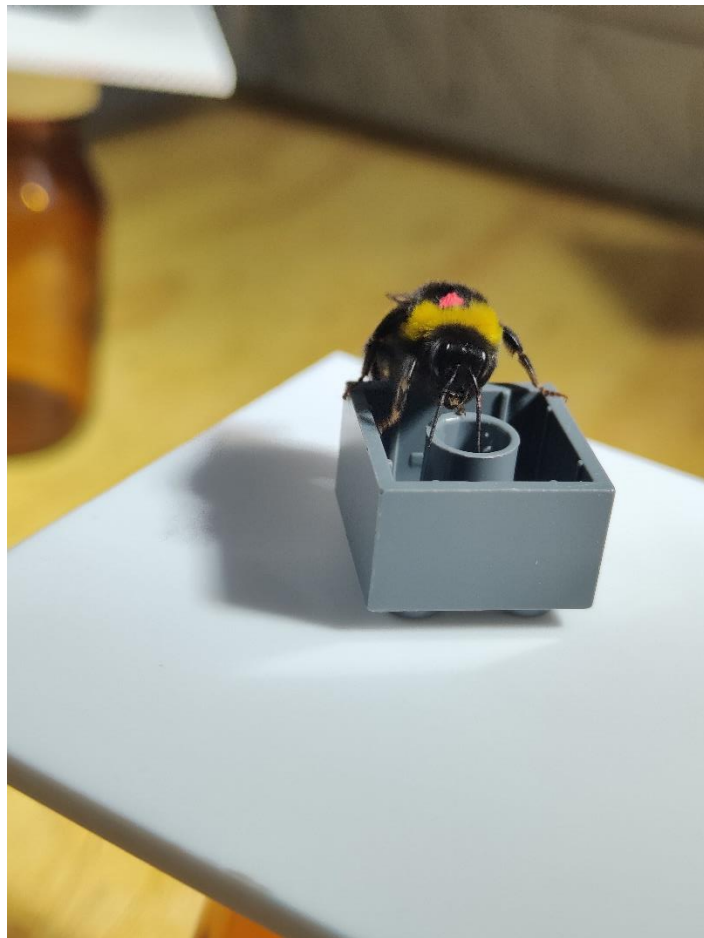


Kognition tutkimus kimalaisilla: kysymykset ja menetelmät



Enni Manninen
LuK-tutkielma (750376A)
Biologian tutkinto-ohjelma, Ekologia
Oulun yliopisto
Huhtikuu 2024

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
1. Johdanto	3
1.1. Assosiatiivinen oppiminen	5
1.2. Sosiaalinen oppiminen ja kulttuuri	6
2. Menetelmät.....	7
2.1. Assosiatiivinen oppiminen ja kognitio	7
2.1.1. Värioppiminen	7
2.1.2. Imukärsän ojennusrefleksi	8
2.1.4. Spatiaalinen kognitio	10
2.1.3. Numeerinen kognitio	12
2.2. Ongelmanratkaisusta kulttuuriin	15
2.2.1. Aistienvälinen objektintunnistus	15
2.2.1. Narunveto.....	15
2.2.2. Pallonpyöritys	18
2.2.4. Pulma laatikkokoe.....	19
2.2.5. Palikkakoe	22
3. Pohdinta	23
4. Lähteet.....	26

Tiivistelmä

Kimalaiset (*Bombus spp.*) ovat aitomehiläisiin (*Apidae*) kuuluvia mesipistiäisiä ja ovat tärkeitä villien kasvien ja viljelyskasvien pölyttäjiä. Eläinten käyttäytymisen ja kognition eli älykkyyden tutkimus on tärkeää, jotta voisimme ymmärtää paremmin myös ihmisten älykkyyttä ja älykkyyden evoluutiota. Erityisesti selkärangattomia, kuten kimalaisia on kauan pidetty älykkyydeltään kaikista alhaisimpana verrattuna ihmiseen. Kuitenkin viime aikoina on tutkittu paljon mesipistiäisten, kuten kimalaisten kognitiota ja kehitetty erilaisia menetelmiä sen tutkimukseen. Tässä tutkielmassa käyn läpi erilaisia kysymyksiä ja menetelmiä kimalaisten kognition tutkimukseen liittyen sekä kognition tutkimuksessa yleisesti käytettyjä käsitteitä.

Kimalaisilla on havaittu monenlaisia kognitiivisia kykyjä. Kimalaiset kykenevät assosiativisen oppimisen eri tasoihin, ongelmanratkaisuun, yhteistyöhön, sosiaaliseen oppimiseen ja niillä on jopa kognitiiviset kyvyt kulttuurin muodostumiselle. Näitä kykyjä on tutkittu hyödyntäen kimalaisen eri aisteja. Kognition tutkimuksen apuna on käytetty mm. värioppimista, hajuoppimista, spatiaalista ja numeerista kognitiota, pallon pyörittämistä, narunvetoa, pulmalaatikkoa ja palikantyöntöä. On myös havaittu, että kimalaiset kykenevät aistien väliseen objektintunnistukseen, eli keräämään tietoa useammalla aistilla ja yhdistämään ne tiedot mielikuviksi ympäröivästä maailmasta, aivan kuten ihmisetkin.

Tätä tutkielmaa tehdessäni olen kerta toisensa jälkeen yllätynyt kimalaisten kognitiivisista kyvyistä. Kognition tutkimuksen menetelmät ovat olleet kekseliäitä ja niiden avulla on pystytty kuvaamaan hyvin kimalaisen käyttämiä kognitiivisia kykyjä luonnossa ja epäluonnollisissa olosuhteissa. Kimalaiset ovat hyvin joustavia ja kykenevät ratkaisemaan uusia ongelmia, joita ei esiinny luonnossa. Tosin aitomehiläisten numeerisen kognition tutkimus on tuottanut ristiriitaisia tuloksia ja viimeisimmän tutkimuksen mukaan tarhamehiläiset ratkaisevatkin numeerisia tehtäviä ilman numeerista prosessointia ja siten ikään kuin hujjaavat matematiikan kokeessa. Tämä voi päteä myös kimalaisen numeeriseen kognitioon, josta odotan innolla lisää tutkimusta. Lisäksi tuoreen pulmalaatikkokokeen tulosten perusteella tutkijat arvioivat, että kimalaisilla havaittiin kumulatiivista kulttuuria, mutta tutkimuksessa annettu määritelmä ei ollut täysin vakuuttava syistä, joita käsittelen Pulmalaatikkokoe-kappaleessa. Kimalaisen kognition tutkimuksen pohjalta voimme ymmärtää paremmin kimalaisten ekologiaa ja siten mahdollisia syitä pölyttäjäkatoon. Tutkimusta voidaan soveltaa robotiikan ja tekoälyn kehittämiseen, sekä kimalaiset voivat toimia biosensoreina ja tunnistaa sairauksia tai esimerkiksi pommeja lentokentällä. Tutkimus lisää myös arvostusta ja empatiaa kimalaisia kohtaan ja siten kannustaa niiden suojeluun.

1. Johdanto

Eläinten käyttäytyminen ja oppiminen ovat kiinnostaneet eläintieteilijöitä jo 1600-luvulta lähtien. Tieteenalan kaksi merkittävintä vaikuttajaa olivat filosofi René Descartes ja luonnontieteilijä Charles Darwin. Descartes (1637/1994) teki selvän rajauksen ihmisten ja eläinten välille. Descartes uskoi, että eläimet ovat vain koneita, joiden käyttäytymistä ohjaa ainoastaan fyysiset mekanismit, kun taas ihmiset ovat rationaalisia ja heillä on sielu, joka mahdollistaa kyvyn kommunikoida puheen avulla ja säädellä omia reaktioita ympäristön ärsykkeisiin (Wasserman, 1997).

