloin haihtuminen vähenee. Tämän vuoksi kuivemmillä alueilla tai kuivakausilla hyönteisillä on tummempi väritys. Melanisaatioprosessin ollessa yhteydessä kaikkiin yllä mainittuihin sopeutumiskeinoihin on päätelty, että ympäristön tila ja muutokset ja sen vaatimat sopeutumiskeinot säätelevät myös melanisaatioprosessia (Badejo ym., 2020).

### 3.2.4. Värien päällekkäiset roolit ja näiden tuomat konfliktit

Värien päällekkäiset ja toisiinsa vaikuttavat toiminnot kertovat värien monimutkaisesta ja vuorovaikuttavasta luonteesta. Esimerkiksi jotkut suojavärit ja varoitusvärit toimivat sekä suojakeinona että signaaleina. Jotkut värit taas osallistuvat samaan aikaan sekä lämpösäätelyyn, että UV-suojaan (Badejo ym., 2020).

Yksilöt etsivät mieluusti kumppanikseen yksilöitä, joiden piirteet ovat hyödyksi niiden poikasten selviytymisen kannalta ja tätä kautta myös niiden oman kelpoisuuden kannalta. Yksilöiden tulisi siis käyttää energiaa mahdollisimman hyvän parittelukumppanin löytämiseen. Joillain yksilöillä voi olla esimerkiksi erinomainen suojaväri, jonka vuoksi se on myös suosittu parittelukumppani. Toisaalta joillain lajeilla ja yksilöillä voi olla hyvin räikeä ja huomiota herättävä väritys, jolla ne yrittävät tehdä vaikutuksen vastakkaiseen sukupuoleen. Tämä väritys voi kuitenkin herättää parittelukumppanin huomion lisäksi myös petojen huomion. Tämä ominaisuus ei siis välttämättä tee yksilöstä hyvää valintaa kumppanina, vaikka se pystyisikin vakuuttamaan kuntosensa hyväksi näyttävillä väreillä. Tätä konfliktia ei kuitenkaan tapahdu kaikissa tapauksissa, jonka voi huomata luonnossa runsaasti esiintyvistä

kirkkaista väreistä. Parittelusignaalien, suojavärien ja varoitussignaalien vuorovaikutus tulee päättämään, onko näiden signaalien ylläpito evolutiivisesti kannattavaa (Finkbeiner ym., 2014).

Värien kaksoisrooli, jossa sama väri signaloi useita eri asioita voi myös aiheuttaa konflikteja eläinten välisessä kommunikoinnissa (Estrada & Jiggins, 2008). Piirre, joilla on sekä seksuaalinen että ei-seksuaalinen tarkoitus on sekä seksuaalivalinnan että luonnonvalinnan paineen alaisina. Tämä piirre kuten väri voi olla positiivisen valinnan kohteena sekä luonnon että seksuaalivalinnan suhteen, jolloin tämän värin molemmilla toiminnoilla olisi positiivinen yhteys. Tällöin värin toiminnot tukevat yksilön kelpoisuutta ja värin ja sen toimintojen ylläpito on kannattavaa (Finkbeiner ym., 2014). Voi kuitenkin olla niin, että toinen valinta luo negatiivisen paineen ja toinen valinta positiivisen paineen (Estrada & Jiggins, 2008), jolloin toimintojen välille syntyy epätasapaino ja toinen niistä on mahdollisesti altis muutokselle evoluution myötä. Tämä muutos tulee kuitenkin olemaan hyvin hidas, sillä se vaatii muutoksia koko signalointisysteemissä (Finkbeiner ym., 2014).

Myös lajien välinen matkinta aiheuttaa konflikteja muun muassa parittelukäyttäytymisessä. Samalla alueella elävät samalta näyttävät lajit, joilla on myös hyvin samankaltainen ekologia voi kohdata sekaannusta parinvalinnassa. Ehkä tästäkin syystä samankaltaisten lajien on huomattu asuvan eri elinalueilla mahdollisesti välttääkseen konfliktitilanteet parittelussa. Matkimiskäyttäytymisen evolutiiviset vaikutukset ovat osittain vielä tuntemattomat, mutta voidaan olettaa, että sen hyödyt ovat haittoja isommat. Matkimisella on kuitenkin haittapuolensa, jonka voi päätellä siitä, että se ei ole nykyistä yleisempää eläinten keskuudessa (Estrada & Jiggins, 2008).

#### 4. Perhoset malliorganismina

Perhoset muidenkin hyönteisten tavoin osallistuvat tärkeisiin ekosysteemipalveluihin kuten pölytykseen lisäten samalla kasvien geneettistä monimuotoisuutta. Ne osallistuvat myös tuholaistorjuntaan karsien tiettyjä tuholaiseliöitä sekä toimivat muun muassa ravintona monille lajiryhmille. Perhosten runsaus usein kertoo koko alueen hyvinvoinnista ja muun muassa kasvilajien runsaudesta (Ghazanfar ym., 2016).