Darwin (1871/1920) toi esille Descartesista eroavia ajatuksia. Hän ehdotti, että ihmisillä ja eläimillä olisi sama alkuperä, ja että ihmiset ja eläimet eivät olleet keskenään kovinkaan erilaisia – kommunikointikykyä ja älykkyyttä oli havaittavissa läpi eläinkunnan. Darwinin tutkimuksen myötä ymmärrettiin, että eläinten käyttäytymisen tutkiminen on välttämätöntä, jotta voisimme ymmärtää myös ihmisen käyttäytymistä ja sen biologisia prosesseja paremmin (Wasserman, 1997).

Darwin kuitenkin asetti eläimet hierarkkiseen järjestykseen älykkyytensä mukaan, jonka huipulla oli mies. Tämän jälkeen tulivat nainen ja muut kädelliset, muut nisäkkäät ja ihan pohjalla ovat selkärangattomat, kuten hyönteiset ja mustekalat. Tämä on muokannut ihmisten suhtautumista selkärangattomiin eläimiin, mutta viime aikoina on huomattu, että eläinlajien laittaminen järjestykseen älykkyyden perusteella ei olekaan aivan niin yksinkertaista. On ymmärretty, että esimerkiksi mustekalat ovat hyvin älykkäitä, vaikka ne ovatkin selkärangattomia eläimiä (Schnell ym., 2021). Myös mesipistiäisten älykkyydestä on tehty paljon tutkimusta ja on huomattu, että ne kykenevät ongelmanratkaisuun, sosiaaliseen oppimiseen, mukautumaan uudentyyppisiin haasteisiin ja ne jopa leikkivät omaksi huvikseen (Alem ym., 2016; Bridges ym., 2023b; Galpayage Dona ym., 2022). Tämä herättää kysymyksen - mistä älykkyyks oikeastaan syntyy ja mitkä asiat siihen vaikuttavat?

Älykkyydelle ei ole kyetty antamaan yleisesti hyväksyttyä määritelmää, mutta älykkyyttä voidaan määritellä kyvyllä ja nopeudella ratkaista ongelmia selviytyäkseen luonnollisessa ja sosiaalisessa ympäristössä. Useat evoluutiopsykologit ja kognitioekologit ovat erimielisyyksien jälkeen tulleet siihen tulokseen, että joustavuus, kyky mukautua uusissa ympäristöissä ja uusien ongelmien ratkaisussa on hyvä tapa mitata älykkyyttä (Roth & Dicke, 2005). Emery ja Clayton (2004) tutkivat artikkelissaan varisten ja ihmisapinoiden kognition yhtymäkohtia. Artikkelissaan he ehdottavat, että ei-verbaalinen monimutkainen kognitio voisi koostua joustavuudesta, kausaalisesta päättelystä, mielikuvituksesta ja tulevaisuuden ennakoinnista, ja että nämä ominaisuudet ovat yhteisiä esimerkiksi varislinnuilla ja ihmisapinoilla (Emery & Clayton, 2004).

Roth ja Dicke (2005) käsittelee artikkelissaan fyysisten ominaisuuksien ja älykkyyden yhteyttä. Älykkyys vaihtelee eri lajien ja ihmisten välillä, ja edelleen on epäselvää minkälaiset aivojen ominaisuudet korreloivat älykkyyden kanssa. Älykkyyttä on pyritty selittämään koolla, etuotsalohkon koolla, aivojen koolla suhteessa eläimen kokoon ja enkefalisaatiolla, joka ottaa huomioon ruumiin koon vaikutuksen aivojen kokoon, mutta mikään näistä ei ole pystynyt tyydyttävästi selittämään älykkyyden eroja eri lajien välillä (Chittka & Niven, 2009; Roth & Dicke, 2005).

Roth ja Dickie (2005) toteavat artikkelissaan, että aivokuoren neuronien määrä yhdistettynä aivokuoren säikeiden johtavuuteen korreloi parhaiten älykkyyden kanssa. Tämän määritelmän perusteella ihminen on älykkäin, jonka jälkeen tulevat elefantit ja valaat, ja sitten vasta isot ihmisapinat. Tämä vaikuttaisi kuitenkin olevan ristiriidassa yleisen käsityksen kanssa, jonka mukaan ihmisapinat ovat heti ihmisen jälkeen älykkäimpiä eläimiä.

Eläinten älykkyydestä puhuttaessa käytetään usein termiä kognitio. Monimutkaisella kognitiolla viitataan siis älykkyyteen. Kognitio on havaitsemista, oppimista ja päätöksentekoa, eli informaation vastaanottamista ympäristöstä aistien avulla ja tiedon käsittelyä, säilyttämistä ja päätöksentekoa tiedon pohjalta (Shettleworth, 2001). Älykkyys siis pohjautuu kognitioon ja on käytännössä kognition tehokasta hyödyntämistä ongelmanratkaisussa.

Kimalaisten kognitiota, kuten muistia, konseptioppimista, sosiaalista oppimista, tarkkaavaisuutta, numeerista kognitiota ja spatiaalista kognitiota on tutkittu viime aikoina tarhamehiläisten (*Apis mellifera*) ohella verrattain paljon (Sherry & Strang, 2015). Kimalaisen aivot ovat hyvin pienet, noin seesaminsiemenen kokoiset, mutta silti ne pystyvät keksimään ratkaisuja uusiin ongelmiin ja oppimaan keinoja hankkia ruokaa, joita luonnossa ei esiinny (Alem et al., 2016; Chittka & Niven, 2009; Bridges et al., 2023; Loukola et al., 2017). Kimalaisen läheinen sukulainen tarhamehiläinen osaa kommunikoida lajitovereilleen ravinnon sijainnin tanssin avulla (*waggle dance*) (Sherry & Strang, 2015). Kimalaisilla on havaittu myös sosiaalista oppimista ja kognitiiviset kyvyt kulttuurin muodostumiselle (Alem ym., 2016; Bridges ym., 2023b; Loukola ym., 2017). Lisäksi tuore tutkimus kertoo, että kimalaiset kykenevät myös yhteistyöhön lajitovereidensa kanssa (Loukola ym. 2024). Kimalaiset eivät pysty kilpailemaan selkärankaisten kanssa aivokuoren neuronien määrällä tai aivokuoren säikeiden johtavuudella (Roth & Dicke, 2005). Ovatko kimalaiset älykkäitä ja mihin se perustuu?

Kimalaiset (*Bombus spp.*) ovat aitomehiläisten (*Apidae*) heimoon kuuluvia mesipistiäisiä ja läheistä sukua tarhamehiläisille. Kimalaiset ovat tärkeitä villien kasvien ja viljelyskasvien pölyttäjiä. Kimalaiset ovat tarhamehiläisten kanssa muista *Apidae*-heimon pistiäisistä poiketen aitososiaalisia, eli kimalaiset elävät yhdyskunnissa, joissa yksilöt jakautuvat kasteihin morfologisten ominaisuuksien mukaan. Kimalaisilla kasti määräytyy pääasiassa koon mukaan. Kimalaisyhdyskunnan perustaa yksi kuningatar ja pesän työläiset ovat kuningattaren jälkeläisiä (Sherry & Strang, 2015). Tässä tutkielmassa käyn läpi kimalaisten kognitiivisia kykyjä ja menetelmiä niiden tutkimiseen. Samalla käyn läpi eläinten kognition tutkimuksen peruskäsitteitä ja teorioita.

1.1. Assosiativinen oppiminen

Assosiativinen oppiminen (*engl. Associative learning*) Giurfa (2007) mukaan on kykyä hahmottaa satunnaisten tapahtumien välillä olevia yhteyksiä ja muuttaa käyttäytymistä kokemusten pohjalta tilanteeseen sopivammaksi. Se on kykyä vähentää epävarmuutta ympärillä tapahtuvista tapahtumista ja löytää loogisia ja johdonmukaisia yhteyksiä tapahtumien väliltä. Esimerkki assosiativisesta oppimisesta on, kun kimalainen oppii, että tietynlaisista kukista saa mettä ja toisista ei. Kimalainen oppii tällöin yhdistämään tietyt piirteet palkkioon ja toisenlaiset piirteet siihen, että palkkiota ei tule. Näiden kokemusten pohjalta kimalainen mukautuu tilanteeseen ja ei tuhlaa aikaa kukkiin, joista ei saa palkkiota.