Perhosilla esiintyvät värit ja kuviot ovat hyvin monimuotoisia ja ovat herättäneet myös monen tutkijan huomion. Monet perhosten väreihin kohdistuvat tutkimukset ovat keskittyneet niiden pigmenttiväreihin, mutta perhosten monet värit ovat myös rakenteellisia. Oikeastaan perhosten värit ovat usein joko pigmenttien ja rakenteiden yhdistelmien tulos, tai

vaihtoehtoisesti pelkän rakenteen (Bálint ym., 2012). Perhosten morfologian ja elinympäristöjen välillä on suuria eroavaisuuksia ja näin myös niiden väritykset ja värien tarkoitukset ovat hyvin monimuotoisia. Näin ollen perhoset tarjoavat erittäin hyvän mahdollisuuden tutkia värejä, niiden eri toimintoja, näköaistia sekä tärkeisiin vuorovaikutussuhteisiin osallistuvia nerokkaita visuaalisia signaaleja (Estrada & Jiggins, 2008).

Hyönteislajisto perhoset mukaan lukien suppenee nopeasti ilmaston muutos yhtenä suurena vaikuttajana. Perhoset sopivat hyvin ilmastonmuutoksen vaikutusten tutkimiseen ekosysteemeissä, sillä ne reagoivat nopeasti ympäristössä tapahtuviin muutoksiin lyhyiden sukupolvien, nopean evoluution sekä tarkkojen ekologisten vaatimusten vuoksi (Hill ym., 2021). Niillä on myös moninaiset sopeutumiskeinot, jotka liittyvät myös niiden väritykseen (Badejo ym., 2020). Perhosten avulla pystytään myös tutkimaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia ekosysteemin eri tasoihin tarkoittaen yksilötasolla genetiikkaa, fysiologiaa, käyttäytymistä sekä morfologiaa sekä populaatio ja yhteisötasolla vuorovaikutuksia, synkroniaa ja geografista vaihtelua (Hill ym., 2021). Perhoset ovat tärkeitä bioindikaattoreita ja niitä tarkkailemalla saadaan tietoa koko ekosysteemin tilasta ja biodiversiteetistä (Ghazanfar ym., 2016).

#### 4.1. Värit perhosten vuorovaikutussuhteissa

Värit ja kuviot ovat tärkeä signalointisysteemi myös perhosille ja suurimman osan ajasta tekevät yhteistyötä muihin aistisysteemeihin perustuvien signaalien kanssa muodostaen toimivan kokonaisuuden. Visuaaliset signaalit ovat tärkeitä perhosten sosiaalisessa käyttäytymisessä, jonka vuoksi perhoset ovat hyvä malliorganismi visuaalisten signaalien tutkimiseen (Estrada & Jiggins, 2008). Perhoset eroavat monista muista eläimistä myös niiden erityisen hyvän värinäön vuoksi. Jotta ympäristöstä saatavia visuaalisia signaaleita pystyisi hyödyntämään on niitä vastaan ottavan aistisysteemin oltava tarpeeksi kehittynyt. Tämä tarkoittaa, että silmissä olevien fotoreseptorien, visuaalisten pigmenttien sekä silmän eri osien täytyy olla kehittynyt vastaanottamaan spatiaalisia ja spektrisiä signaaleita ja samalla minimoimaan kohinan. Aistisysteemiin saapuvan signaali-kohina-suhteen on siis oltava tarpeeksi tehokas, jotta signaali on hyödyllinen (Osorio & Vorobyev, 2008). Perhosilla on harvinaisen laaja spektrinen herkkyys (Osorio & Vorobyev, 2008) ja niillä voi olla jopa kahdeksan eri fotoreseptoria (Bálint ym., 2012). Tämän ansiosta niiden silmät pystyvät havaitsemaan pigmenttejä hyvin laajalta aallonpituusalalta, jopa ultraviolettiin saakka (Bálint

ym., 2012). Monilla perhosilla on näköpigmenttien lisäksi myös kolmivärinäkö sekä silmän sisäinen filttteriinti (Osorio & Vorobyev, 2008).

#### 4.1.1. Värit perhosten parittelukäyttäytymisessä

Väreillä on suuri merkitys perhosten parittelukäyttäytymisessä (Estrada & Jiggins, 2008). Kosintamenot ja parittelu on pitkä ja energiaa vievä prosessi. Tämän vuoksi perhoset käyttävät useita keinoja tehdäksään parittelukumppanin suhteen hyvän valinnan. Perhoset käyttävät eri sävyjä, saturaatioita ja kuvioita erottaakseen oman lajinsa yksilöt sekä yksilöiden sukupuolen (Estrada & Jiggins, 2008). Yksinkertainen mutta huomiota herättävä signaali on hyvin tärkeä potentiaalisen parittelukumppanin havaitsemisessa ja valitsemisessa etenkin ilmasta käsin monimutkaista taustaa vasten (Finkbeiner ym., 2014). Visuaalisten signaalien on huomattu toimivan esisignaaleina, joiden avulla voidaan jo ennen kosintamenoihin alkamista arvioida, onko kyseinen yksilö energian käytön arvoinen. Päätöksen jälkeen voidaan siirtyä kosintamenoihin ja itse paritteluun, jossa muut signaalit kuten feromonit sekä sukupuolialueiden yhteensopivuus pitävät huolen lopusta (Estrada & Jiggins, 2008).

Kuten mainitsin jo aikaisemmin, monilla perhosilla on rakennevärejä. Perhosilla nämä järjestäytyneet kolmiulotteiset rakenteet kehittyvät metamorfoosin aikana ja niiden rakentamiseen vaaditaan tietynlaisia rakennusaineita. Rakenneväri on siis merkittävä rakenteellinen kustannus, jonka ilmentäminen kertoo näin ollen suoraa yksilön hyvästä ravintoainetasosta ja geeneistä. Rakenneväri on siis tärkeä rehellinen signaali yksilöiden kunnosta ja suuri vaikuttaja parinvalinnassa (Kemp & Rutowski, 2007). Esimerkiksi *Morpho*-perhosilla on kaunis sininen rakenteellinen väri, joka vaihtuu violetiksi katsomiskulman vaihtuessa. Myös häiveperhosen (*Apatura iris*) siivistä on havaittavissa violetti häivähdys tietystä katsomiskulmasta, jota koiras käyttää naaraan huomion herättämiseen.

Värinäön ja siipien koevoluution on todettu olevan sidoksissa sukupuolidimorfismiin. Esimerkiksi naurisperhosen (*Pieris rapae*) koiraat ja naaraat ovat ihmissilmään hyvin samannäköiset, mutta koiraiden ja naaraiden violeteissa fotoreseptoreissa on eroavaisuuksia, joiden avulla ne pystyvät erottamaan hyvin pienet erot ultravioletissa värityksessä. Joillain lajeilla perhoskoiraalla ja -naaraalla voi olla myös täysin toisistaan poikkeavat väritykset, jolla on omat tarkoituksensa kosintamenoissa ja parinvalinnassa (Osorio & Vorobyev, 2008). On myös havaittu mielenkiintoista matkimista naarailla, jonka tarkoituksena on nimenomaan välttää energiaa tuhlaava parittelu. On esimerkiksi havaittu naaraan matkivan värityksellään

koirasta, jotta sitä ei valittaisi parittelukumppaniksi. Näin ollen naarat pystyvät hyödyntämään väritystä prezygoottisessa eristämisessä eli hedelmöittymisen estämisessä vaihtamalla esimerkiksi niiden UV-, heijastus- tai melanisaatioastetta (Estrada & Jiggins, 2008).

#### 4.1.2. Miten värit auttavat perhosia petojen välttelyssä

Perhoset hyödyntävät värejä myös petojen välttelyssä. Perhoset ovat monien lajien ravintoa ja ne ovat kehittäneet keinoja, joiden avulla ne voivat välttää pakenemisen, haavoittumisen tai menehtymisen. Visuaalisia signaaleja tähän tarkoitukseen on monia ja niiden taktiikat eroavat toisistaan paljon (Allen & Caro, 2017). Myös perhosilla esiintyy aposemaattista signalointia, jonka tarkoituksena on ilmoittaa saalistajalle olevansa huono kohde. Esimerkiksi punatäpläperhoset (*Zygaenidae*) ovat hyvin myrkyllisiä ja ilmoittavat siitä muille lajeille kirkkaan punaisilla täplillä mustalla pohjalla. Aposematismen erikoisempi muoto on batesian mimikri, jossa lajit, jotka eivät ole oikeasti myrkyllisiä matkivat oikeasti myrkyllisten lajien aposemaattista väritystä. Batesian mimikrin esimerkkinä on haavanlasisiipi (*Sesia apiformis*), joka matkii herhiläistä välttääkseen syödyksi tulemisen (Allen & Caro, 2017).

Matkintaa esiintyy perhosilla myös muissa muodoissa. Esimerkiksi perhosten siipien silmäkuviot voivat muistuttaa saalistajaa sen oman pedon silmistä. Esimerkiksi pöllökkäät (suku *Caligo*) matkivat pöllön silmiä, joka on monien esimerkiksi pienempien lintujen saalistaja (Allen & Caro, 2017).