Giurfa (2007) selittää artikkelissaan, että assosiativinen oppiminen voidaan jakaa kahdenlaiseen oppimiseen, alkeisoppimiseen (*engl. elemental learning*) ja monimutkaisempaan oppimiseen (*engl. non-elemental learning*). Alkeisoppiminen on oppimista, jossa opitaan yksiselitteinen yhteys tapahtumien välillä ja sen voi jakaa klassiseen ehdollistamiseen, jonka kehittämisestä Pavlov tuli tunnetuksi ehdollistettuaan koiransa kuolaamaan pelkän äänen seurauksena, ja välineelliseen ehdollistamiseen. Klassisessa ehdollistamisessa eläin oppii yhdistämään alkujaan neutraalin ärsykkeen (*conditioned stimuli = CS*), ei-ehdolliseen, eli biologisesti merkitsevään ärsykkeeseen (*unconditioned stimuli = US*), joka voi olla joko positiivinen tai negatiivinen, palkitseva tai rankaiseva. Kimalaisilla käytetään yleensä biologisesti merkitsevänä ärsykkeenä joko sokerivettä (positiivinen) tai kiniiniä, joka on erittäin kitkerän makuista (negatiivinen). Negatiivinen ärsyke voi olla myös palkkion poissaolo. Neutraalina ärsykkeenä voidaan käyttää kimalaisilla esimerkiksi hajua tai väriä. Pavlovin koirilla neutraalina ärsykkeenä käytettiin ääntä. Välineellisessä ehdollistamisessa taas eläin oppii yhdistämään oman käyttäytymisensä seuraukseen (Giurfa, 2007).

Monimutkaisempaa oppimista (*engl. non-elemental learning*) luonnehtii taas tapahtumien moniselitteisyys (Giurfa, 2007). Tällöin ei pystytä suoraan yhdistämään tiettyjä tapahtumia toisiinsa. Esimerkiksi, tilanne, jossa ärsyke A ja B ovat positiivisia, kun ne ilmestyvät erikseen (A+ ja B+), kun taas, jos nämä ärsykkeet ilmestyvät yhdessä, ne ovat negatiivisia (AB-). Tällöin eläimen täytyy oppia, että vaikka A on yksiselitteisesti palkitseva, kun se ilmestyy itsekseen, niin se ei ole enää palkitseva toisessa kontekstissa, eli silloin, kun se ilmestyy yhdessä ärsykkeen B kanssa. Tämä vaatii eläimeltä kykyä ymmärtää moniselitteisiä ja epäselvyyttä sisältäviä tilanteita.

1.2. Sosiaalinen oppiminen ja kulttuuri

Kysymys siitä, onko eläimillä sosiaalista oppimista ja kulttuuria ja sen merkitys eläimen kykyyn sopeutua ympäristöön on ollut pitkään väittelyiden alaisena. Kuitenkin useat julkaisut eläinten sosiaalisen oppimisen ja kulttuurin tutkimuksesta ovat lisänneet ymmärrystä aiheesta. Sosiaalista oppimista on havaittu eläimillä banaanikärpäsisistä (*Drosophila sp.*) simpansseihin (*Pan troglodytes*) (Battesti ym., 2012; Whiten ym., 2007). Eläimet käyttävät apunaan sosiaalista oppimista useissa selviytymiseen ja lisääntymiseen liittyvässä käyttäytymisessä, kuten parittelussa, munintapaikan valinnassa, pesinnässä, ruoan hankinnassa, petojen tunnistuksessa, työkalujen käytössä ja soidinmenoissa. (Galef, 2012; Loukola ym., 2013; White, 2004) Myös kimalaisilla on havaittu luonnossa sosiaalisen oppimisen avulla leviävää käyttäytymistä ruoanhankinnassa – kimalaiset varastavat mettä kukilta puremalla reiän kukan pohjaan tai käyttämällä valmista reikää jättäen kukan tällöin pölyttämättä (Leadbeater & Chittka, 2008).

Kulttuuri on tietylle ryhmälle ominaista käyttäytymistä, joka on kehittynyt sosiaalisen oppimisen seurauksena. Erilaisia kulttuureja on havaittu mm. perunoita pesevillä japaninmakakeilla (*Macaca fuscata*), maitopulloja avaavilla linnuilla, simpansseilla ja valailla (Tennie ym., 2009; ”The opening of milk bottles by birds.”, 1952; Whiten ym., 2007). Ihmisillä kulttuuri on kumulatiivista, eli kertynyt tieto periytyy aina seuraaville sukupolville (Galef, 2012). Joitain todisteita tästä on löydetty myös muualta eläinkunnasta, mutta se ei ole vakuuttanut kaikkia tutkijoita (Galef, 2012). Tutkijat ovat kritisoineet erityisesti väitettä siitä, että ihmisten ja eläinten kumulatiivinen kulttuuri olisi samaa kaltaista (Tennie ym., 2009).

Eläinten kulttuuria on tutkittu eläimiä tarkkailemalla ja myös laboratorionkokeilla. Esimerkiksi kimalaisten kykyä sosiaaliseen oppimiseen ja kulttuuriin on tutkittu laboratorio-oloissa opettamalla kimalaisille lajille epätyypillisiä tapoja saada ruokaa, kuten narunveto (Alem ym., 2016) ja pallon

pyörittäminen (Loukola ym., 2017). Kerron näistä tarkemmin seuraavassa osiossa, jossa käyn tarkemmin läpi erilaisia menetelmiä kimalaisen kognition tutkimiseen.

2. Menetelmät

Tässä osiossa käyn läpi kimalaisen kognition tutkimuksen eri menetelmiä. Ensin käyn läpi yksinkertaisempia assosiativisen oppimisen tutkimuksia, jonka jälkeen syvennyn monimutkaisemman oppimisen pariin, eli kimalaisten ongelmanratkaisukykyyn, sosiaaliseen oppimiseen ja kulttuuriin. Tutustumme myös kimalaisen spatiaalisen ja numeerisen kognition tutkimukseen.

2.1. Assosiativinen oppiminen ja kognitio

2.1.1. Värioppiminen

Kimalaiselle värioppiminen on tärkeä kognitiivinen kyky ruoanhankinnassa. Ruoanhankinnan täytyy olla tehokasta, jotta työläiskimalainen ehtisi kerätä tarpeeksi ruokaa pesälle. Tehokkuutta lisää, kun kimalainen pystyy erottamaan kukkien eri ominaisuuksien perusteella, että mistä kukista saa parhaiten ravintoa. Kimalaiset ovatkin yleensä kukkauskollisia, eli ne keräävät ruokaa vain yhdeltä tai muutamalta kukkalajilta (Waser, 1986). Kimalainen valitsee kukan värin, koon, muodon, kuvioinnin ja hajun perusteella, mutta näistä merkittävin vaikutus valintaan on värillä (Gumbert, 2000). Värioppiminen pohjautuu kykyyn erottaa eri värejä toisistaan (*engl. color discrimination*) ja on assosiativista oppimista.

Kimalaisilla on havaittu taipumusta synnyntäisiin värimieltymyksiin ja käsitys siitä, että kimalaiset suosivat sinisiä ja keltaisia kukkia perustuu Müllerin (1881) tekemiin havaintoihin kimalaisten kukkavierailuista eri värisillä kukilla (Gumbert, 2000). Gumbert (2000) testasi kimalaisten synnyntäistä värimieltymistä ja huomasi, että kimalaiset suosivat värejä 400–420 nm aallonpituuksilla, eli violetista tummansiniseen. Kokeessa ei käytetty keltaista väriä. Tutkimuksessa todettiin myös, että kimalainen kykenee tekemään yleistyksiä opitun värin pohjalta. Gumbert (2000) kuitenkin huomauttaa, että kimalainen kykenee myös erottamaan värit toisistaan, eli yleistys on assosiativista.