Silmäkuviot ja muut varoittavat väritykset ovat usein yhdistetty siipien nopeisiin ja yllättäviin liikkeisiin, joiden tarkoituksena on herättää saalistajan luontainen pelkoreaktio. Näissä tapauksissa perhosilla voi olla suojaväri, johon ne pyrkivät turvautumaan mahdollisimman pitkään ja pedon tullessa liian lähelle ne väläyttävät värikkäät kuviot esille, jotka ovat piilossa takasiivissä tai siipien yläpinnalla. Esimerkiksi kulmaritariyökkösellä (*Catocala nupta*) on kirkkaan punainen varoitusväri sen takasiivissä ja harmaan ruskea suojaväri sen yläsiivissä. Perhosilla voi olla myös pelkkäsuojaväri, mutta on suositumpaa olla sekä suojaväri että pelotusväri. Eräs toinen hyvä esimerkkilaji on lehtiperhonen (*Kallima inachus*), jonka siivet näyttävät kuivalta lehdeltä niiden ollessa supussa, mutta kun se avaa ne, paljastuu värikkäät silmäkuvioilliset siiven sisäpinnat. Silmäkuviot toimivat myös harhauttaen hyökkäys vähemmän kuolettavaan osaan kehoa. Perhosilla tämä on siipien reunoissa, jolloin epäonnistuneen pelotusyrityksen seuraukset eivät olisi kuitenkaan kuolettavat (Allen & Caro, 2017).



Kuten esitelty perhosten väreille on kehittynyt ainakin viisi eri mekanismia petojen karkottamiseen. Jotkut niistä on rehellisiä, kun taas toiset epärehellisiä, jotkut saavat saalistajassa aikaan sen luontaisen pelkoreaktion, kun taas toiset opitun reaktion (Allen & Caro, 2017).

#### 4.2. Miten ilmastonmuutos vaikuttaa perhosiin

Perhosten reagoivat voimakkaasti ilmaston muutokseen sekä elinympäristöjen häviämiseen ja pirstaloitumiseen, sillä niiden ollessa tasalämpöisiä niiden genetiikka, fysiologia sekä morfologia ovat herkkiä ilmastollisille tekijöille. Perhoset demonstroivat myös hyvin ilmaston muutoksen monimutkaisuutta maantieteelliseltä kannalta, sillä jotkut lajit ovat kohdanneet paikallisia sukupuuttoja, kun taas jotkut populaatiot ovat jopa voimistuneet (Hill ym., 2021).

Ilmastonmuutos vaikuttaa perhosten kehittymisnopeuteen, vuodenaikaisrytmiin, lentoaikoihin ja tätä kautta levittäytymisalueeseen, lajien välisiin vuorovaikutussuhteisiin, populaatiokokoihin ja vähentyneeseen geneettiseen monimuotoisuuteen. Erityisesti specialistit lajit kokevat hankalaksi uusiin olosuhteisiin sopeutumisen tai uusien elinalueiden löytämisen. Sama koskee myös muita spesialisti lajeja kuten kasveja, joka voi vaikuttaa perhosiin muun muassa vähentyneen isäntäkasvimäärän kautta. Näyttää siis siltä, että generalistit osoittavat jopa positiivista reaktiota ilmaston muutokseen, kun taas specialistit kärsivät sitäkin enemmän (Ghazanfar ym., 2016).

Suuri syy miksi ilmaston muutos häiritsee lähes kaikkien perhoslajien ekologiaa, on perhosten elämänsyklin vuodenaikaisuus. Niiden elämänsyklin eri vaiheet ovat sidoksissa eri vuodenaikoihin tai kausittaisiin sääilmiöihin kuten sade- ja kuivakausiin. Vuodenaikojen ja sääilmiöiden kokiessa muutoksia vaaditaan perhosilta reagoimista kunkin kauden muutoksiin erikseen. Perhosten on huomattu vaihtavan niiden lisääntymisajakohtaa ympäristöolojen mukaan, jolla taas on mahdollisesti vaikutuksia niiden voltinismiin. Tämä taas voi vaikuttaa entisestään sopeutumiskykyyn sillä hyönteisten tuottama sukupolvien määrä vuodessa vaikuttaa niiden sopeutumismahdollisuuksiin. Populaatiot, jotka tuottavat enemmän sukupolvia vuodessa sopeutuvat muuttuviin olosuhteisiin nopeammin ja todennäköisemmin kuin muut lajit tai populaatiot (Hill ym., 2021).

Myös perhoset pyrkivät sopeutumaan muuttuviin ilmasto-oloihin pääasiassa fysiologisilla muutoksilla, käyttäytymisellä tai vaihtamalla aluetta. Käyttäytymiseen perustuva sopeutuminen on hyvin yleistä vaihtolämpöisillä organismeilla kuten perhosilla. Tähän

kuuluu muun muassa siipien asettelu suhteessa aurinkoon niin, että ne saavat optimaalisen määrän lämpösäteilyä (Bladon ym., 2020). Myös suotuisan mikroilmaston valitseminen on yksi yleisimmistä käyttäytymiseen liittyvää sopeutumiskeinoista ja koskee aikuisten yksilöiden lisäksi myös perhosten toukkia (Hill ym., 2021). Onkin todettu, että alueilla, joilla on enemmän vaihtelevia mikroilmastoja, tapahtuu vähemmän hyönteisten ja kasvien sukupuuttoja (Bladon ym., 2020).

Perhosten lämpösäätelyyn vaikuttaa paljon niiden morfologia kuten siipien väritys. Joillain lajeilla väritys on suuremmissa roolissa kuin toisilla ja tämän vuoksi esimerkiksi pelkkä mikroilmaston vaihtaminen ei riitä lämpötilan säätelyyn. Vaaleammilla lajeilla lämmönsietokyky on paljon korkeampi kuin tummilla lajeilla, mutta ne ovat tottuneet säätelemään ruumiinlämpöään käyttäytymisellään esimerkiksi valitsemalla aurinkoisemman paikan. Tummemmat lajit ovat tottuneet säätelemään ruumiinlämpöään siipien asennon ja värityksen avulla, joten kun tämä ei ole enää tarpeeksi lämpötilojen noustessa radikaalisti ne eivät välttämättä pysty sopeutumaan yhtä nopeasti kuten vaihtamalla aluettaan (Bladon ym., 2020). Joillain lajeilla on siis havaittu muutoksia esimerkiksi melanisaatioasteissa riippuen siitä, onko ilmasto niille liian kylmä vai kuuma (Maclean ym., 2015).

Värityksen lisäksi ilmastonmuutoksella on mahdollisesti vaikutuksia myös ruumiin kokoon. On havaittu, että suurempi kokoisilla yksilöillä siipien lämmittäminen vie vähemmän aikaa, josta voisi päätellä, että ruumiin koot tulisivat pienenemään. Tätä tukee havainnot arktisen alueen perhoslajeilla tundrahopeatäplällä (*Boloria chariclea*) ja lapinkeltaperhosella (*Colias hecla*), joiden ruumiin ja siipien koko on pienentynyt viimeisen 17 vuoden aikana lämpenevien vuosien seurauksena (Hill ym., 2021).

Joillekin lajeille on helpompaa vaihtaa aluetta sopeutumisen sijasta. Tämä voi johtua esimerkiksi geneistä, jotka edistävät lentokyvyn paranemista (Bladon ym., 2020). Levittäytymismahdollisuuden vaikuttaa myös sen hetkisen habitatin sijainti ja eristyneisyys sekä uuden alueen saatavuus. Jos elinalue on pirstaloitunut sieltä voi olla hankala siirtyä kaukana sijaitsevalle uudelle alueelle (Tainio ym., 2016). Ilmastonmuutos vaikuttaa myös perhosten vuorovaikutussuhteisiin. Lajien liikkuaessa alueelta toiselle ne kohtaavat uusia lajeja ja mahdollisesti uusia kilpailijoita, saalistajia sekä päällekkäin meneviä ekologisia lokeroita (Zografou ym., 2014, Bladon ym., 2020). Lajien fenologisten muutosten yhteensopimattomuus koskee myös perhosia ja tätä kautta vuorovaikutussuhteita muiden lajien kanssa. Kuten muidenkin hyönteisten kohdalla ensimmäisenä esille tulee kasvien ja

perhosten välinen pölytyssuhde, jonka kärsiessä koko ekosysteemi kärsii. Tämän lisäksi fenologisista yhteensopimattomuuksista voi kärsiä muutkin mutualistiset sekä multitrofiset suhteet (Diamond ym., 2011).

Perhosten erilaiset sopeutumisstrategiat kuvaavat lajien välisiä eroja haavoittuvuuksissa. Monet tutkimukset keskittyvät nimenomaan aikuisiin perhosiin ja niiden reagoimiseen ilmaston muutokseen. On kuitenkin muistettava, että yhtä tärkeässä asemassa perhosten ja tätä kautta koko ekosysteemin aseman kannalta ovat perhosten munat, toukat sekä kotelot. Näin ollen olisi tärkeää laajentaa tutkimusta perhosten muihinkin kehitysvaiheisiin, jotta saataisiin parempi kokonaiskuva perhosten ekologiasta ja ilmaston muutoksen vaikutuksista siihen (Bladon ym., 2020).