Kun koulutusvaiheessa oli käytössä tekokukkia, jotka olivat väriltään lähellä testivaiheen tekokukkien värejä, kimalainen suosi eniten sitä väriä, joka oli aallonpituudeltaan lähimpänä koulutusvaiheen väriä. Jos taas koulutusvaiheen kukat olivat kaukana testivaiheen kukkien väristä, kimalainen kääntyi sisäisten mieltymystensä puoleen ja suosi eniten violettia ja toiseksi eniten

tummansinistä kukkaa. Gumbert (2000) päätteli tulostensa pohjalta, että naiivit kimalaiset valitsevat kukkia synnynnäisten mieltymysten pohjalta ensimmäisellä lennolla ja kokeneet kimalaiset silloin, kun niiden suosimia kukkalajeja ei ole tarjolla ja ne joutuvat etsimään uusia ruoanlähteitä. Kimalaiset kuitenkin oppivat suosimaan myös muita värejä kumuloituvien palkitsevien kokemusten pohjalta, mutta uusien palkitsevien värien oppiminen ei myöskään kumoa synnynnäisiä mieltymyksiä. Voidaan siis todeta, että värioppimiseen pohjautuvaa tutkimusta suunniteltaessa kannattaa ottaa huomioon myös kimalaisten mahdolliset synnynnäiset värimieltymykset välttääkseen vinoumaa tuloksissa.

Tutkimuksissa kasvien tehoaineiden vaikutuksesta kimalaisen kognition on käytetty kimalaisten värioppimista hyödyksi. Helander ja kollegat (2023) tutkivat glyfosaattipohjaisten kasvien torjunta-aineiden vaikutusta kimalaisten värioppimiseen ja muistiin. Tutkimuksessa kimalainen altistettiin torjunta-aineannokselle, jolle kimalaiset voivat altistua hankkiessaan ravintonsa pelloilta. Kimalaisten oppimista ja muistia testattiin tämän jälkeen kymmenen värin kokeella, jossa kimalainen oppi assosioimaan viisi väriä palkintoon eli sokeriveteen ja viisi väriä ”rangaistukseen” eli kitkeränmakuihin kuniiniin (Helander ym., 2023). He huomasivat, että tehoaineelle altistuneiden kimalaisten oppiminen oli merkittävästi huonompaa, kuin kontrollikimalaisten. Kimalaiset, jotka altistettiin kasvin tehoaineelle oppimisvaiheen jälkeen, unohtivat testiin mennessä oppimansa, kun taas kontrollikimalaiset muistivat palkitsevat värit vielä kolmen päivän päästä koulutuksesta (Helander ym., 2023). Tämä voi heikentää yksilön ja pesän kelpoisuutta. Kahden värin kokeessa ja kymmenen hajun kokeessa ei huomattu eroa torjunta-aineelle altistettujen ja kontrollikimalaisten välillä (Helander ym., 2023).

Värioppimista on käytetty hyödyksi myös tutkimuksessa kimalaisen monimutkaisesta oppimisesta (Zhou ym., 2020). Tutkimuksessa tutkittiin vapaasti lentävän kimalaisen kykyä negatiivisen kaavan erotteluun (*engl. negative patterning discrimination*), eli kykyä ymmärtää, että kaksi positiivista ärsykettä erikseen ovat palkitsevia, mutta esiintyessään yhdessä ne ovat negatiivisia (A+, B+, AB-). Tutkimuksessa käytettiin eri aistiärsykeitä, eli värejä, kuvioita ja hajuja. Tutkimuksessa havaittiin, että kimalainen pystyi negatiivisen kaavan erotteluun kaikilla aistiärsykeillä. Zhou ja kollegoiden (2020) tutkimus on ensimmäinen, jossa on havaittu monimutkaisempaa korkean kognition oppimista (*engl. non-elemental learning*) kimalaisella.

2.1.2. Imukärsän ojennusrefleksi

Imukärsän ojennusrefleksi (*engl. proboscis extension reflex = PER*) on osa kimalaisen ruoankeruuseen liittyvää käyttäytymistä. Imukärsä ojentuu, kun kimalainen valmistautuu keräämään

mettä kukasta. Rajoitetuissa olosuhteissa, kuten koeolosuhteissa kimalainen ojentaa imukärsänsä vain, jos sen tuntosarvet ensin osuvat sokeriveteen (Lailoi ym., 1999). Kimalaisen oppimista on tutkittu hajuoppimisen ja imukärsän ojennusrefleksin avulla. Lailoi ja kollegat (1999) tutkivat, voiko kimalaisen opettaa ojentamaan imukärsän klassisen ehdollistamisen avulla pelkästä hajusta. Tutkimuksessa tehtiin kolme koetta. Kokeissa hajuärsykettä käytettiin ehdollisena ärsykkeenä (CS) ja sokerivettä ei-ehdollisena ärsykkeenä (US). Hajuärsyke oli puhdasta linalolia ja sokeriveden sokeripitoisuus oli 75 %. Ensimmäisessä kokeessa he jakoivat kimalaiset kahteen ryhmään. Toisen ryhmän kimalaisille annettiin haju (CS) ja sokerivesi (US) yhdessä, jotta kimalainen oppisi yhdistämään hajun ja sokeriveden toisiinsa. Toisen ryhmän kimalaisille tarjottiin näitä ärsykeitä erikseen. Ryhmien välillä huomattiin merkittävä ero imukärsän ojennusrefleksissä. Ryhmässä, jossa haju ja sokerivesi annettiin yhtä aikaa, 64,8 % kimalaisista ehdollistui ojentamaan imukärsän silloinkin, kun pelkästään haju oli läsnä, kun taas ryhmässä, jossa ärsykkeet annettiin erikseen vain 7,9 % kimalaisista reagoivat pelkkään hajuärsykkeeseen imukärsän ojennuksella. Kimalaisen imukärsän ojennusrefleksin ehdollistaminen siis onnistui. Muissa kokeissa testattiin eri hajun (fenyyliaasetaldehydi) ja palkkion konsentraation vaikutusta ehdollistamiseen. Näissä kokeissa huomattiin, että eri hajulla ei ollut merkitystä ja korkeampi sokeripitoisuus (75 %) palkkiossa aiheutti korkeamman tason reaktiot hajuärsykkeeseen, kuin matalampi sokeripitoisuus (20 % ja 40 %) palkkiossa.

Myös kimalaisen kykyä monimutkaisempaan oppimiseen (*non-elemental i.e. configural learning*) on tutkittu hajuoppimisen avulla (Sommerlandt ym., 2014). Tutkimuksessa tutkittiin kimalaisen kykyä erottaa palkitsevat hajut ei-palkitsevista hajusta, ensin klassisella erotteluehdollistamisella (S+ vs. S-, *engl. differential conditioning*) ja sitten vaikeammalla positiivisella kaavan erottelulla (A-, B-, AB+, *engl. positive patterning*) ja negatiivisella kaavan erottelulla (A+, B+, AB-, *engl. negative patterning*). Positiivisessa kaavassa kaksi yksittäistä hajua ovat erikseen ei-palkitsevia, mutta yhdessä esitettynä taas palkitsevia ja negatiivisessa kaavassa toisin päin. Ratkaistakseen tämän monimutkaisen ongelman, kimalaisen täytyisi hahmottaa, että yksittäinen ärsyke voi tarkoittaa eriä eri konteksteissa. Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset oppivat erottamaan palkitsevat hajut ei-palkitsevista (S+ vs. S-) hajusta riippumatta ja onnistuivat positiivisen kaavan erottelussa, mutta ei negatiivisen kaavan erottelussa. Sommerlandt ja kollegat (2014) päättelivät tutkimuksen tulosten perusteella, että kimalaisilla on kyky yksinkertaiseen (*engl. elemental*) oppimiseen, mutta eivät kykene suoriutumaan monimutkaisemmista (*engl. non-elemental*) erottelutehtävistä, kuten negatiivisen kaavan erottelusta. Mutta kuten mainitsin jo värioppimisen yhteydessä, Zhou ja kollegoiden (2020) taas havaitsivat

tutkimuksessaan, että kimalaiset kykenevät negatiivisen kaavan erotteluun eri aistiärsykkeillä, josta yksi aistiärsyke oli visuaalinen kuvio ja haju esitettynä yhtä aikaa.