## 5. Pohdinta ja johtopäätökset

On hyvin selvää, että ilmastonmuutos muokkaa luontoa ja siellä olevia kokonaisuuksia. Jokaisella lajilla tulee olemaan omat haasteensa muuttuvien ympäristöolojen kanssa ja kukin laji tulee muokkaamaan ekosysteemejä omalta osaltaan. Vaikka monimuotoisuuden ja luonnon tasapainon kannalta jokainen laji ja yksilö on tärkeä, on kuitenkin tiettyjä lajeja, joilla on muita keskeisempi rooli ekosysteemin ylläpidossa. Näitä ovat muun muassa hyönteiset, jotka tarjoavat useita tärkeitä ekosysteemipalveluita parantaen ekosysteemien sietokykyä sekä ihmistenkin hyvinvointia.

Hyönteisiä ilmaston muutoksessa uhkaa eniten nousevat lämpötilat ja elinympäristöjen tuhoutuminen, jotka vaikuttavat hyönteisiin suorasti. Hyönteisten ollessa vaihtolämpöisiä ilmaston lämpötila on suuri vaikuttaja niiden elintoimintoihin. Ne ovat myös habitaattispesialisteja ja riippuvaisia muun muassa tietynlaisista mutualistisista suhteista kasvien kanssa, jonka vuoksi niiden elinympäristöjen tuhoutuminen voi olla kohtalokasta. Näiden lisäksi hyönteiset kohtaavat monia epäsuoria vaikutuksia, jotka tulevat esimerkiksi muiden lajien kuten kasvien kautta. Ilmaston muutoksen seuraukset menevät päällekkäin ja vuorovaikuttavat keskenään. Hyönteisten kohtaamat pienemmät muutokset voivat vaikeuttaa niiden sopeutumista suurempiin muutoksiin ja päinvastoin.

Ilmastonmuutokseen sopeutuminen ei ole suoraviivainen luonnonvalintaan perustuva ratkaisu muuttuvan ympäristön haasteisiin. Vaikka hyönteisillä onkin useita eri sopeutumiskeinoja ilmaston muutokseen, myös sopeutuminen itsessään tuo mukanaan konflikteja ja sekaannusta ekosysteemissä. Yksi merkittävimmistä muutoksen kohteista ovat lajien väliset vuorovaikutussuhteet, jotka muuttuvat monen asian seurauksena. Lajien muuttaessa uusille

alueille ja levittäytyessä uusille leveysasteille syntyy uusia kilpailusuhteita, peto-saalissuhteita sekä yleistä ekologisten lokeroiden päällekkäisyyttä, joka häiritsee lajien ekologiaa ja hankaloittaa niiden selviytymismahdollisuuksia. Uusien vieraslajien saapuessa alueelle vanhat alueella olleet suhteet voivat kärsiä tärkeitä mutualistiset vuorovaikutukset mukaan lukien. Ekosysteemien hierarkiaa, vuorovaikutussuhteita ja dynamiikkaa häiritsee lajien liikkumisen lisäksi myös lajien fenologiset muutokset. Vaikka lajien sijainti ei muuttuisikaan niiden elinprosessien ajalliset muutokset tuovat merkittäviä yhteensopimattomuuksia vuorovaikuttavien lajien ekologiassa. Näin ollen useat lajit, jotka sietävät ilmastonmuutosta paremmin joutuvat sopeutumaan muiden lajien muutoksiin ennen kuin ne joutuvat sopeutumaan ilmastonmuutoksen suoriin vaikutuksiin.

Värit ovat tärkeä työkalu hyönteisten ekologisissa prosesseissa. Niille on evoluution myötä kehittynyt useita tarkoituksia, jotka ovat osittain myös päällekkäisiä. Koska värit osallistuvat sekä vuorovaikutussuhteisiin että fysiologiseen sopeutumiseen niiden rooli ilmastonmuutoksen koskettamissa ekosysteemeissä on noussut entisestään. Ne tuovat vakautta ekosysteemiin, jonka kaikki lajit koittavat sopeutua muutoksiin omalla tavallaan.

Ilmastonmuutos kuitenkin haastaa värejä ja voi aiheuttaa konflikteja myös värien rooleissa. Etenkin värit, jotka palvelevat useaa tarkoitusta voivat kohdata erisuuntaista valintapainetta. Muutos värissä voi vaikuttaa positiivisesti sen toiseen funktioon ja negatiivisesti toiseen. Tästä esimerkkinä toimii tummat värit, jotka sisältävät melaniinia. Melaniini osallistuu perhosten lämpösäätelyyn ja UV-suojaan, sekä väreissä ja kuvioissa niiden kommunikointiin. Nouseva lämpötila suosii vaaleampia yksilöitä, koska auringonvalo ei lämmitä vaaleaa pintaa niin paljoa. Tämä voi kuitenkin alentaa UV-suojaa sekä haitata esimerkiksi aposemaattisia värejä, joissa on usein tummia kuvioita. Voisiko tästä esimerkiksi päätellä, että naamioitumisvärityksistä tulisi enemmän suosittuja kuin aposemaattisista väreistä?