2.1.4. Spatiaalinen kognitio

Spatiaalinen kognitio on perustavanlaatuinen ominaisuus kaikille eläimille. Spatiaalinen kognitio on kykyä hahmottaa tilaa. Tilan voi hahmottaa suhteuttamalla asioiden sijainteja itseensä eli egosentrisessä viitekehysessä, suhteessa toisiinsa eli objektiin keskittyvässä viitekehysessä tai suhteessa globaaleihin sijainteihin eli geosentrisessä viitekehysessä (Martin-Ordas, 2022). Esimerkiksi suunnistuskyyky, kognitiivisten karttojen muodostaminen ja kyky hahmottaa itsensä erillisenä ympäristöstä vaatii spatiaalista kognitiota. Spatiaalinen kognitio on erityisen tärkeä ravintoa etsiville eläinlajeille (Martin-Ordas, 2022). Kimalaiset, kuten muutkin sosiaaliset mesipistiäiset tarvitsevat spatiaalista kognitiota esimerkiksi ravinnon hankinnassa ja kotiin löytämisessä (Sherry & Strang, 2015). Niiden täytyy oppia löytämään ravintoa, muistaa ravinnonlähteiden sijainnit ja osata suunnistaa eri sijaintien välillä, kuten pesästä ravinnonlähteiden luokse ja vaihtelevista ja ennalta arvaamattomistakin paikoista takaisin pesälle (Sherry & Strang, 2015). Lisäksi kimalaiset käyttävät spatiaalista kognitiota parinetsinnässä ja loiskimalaiset etsiessään loisittavia pesiä (Sherry & Strang, 2015).

Ravinnonlähteiden löytämisen ja pesän löytämisen lisäksi kimalaiset oppivat muistamaan ravinnonlähteiden sijainteja. Kimalaiset käyvät ruokailemassa usein tutuilla ravinnonlähteillä, vaikka toisinaan ne myös etsivät uusiakin ravinnonlähteitä (Sherry & Strang, 2015). Kimalaiset aloittavat muutaman päivän jälkeen kuoriutumisen ruoanhankinnan (Sherry & Strang, 2015). Ensimmäiset päivät kimalaiset käyttävät kierrellen pesän lähiympäristössä, kunnes aloittavat pidemmät ravinnonlähteille kohdistuvat lentomatkat (Sherry & Strang, 2015). Ympäristön tutkiminen ensimmäisillä lennoilla muodostuu sarjasta silmukkamaisia lentoja joka suuntaan pesältä (Woodgate ym., 2016). Kimalaiset alkavat ruokailla jo ensimmäisillä lennoilla, mikä viittaa siihen, että ensimmäisten lentojen tarkoitus on sekä ympäristön tutkiminen että ravinnonlähteiden etsiminen (Woodgate ym., 2016).

Woodgate ja kollegat (2016) olivat ensimmäisiä, jotka tutkivat kimalaisen ruoanhankintakäyttäytymistä tallentamalla kontukimalaisen (*Bombus terrestris audax*) lentohistorian harmonisen tutkan (*engl. harmonic radar*) avulla kimalaisen ensimmäisestä lennosta kimalaisen lopulliseen katoamiseen pesästä ja tutkan kantoalueelta. Tutkimuksessa tallennettiin neljän kimalaisen koko lentohistoria. Tutkijat luokittelivat kimalaisen tekemät lennot joko

tutkimuslennoiksi tai ruoanhankintalennoiksi. Tutkimuslennot olivat lentoja tuntematto maan paikkaan tai koostuivat useista silmukkamaisista lennoista. Ruoanhankintalennot erosivat systemaattisesti kaikista muista lennoista – lentoon käytetty aika ja matkan pituus olivat lyhyempiä ja lentoreitti oli suurempi. Kimalaiset siis käyttivät ravinnonhankintalennoilla enemmän aikaa ruoankeruuseen, kuin lentämiseen ja lensivät suurempaa ja siten lyhyempää reittiä pesältä ravinnonlähteelle ja takaisin pesälle. Suurin osa lennoista oli ruoanhankintalentoja ja yksittäisen kimalaisen ruoanhankintalennot kohdistuivat lähes aina samalle ravinnonlähteelle.

Kimalaisten yksilölliset erot ruoanhankinnassa oli Woodgaten ja kollegojen (2016) tutkimuksen vaikuttavimpia tuloksia. Kaikkien kimalaisten lennot erosivat toisistaan merkitsevästi niin lentoretken keston, lentoon käytetyn ajan, lennon pituuden kuin reitin poikkeavuudenkin puolesta. Myös kimalaisten tutkimuslentojen strategiat erosivat yksilöiden välillä – osa kimalaisista lensi useamman silmukan yhden lennon aikana, kun toiset lensivät vain yhden silmukan ja palasivat takaisin pesälle. Osa kimalaisista teki vielä muutaman tutkimuslennon ruoanhankintalentoihin siirtyttyään, kun taas osa kimalaisista jatkoi ruoanhankintalentoja elämänsä loppuun saakka. Kaksi kimalaista vaihtoi ravinnonlähdettä palaamatta enää edelliselle ravinnonlähteelle. Matka uudelle ravinnonlähteelle oli lyhyempi, joten herää kysymys: vaihtoiko kimalainen ravinnonlähdettä lyhentääkseen matkaa? Toinen syy ravinnonlähteen vaihtamiselle saattoi olla kilpailu. Kaikkien kimalaisten lentohistoria sijoittui eri ajankohtiin, joten mahdolliset ravinnonlähteet vaihtelivat eri kimalaisten kohdalla. Ensimmäinen kimalainen ruokaili pääosin metsänreunassa karhunvatukoilla ja lehmuksilla, toinen ja kolmas kimalainen ruokaili pääosin ohdakkeilla, ja neljännen kimalaisen kohdalla ei ollut enää tiheitä kukkalaikkuja, joten se ruokaili todennäköisesti läheisessä puutarhassa. Yksilöiden erot saattoivat siis johtua geneettisistä eroista, ravinnonsaataavuudesta tai molemmista. Tutkimuksen tulokset kertoivat myös jotain kimalaisen spatiaalisesta muistista. Ensimmäinen kimalainen vaihtoi ravinnonlähdettään yhdeksän päivän jälkeen ensimmäisestä lennosta. Kimalainen lensi pesältä suoraan uudelle ravinnonlähteelle, jossa oli vierailut viimeksi ensimmäisillä tutkimuslennoillaan. Tämä viittaa siihen, että kimalainen kykenee muistamaan ravinnonlähteen sijainnin ainakin vielä yhdeksän päivän päästä.

Ruoanhankinnan tutkimuksen lisäksi kotiutuminen tuntemattomasta sijainnista on yleinen tapa tutkia eläimen spatiaalisia kykyjä (Sherry & Strang, 2015). Goulson & Stout (2001) tutkivat kimalaisen kykyä kotiutua takaisin pesälleen sen jälkeen, kun kimalainen oli ensin sijoitettu sille tuntematto maan sijaintiin 1–15 kilometrin päähän pesästä. Tutkimuksessa kimalaiset löysivät takaisin pesälle jopa 10 kilometrin etäisyydeltä, mutta takaisin löytämisessä saattoi kestää useita päiviä. Esimerkiksi paluu

3.5 km päästä saattoi kestää jopa yhdeksän päivää. Goulson & Stout (2001) päättelivät, että kimalaiset eivät luultavimmin käytä aurinkokompassia tai maan magneettikenttää suunnistaessaan vaan lensivät ympäriinsä etsien tuttuja maamerkkejä, joiden avulla pystyivät löytämään reitin takaisin pesälle. Tutkijat tekivät myös erään mielenkiintoisen huomion, kun myöhemmin yksi kimalainen löytyi neljän kilometrin päästä pesästä hankkimassa ravintoa paikalta, johon se oli aiemmin tutkimuksen aikana sijoitettu. Tämä kertoo kimalaisten ravinnonhankinnan alueiden laajuudesta.