Melaniini toimii myös puolustuksena taudinaiheuttajia vastaan, joten voidaan olettaa, että puolustuskeino niitä vastaan heikkenisi vähenevän melaniinin vuoksi. Melaniinin on myös huomattu auttavan kuivilla alueilla elämisessä. Näiden kuivien alueiden lämpötilan noustessa melaniinin tuoma tumma väritys kokee kuitenkin ristikkäistä valintapainetta, kun siitä on haittaa lämmöltä suojautumiseen, mutta se auttaisi kuivuutta vastaan.

Muutokset värityksissä voivat mahdollisesti hämmentää myös muita lajeja ja vuorovaikutussuhteita. Tämä koskee luultavasti jo mainittujen peto-saalissuhteiden lisäksi myös mutualistisia suhteita ja parittelukäyttäytymistä. Signaalointi auttaa lajeja myös

sopeutumaan muuttuviin ympäristöoloihin, joten jos muutoksia myös signaaleissa tapahtuu, voi se menettää merkityksensä auttavana tekijänä. Värit tulevat ilmastonmuutoksen vaikutuksesta väistämättä kehittymään tiettyihin suuntiin ja sopeutumaan palvelemaan uusia tarpeita. Ne tulevat varmasti kuitenkin säilyttämään roolinsa eläinten kommunikoinnissa ja toimimaan tärkeänä osana myös muita ekologisia prosesseja.

Ilmastonmuutoksen ekosysteemeihin kohdistuvia haasteita voi olla suoraa vaikea torjua tai ennallistaa. Sama koskee ihmisten aiheuttamia muutoksia kuten maankäyttöä, jonka seurauksena eliöiden elinympäristöjä on tuhoutunut. Jos esimerkiksi hyönteisten elinympäristöjä haluttaisiin ennallistaa, olisi tiedettävä tarkasti minkälainen mikrohabitaatti on niille optimaalinen. Tämä on haastavaa, koska ne ovat niin pieniä ja linkkinä niin suuressa eliöverkostossa, että sen ennallistaminen täydellisesti voi olla lähes mahdotonta. Ihmisten rakennusprojektit ja maankäyttö on tehnyt elinympäristöistä hyvin homogeenisia, joka ei tue luonnon monimuotoisuutta. Alueiden ennallistamisella voidaan mahdollisesti parantaa tilannetta, mutta se ei tule vastaamaan alkuperäistä monimuotoisuutta vaan tietty homogeenisuus ihmisen kädenjäljessä tulee aina säilymään.

Tulevaisuudessa hyönteisten rooli ekosysteemeissä tulisi ottaa vielä vakavammin. Hyönteisiä mahdollisesti vahingoittavat ihmisten toiminnot tulisi harkita hyvin tarkkaan myös eri lajien näkökulmasta, sillä vaikka mahdolliset vaikutukset pintapuolisesti vaikuttaisivat pieniltä, voi niillä olla niin kutsuttu perhosvaikutus ekosysteemien herkimpien lajien kautta myös ekosysteemin vahvimpiin lajeihin. Meillä on myös vielä paljon opittavaa hyönteisiltä ja perhosilta. Biologian tutkimusalojen lisäksi perhoset voivat auttaa kehittämään bioinspiroituja materiaaleja esimerkiksi tehokkaampia aurinkopaneeleja varten. Hyönteiset ja perhoset ovat siis salamyhkäinen ja liian vähän tutkittu luonnonvara, joka voi paljastaa tärkeimmät ominaisuutensa juuri nyt kun ihmiset koko muun maailman mukana etsivät kiihkeinä ratkaisuja luonnon kauneuden ja monimuotoisuuden ylläpitoon. Tätä tilaisuutta ei tule heittää hukkaan.

## 6. Lähteet

- Allen, W. L., & Caro, T. (2017). Interspecific visual signalling in animals and plants: a functional classification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 372. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0344>
- Badejo, O., Skaldina, O., Gilev, A., & Sorvari, J. (2020). Benefits of insect colours: a review from social insect studies. *Oecologia*, 194(1–2), 27–40. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04738-1>
- Bálint, Z., Kertész, K., Piszter, G., Vértesy, Z., & Biró, L. P. (2012). The well-tuned blues: The role of structural colours as optical signals in the species recognition of a local butterfly fauna (Lepidoptera: Lycaenidae: Polyommatainae). *Journal of the Royal Society Interface*, 9(73), 1745–1756. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0854>
- Batabyal, A., & Thaker, M. (2017). Signalling with physiological colours: high contrast for courtship but speed for competition Predator-prey space-use in the context of mate searching View project Stress and aversive learning in a wild vertebrate View project. *Animal Behaviour*, 129, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.05.018>
- Bladon, A. J., Lewis, M., Bladon, E. K., Buckton, S. J., Corbett, S., Ewing, S. R., Hayes, M. P., Hitchcock, G. E., Knock, R., Lucas, C., McVeigh, A., Menéndez, R., Walker, J. M., Fayle, T. M., & Turner, E. C. (2020). How butterflies keep their cool: Physical and ecological traits influence thermoregulatory ability and population trends. *Journal of Animal Ecology*, 89(11), 2440–2450. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13319>
- Briscoe, A. D., & Chittka, L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, 46, 471–510. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.46.1.471>
- Diamond S., Frame A., Martin R., & Buckley L. (2011). Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. *Ecology*, 92(5), 1005–1012. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1890/10-1594.1>
- Estrada, C., & Jiggins, C. D. (2008). Interspecific sexual attraction because of convergence in warning colouration: is there a conflict between natural and sexual selection in mimetic species? *Journal of Evolutionary Biology*, 21(3), 749–760. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2008.01517.x>

- Finkbeiner, S. D., Briscoe, A. D., & Reed, R. D. (2014). Warning signals are seductive: Relative contributions of color and pattern to predator avoidance and mate attraction in *Heliconius* butterflies. *Evolution*, 68(12), 3410–3420. <https://doi.org/10.1111/evo.12524>
- Garcia, M., Theunissen, F., Sèbe, F., Clavel, J., Ravignani, A., Marin-Cudraz, T., Fuchs, J., & Mathevon, N. (2020). Evolution of communication signals and information during species radiation. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18772-3>
- Ghazanfar, M., Malik, M., Hussain, M., Iqbal, R., & Younas, M. (2016). Butterflies and their contribution in ecosystem: A review. *Journal of Entomology and Zoology studies*, 4(2), 115–118. <https://www.researchgate.net/publication/308610199>
- Gruson, H., Andraud, C., de Marcillac, W. D., Berthier, S., Elias, M., & Gomez, D. (2019). Quantitative characterization of iridescent colours in biological studies: A novel method using optical theory. *Interface Focus*, 9(1). <https://doi.org/10.1098/rsfs.2018.0049>
- Hill, G. M., Kawahara, A. Y., Daniels, J. C., Bateman, C. C., & Scheffers, B. R. (2021). Climate change effects on animal ecology: butterflies and moths as a case study. *Biological Reviews*, 96(5), 2113–2126. <https://doi.org/10.1111/brv.12746>
- Kemp, D. J., & Rutowski, R. L. (2007). Condition dependence, quantitative genetics, and the potential signal content of iridescent ultraviolet butterfly coloration. *Evolution*, 61(1), 168–183. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00014.x>
- Maclean H., Kingsolver J., Buckley L., Burch C., Dunn R., Pfennig D. (2015). Adaptation to climate and climate change in Rocky Mountain butterflies: Morphology, physiology, and behavior. *Hill Pro Dissertations Publishing*, 3703857. <https://www.proquest.com/openview/5ad03c4fbff106e63883c04f34d1bb28/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- Menzel, F., & Feldmeyer, B. (2021). How does climate change affect social insects? *Current Opinion in Insect Science*, 46, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.01.005>
- Osorio, D., & Vorobyev, M. (2008). A review of the evolution of animal colour vision and visual communication signals. *Vision Research*, 48, 20422051. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.06.018>

- Patricelli, G. L., & Hebets, E. A. (2016). New dimensions in animal communication: the case for complexity. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 12, 80–89.  
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.09.011>
- Scudder, G. G. E. (2017). The Importance of Insects. *Insect Biodiversity*, 9–43.  
<https://doi.org/10.1002/9781118945568.CH2>
- Tainio A., Heikkinen R., Heliölä J., Hunt A., Watkis P., Fronzek S., Leikola N., Lötjönen S., Mashkina O., Carter T. (2016). Conservation of grassland butterflies in Finland under a changing climate. *Regional Environmental Change*, 16(1), 71–84.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-014-0684-y>
- Tylianakis, J. M., Didham, R. K., Bascompte, J., & Wardle, D. A. (2008). Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 1351–1363.  
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01250.x>
- Yang, L. H., Postema, E. G., Hayes, T. E., Lippey, M. K., & Macarthur-Waltz, D. J. (2021). The complexity of global change and its effects on insects. *Current Opinion in Insect Science*, 47, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.05.001>
- Zografou K., Kati V., Grill A., Wilson R., Tzirkalli E., Pamperis L., & Halley J. (2014). *PLOS ONE*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087245>