Eläinten tapaa hahmottaa tilaa suhteessa itseensä tai ympäristöönsä on tutkittu niin selkärangattomilla kuin selkärangattomillakin (Martin-Ordas, 2022). Ihmisten tapa suhteuttaa asioiden sijainteja itseensä tai ympäristöön riippuu kielestä ja kulttuurista (Haun ym., 2006). Kädellisillä taas on havaittu, että ne suosivat asioiden sijaintien suhteuttamista ympäristöön (Martin-Ordas, 2022). Martin-Ordas (2022) tutki villien kimalaisten taipumusta ympäristöön tai itseen pohjautuvan viitekehyksen käyttöä pienen mittakaavan spatiaalisessa kokeessa. Tutkimuksessa käytettiin eri kimalaislajien yksilöitä, jotka oli pyydystetty luonnosta. Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset kädellisten tapaan suosivat ympäristöön perustuvaa viitekehystä pienen mittakaavan spatiaalisessa kokeessa, mutta ne kykenivät käyttämään sekä ympäristöön että itseen pohjautuvaa viitekehystä hyödyksi. Tämä kertoo siitä, että vaikka kimalaiset suhteuttavat sijainnin mieluummin suhteessa ympäristöön, ne kykenevät myös suhteuttamaan sijainnin suhteessa itseensä. Tämä viittaa siihen, että kimalainen kykenee hahmottamaan itsensä erillisenä ympäristöstä.

2.1.3. Numeerinen kognitio

Numeerista kognitiota, eli lukumäärien hahmottamista on tutkittu monilla eläimillä ja sitä on havaittu muun muassa kädellisillä, linnuilla, sammakkoeläimillä, kaloilla ja joillain selkärangattomilla (MaBouDi ym., 2020). Kimalaisten elinympäristössä on lukuisia ominaisuuksia, joiden numeerinen hahmottaminen on niiden selviytymisen kannalta tärkeää. Ruoanhankinnassa kimalaiselle voisi olla hyödyllistä hahmottaa esimerkiksi kukkien lukumäärä kukinnossa, jo käytyjen kukkien määrä tai kilpailijoiden määrä kukkalaikulla. Lisäksi kimalaiselle voisi olla hyödyllistä hahmottaa mm. tuotettujen munien lukumäärä tai hunajaa, siitepölyä tai jälkeläisiä sisältävien kennojen lukumäärä (Sherry & Strang, 2015). Useissa tutkimuksissa onkin havaittu, että kimalaiset ja tarhamehiläiset kykenevät numeeriseen erittelyyn (Sherry & Strang, 2015). Tarhamehiläisillä tehdyissä kokeissa on havaittu, että tarhamehiläiset käyttävät numeerisia vihjeitä suunnistaessa ja ruoankeruussa (Sherry & Strang, 2015).

Laskemista tai numeerista arviointia voi tehdä monella tavalla, kuten arvioimalla suhteellisia määriä (vähän vs. paljon), arvioimalla määrän nopealla vilkaisulla ilman varsinaista laskemista, eli subitoinnilla (*engl. subitizing*) tai laskemalla peräkkäin (*engl. sequential counting*) (Chittka & Geiger, 1995; Dacke & Srinivasan, 2008). Chittka & Geiger (1995) tutkivat tarhamehiläisen kykyä laskea maamerkkejä. Tutkimuksen tulokset viittasivat siihen, että mehiläinen kykenee laskemaan maamerkit perättäin. On tosin väitetty, että kyetäkseen aitoon laskemiseen, täytyy osata siirtää kyky laskea tiettyjä esineitä myös toisenlaisiin esineisiin (Chittka & Geiger, 1995). Tätä kutsutaan abstraktioperiaatteen toteutumiseksi (*engl. abstraction principle*). Chittka & Geiger (1995) eivät testanneet abstraktioperiaatteen toteutumista mehiläisillä, joten he päättelivät, että mehiläiset kykenevät ainakin protolaskentaan (*engl. protocounting*), mikä on laskemista ilman abstraktioperiaatteen toteutumista. Chittka & Geiger (1995) ehdottavat, että mehiläisen protolaskentakyky ei esiinny abstraktilla kognitiivisella tavalla vaan on suoraan kytköksissä ravinnonhankintaan, siten että mehiläiset muistavat ohitettavat perättäiset maamerkit ravinnonlähteelle. Tarhamehiläisten kykyä laskea on sittemmin tutkittu lisää ja Dacke & Srinivasan (2008) havaitsivat, että mehiläiset kykenivät laskemaan maamerkkejä perättäisellä laskennalla abstraktioperiaatteen mukaan, vaikka testivaiheessa maamerkkien muotoa ja kokoa muutettiin viivoista pienempiin ympyröihin. Eli numeroiden oppiminen ja käyttäminen onnistui abstraktilla objektista riippumattomalla tavalla.

Kimalaisten numeerista kognitiota on tutkittu eri menetelmillä. MaBouDi ym. (2020) tutkivat kimalaisten kykyä ratkaista numeerisia tehtäviä. Kimalaiset koulutettiin ruokailemaan kukkia mallintavilla 7 senttimetriä halkaisijaltaan olevilla pyöreillä levyillä, jotka sisälsivät 1–4 kappaletta keltaisia kuvioita valkoisella pohjalla. Koulutuksessa kuviot olivat joko ympyröitä tai tähtiä ja eri levyillä oli eri kokoisia kuvioita. Testivaiheessa käytettiin koulutuksessa käytettyjen kuvioiden lisäksi myös kuvioita, jotka olivat muodoltaan, väriltään ja kooltaan uudenlaisia. Levyjen keskellä oli putki, jossa oli koulutusvaiheessa joko sokerivettä (positiivinen kannustin) tai kiniiniä (negatiivinen) ja testivaiheessa vettä (neutraali). Levyt kiinnitettiin lentoareenan takaseinään. Kimalaiset opetettiin erottamaan kaksi kuviota neljästä kuvioista tai yksi kuvio kolmesta siten, että osalle kimalaisista pienempi luku oli palkitseva (sokerivesi) ja suurempi luku rankaiseva (kiniini) ja osalle kimalaisista opetettiin toisin päin. Kimalaisille tehtiin kolme testiä: 1. oppimistesti, jossa katsottiin, osasiko kimalainen erottaa koulutusvaiheessa käytetyt kuviot toisistaan, 2. siirtotesti, jossa katsottiin, osasiko kimalainen siirtää opettelemansa palkitsevan kuviomäärän toisenlaisiin kuvioihin, jotka olivat eri kokoisia, muotoisia ja värisiä, ja 3. uusi numerositeettitesti, jossa yhdellä ja kolmella kuviolla koulutettujen kimalaisten piti valita kahden ja neljän kuvion väliltä ja toisin päin.

Tutkimuksen tuloksien perusteella voidaan sanoa, että kimalaiset pystyvät erottelemaan numeroita 1-4 välillä, kun ero numeroiden välillä oli enintään kaksi. Kimalaiset pystyivät tähän siitä huolimatta, että testivaiheessa käytetyt kuviot olivat uudenlaisia. Kokeet olivat kontrolloituja siten, etteivät kimalaiset pystyneet käyttämään mitään muita, kuin numeerisia vihjeitä. He päättelivät havaintojen pohjalta myös, että kimalaiset arvioivat kuvioiden määrää perättäisiä havaintoja tekemällä eli kimalaiset eivät tukeudu tässä subitointiin. Kimalaiset niin sanotusti laskevat kuviot yksitellen. Tämä ei kuitenkaan poista sitä mahdollisuutta, että kimalainen voisi laskea myös subitoinnilla esimerkiksi kaksi asiaa kerrallaan, mutta tämä vaatisi lisää tutkimusta. Mielenkiintoista oli myös se, että kimalaiset käyttävät enemmän aikaa suurempien lukumäärien tarkasteluun. Tämä viittaa siihen, että kimalaisen pitää säilyttää jo laskemansa kuviot työmuistissa, jotta se pysyy laskuissa. Yksitellen laskeminen vie aikaa, joten siksi kimalaisella kestää kauemmin skannata suurempia lukumääriä. Tutkimuksessa havaittiin myös, että kimalaiset välttävät jo laskettujen tekokukkien uudelleen tarkastamista, mikä viittaa siihen, että kimalainen pitää kirjaa jo käydyistä kukista. Kolmannen kokeen tuloksista he havaitsivat, että kimalainen valitsee pienempi-suurempi-periaatteella uusien numeroiden välillä, mikä viittaa siihen, että kimalainen osaa laskea vertailemalla suhteellisia osuuksia.

MaBouDi ym. (2021) tekivät vastaavanlaisen tutkimuksen tarhamehiläisillä, mutta tekivät myös lisätutkimuksia, joista kävi ilmi, että tarhamehiläiset käyttävät numeeristen tehtävien ratkaisuun symbolien lukumäärän sijasta niiden visuaalisia piirteitä, kuten tummien ja vaaleiden sävyjen esiintymistiheyttä. Tämä kertoo, että mehiläiset pystyvät ratkaisemaan numeerisen ongelmaratkaisutehtävän ilman numeerista prosessointia, mutta tämä ei kuitenkaan poissulje numeerisen kognition olemassaoloa mehiläisellä. Voi siis olla, että myös kimalainen ratkaisee numeeriset tehtävät ilman numeerista prosessointia, eli ”hujaa matikankokeessa”.

Tuoreimpia tutkimuksia kimalaisen kognitiosta on vuonna 2023 tehty tutkimus, jossa tutkittiin kimalaisen kykyä havaita numeerinen illuusio, jossa määrä pisteitä esitettynä rykelmänä näyttää suuremmalta määrältä, kuin sama määrä pisteitä esitettynä harvakseltaan (*engl. Solitaire illusion*) (Gatto ym., 2023). Kyseinen illuusio on yksi maailman kuuluisimmista numeerisista illuusioista ja sen väärin hahmottaminen on aiemmin havaittu vain ihmisillä. Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset tekevät saman väärin arvioinnin, kuin ihmiset, kun tarkastellaan kimalaisten lopullisia havaintoja, mutta Gatto ja kollegat (2023) arvioivat, että kimalainen käyttää ei-numeerisia vihjeitä, jotka korreloivat numeeristen elementtien kanssa. Kimalaiset oppivat todennäköisesti käyttämään vihjeenä rykelmiä, pisteiden tiheyttä tai pisteiden muodostamaa linjaa (Gatto ym., 2023).

2.2. Ongelmanratkaisusta kulttuuriin

Tässä osiossa syvennyn monimutkaisemman kognition tutkimukseen kimalaisilla, eli kimalaisen ongelmanratkaisukykyyn, sosiaaliseen oppimiseen ja käyn läpi tutkimuksia, joissa arvioidaan kimalaisen kykyä kulttuuriin. Samalla käyn läpi erilaisia menetelmiä, joita on käytetty näiden tutkimiseen kimalaisilla. Lopuksi käsittelen myös tuoretta tutkimusta kimalaisten kyvystä yhteistyöhön. Aluksi tutustumme kuitenkin kimalaisen aistien väliseen objektintunnistukseen, jota on pidetty merkkinä tietoisuudesta.

2.2.1. Aistienvälinen objektintunnistus

Aistienvälinen objektin tunnistus (*engl. Cross-modal object recognition*) tarkoittaa eläimen kykyä tunnistaa jokin esine eri aisteilla siten, että eri aisteilla tehdyt havainnot yhdistetään toisiinsa (Solvi ym., 2020). Esimerkiksi ihminen pystyy tunnistamaan pelkällä tuntoaistilla esineen, jonka on aiemmin nähnyt (Solvi ym., 2020). Solvin ja kollegoiden (2020) mukaan tätä on havaittu tunto- ja näköaistilla ihmisillä, ihmisapinoilla, apinoilla ja rotilla, sekä delfiineillä kuulo- ja näköaistilla ja kaloilla sähkö- ja näköaistilla. Aistien välinen objektin tunnistus vaatii ihmisillä mielikuvitusta, jonka taas ajatellaan olevan tietoisuuden pohja (Solvi ym., 2020). Onkin siis erittäin mielenkiintoinen kysymys, että kykenevätkö kimalaiset tähän.

Solvi ja kollegat (2020) tutkivat kimalaisten kykyä tunnistaa eri muotoisia objekteja (pallo ja neliö) pelkästään tuntoaistin perusteella ja yhdistämään tuntokokemuksensa objektiin tilanteessa, kun kimalaisella on käytössään ainoastaan näköaisti ja toisinpäin. Tutkimuksessa testattiin, osaako kimalainen tunnistaa aiemmin palkitsevan esineen eri aistilla, millä se oli aiemmin opetellut tunnistamaan esineen. Testeissä kimalaiset viettivät enemmän aikaa kontaktissa aiemmin palkitsevaksi opitun esineen kanssa, jonka muodon kimalainen oli oppinut ensin ainoastaan näköaistin tai tuntoaistin avulla. Kimalainen kykenee siis yhdistämään eri aisteilla tehdyt havainnot toisiinsa, joka vaatii kykyä luoda mielikuvia ympäröivästä maailmasta. Tämä viittaa siihen, että kimalainen kykenee keräämään tietoa useammalla aistilla ja yhdistämään ne tiedot mielikuviksi ympäröivästä maailmasta, aivan kuten ihmiset ja muut isoivoiset eläimet (Solvi ym., 2020).

2.2.1. Narunveto

Alem ja kollegat (2016) tutkivat kimalaisen (*B. terrestris*) kykyä ratkaista narunvetotehtävä, jossa kimalainen oppii hankkimaan ravintoa vetämällä narusta. Narunvetotehtävän avulla voidaan selvittää, kykeneekö kimalainen oppimaan ravinnonhankintatekniikan, jota ei esiinny luonnonvaraisilla kimalaisilla. Tutkimuksessa selvitettiin myös, että oppivatko naiivit kimalaiset narunvedon

demonstraattoreilta, ja miten se tapahtuu. Lisäksi tutkimuksessa tarkkailtiin, miten narunveto levisi pesän muille yksilöille käyttämällä avoimen leviämisen menetelmää (*engl. open diffusion paradigm*). Kimalaiset koulutettiin vetämään narusta asteittaisella koulutuksella, jossa aluksi kimalainen oppi ruokailemaan tekokukalla, johon oli kiinnitetty naru. Tässä vaiheessa kimalainen oppi assosioimaan sinisen tekokukan palkitsevaan sokeriveteen. Asteittainen koulutus koostui neljästä vaiheesta, jossa tekokukat asetettiin vaiheittain kauemmas läpinäkyvän pöydän alle kimalaisen ulottumattomiin. Neljännessä vaiheessa ainoa tapa päästä käsiksi sokeriveteen, oli vetää tekokukan narusta, kunnes tekokukka tuli esiin pöydän alta.

Kimalaisista 23/40 yksilöä oppi vetämään narusta asteittaisella koulutuksella. Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset tarvitsevat visuaalisen palautteen (*engl. perceptual feedback*), eli niiden tarvitsee nähdä, että tekokukka liikkuu lähemmäs, kun kimalainen vetää narusta. Kun sinisellä tekokukalla koulutetut kimalaiset altistettiin testille, jossa ne eivät nähneet tekokukan liikkumista, vain 2/15 kimalaisesta osasi ratkaista narunvetotehtävän ja loput eivät edes yrittäneet vetää narusta, koska eivät havainneet tekokukkaa. Tosin 48 tunnin koulutuksen jälkeen 11/15 oppi vetämään narusta ilman tekokukan näkemistä. Kimalaiset oppivat todennäköisesti yhdistämään palkkion naruun, eivätkä enää tarvinneet visuaalista palautetta sinisen kukan läsnäolosta tai liikkumisesta.

Ilman asteittaista koulutusta tai sosiaalista oppimista kaksi kimalaista onnistui ratkaisemaan narunvetotehtävän. Nämä innovaattorit olivat kuitenkin huomattavasti hitaampia ratkaisemaan tehtävän, kuin kokeneet koulutetut tai sosiaalisesti oppineet kimalaiset. Mielenkiintoista oli, että kimalaiset erosivat muista kimalaisista ”persoonallisuudeltaan” siten, että ne olivat erityisen utkivia ja yrittivät monenlaisia keinoja ratkaista tehtävän, kunnes liikutettiin vahingossa narua yrittäessään yltää kukkaan pöydän alla. Kimalainen voi siis oppia narunvedon itsenäisesti, mutta tämä on harvinaista. Kokeiden aikana testattiin 291 naiviä kimalaista kerran ja 110 kahdesti ilman asteittaista tai sosiaalista oppimista, mutta näiden kahden innovaattorin lisäksi, yksikään ei onnistunut ratkaisemaan narunvetotehtävää. Narunvedon innovaatio kimalaisilla johtuu luultavasti kimalaisen erityisen utkivasta ”persoonallisuudesta” tai hyvästä tuurista.

Tutkimuksessa tutkittiin kimalaisen sosiaalista oppimista, asettamalla naivi kimalainen läpinäkyvään kammioon, josta se pystyi tarkkailemaan, kun kokenut kimalainen suoritti narunvetotehtävän. Narunvetotehtävän osasi ratkaista 60 % kimalaisista, jotka tarkkailivat toisen kimalaisen narunvetoa, mutta ratkaiseminen oli lähes yhtä hidasta, kuin innovaattorikimalaisilla. Tutkimuksessa testattiin myös, että millainen merkitys on sillä, että toinen kimalainen demonstroi narunvetoa. He

tekivät ”haamukokeen”, jossa tekokukka vedettiin pöydän alta läpinäkyvän siiman avulla ja tarkkaileva kimalainen pääsi tämän jälkeen ruokailemaan kukalla. Yksikään kimalaisista ei oppinut vetämään narua. Tämä viittaa siihen, että kimalainen tarvitsee toisen kimalaisen opettamaan narunvetotehtävän oppiakseen.

Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset kopioivat narunvetokäyttäytymistä kiinnittämällä huomiota demonstraattorikimalaisen sijaintiin (*engl. local enhancement*) ja toissijaisesti narunvetoon (*engl. stimulus enhancement*). Lisäksi kimalaiset käyttivät yritys-erehdys-oppimista, ratkaistessaan demonstraattorikimalaisen näyttämää narunvetotehtävää. Kimalaisten tarkkailuun pohjautuva oppiminen ei vaadi kimalaiselta tehtävän oivaltamista tai ymmärtämistä, vaan kimalainen pystyy ratkaisemaan narunveto tehtävän yhdistämällä useita yksinkertaisia assosiativisia mekanismeja ja yritys-erehdys-oppimista.

Tutkimuksen viimeisessä vaiheessa tutkittiin narunvedon leviämistä populaatiossa. Suurin osa koekolonioiden kimalaisista oppi narunvedon, kun taas kontrollikolonioissa yksikään kimalainen ei oppinut ratkaisemaan narunvetotehtävää. Koekolonioihin oli lisätty demonstraattorikimalainen, joka oli koulutettu vetämään narusta, kun taas kontrollikolonioissa demonstraattoria ei ollut. Sen lisäksi, että narunveto alkoi levitä pesässä, opittu käyttäytyminen jatkoi leviämistään demonstraattoreiden kuoltua. Useat kimalaiset oppivat narunvedon, vaikka eivät koskaan olleet kontaktissa alkuperäisten demonstraattorien kanssa, sillä aina seuraavista oppijoiden sukupolvesta tuli demonstraattoreita seuraaville sukupolville.

Tutkimuksessa havaittiin siis, että kimalainen kykenee ratkaisemaan narunvetotehtävän ja osa kykenee tekemään sen jopa ilman asteittaista koulutusta tai mahdollisuutta tarkkailla kokenutta demonstraattorikimalaista. Kimalainen kykenee myös oppimaan narunvedon tarkkailemalla ja sosiaalisen oppimisen kautta. Osaaminen säilyi populaatiossa myös demonstraattoreiden kuoltua. Alem ja kollegat (2016) ehdottavat tulostensa pohjalta, että kimalaisilla on kognitiiviset kyvyt, jotka mahdollistavat kulttuurin välittämisen ja että itseasiassa kulttuurin välittäminen ei vaadi korkeaa kognitiota, joka on mielletty ainoastaan ihmiselle ominaiseksi piirteeksi. Jos luonnossa kimalainen kohtaisi vastaavanlaisia haasteita ja ravinnonhankinta ja siten kulttuurin välittäminen seuraaville sukupolville ei keskeytyisi talven ajaksi, voisi tällainen tietylle ryhmälle ominainen käyttäytyminen levitä sukupolvelta toiselle.

2.2.2. Pallonpyörittäminen

Loukola ja kollegat (2017) tutkivat kimalaisen käyttäytymisen ja kognition joustavuutta pallonpyörittämissä tehtävällä, jossa kimalaisen piti pyörittää pallo tiettyyn sijaan saadakseen palkkion. Kaikki kimalaiset esikoulutettiin löytämään 30 % sokerivettä sisältävä pallo, joka oli asetettu ympyränmuotoiselle siniselle alustalle. Ensimmäisessä kokeessa koulutusta jatkettiin siten, että kimalaisen piti liikuttaa pallo alustan reunalta keskelle saadakseen palkkion. Tarvittaessa tutkija auttoi kimalaista ratkaisemaan tehtävän, käyttämällä muovista kimalaismallia kiinnitettynä läpinäkyvään tikkuun, jolla tutkija työnsi pallon alustan keskelle ja kimalainen sai palkkion. Testivaiheessa kimalainen sai kymmenen yritystä ratkaista tehtävä. Testivaiheessa kaikki kimalaiset osasivat kuljettaa pallon alustan keskelle ja saivat palkinnon. Tehtävän ratkaiseminen myös nopeutui joka yrityskerralla ja kimalaiset kuljettivat palloa joka kerta suoraviivaisemmin alustan reunalta maaliin.

Toisessa kokeessa testattiin sosiaalisen oppimisen vaikutusta kimalaisen suoriutumiseen. Koulutusvaiheessa alustalle oli asetettu kolme palloa, jotka kaikki olivat eri etäisyyksien päässä alustan keskikohdasta, johon pallo piti kuljettaa. Helpottaakseen kimalaisten suoriutumista tehtävästä, alustaan tehtiin urat, jotka veivät kohti keskustaa. Kimalaiset jaettiin kolmeen ryhmään, joista kahdelle demonstroitettiin kauimman pallon kuljettaminen keskelle. Ensimmäisessä ryhmässä demonstraattorina toimi koulutettu kimalainen ja toisessa käytettiin ”haamu”-demonstrointia, eli pallo kuljetettiin magneetin avulla alustan keskelle. Kolmannessa pallon liikuttamista ei demonstroitu ollenkaan, vaan pallo oli palkkion kanssa valmiiksi alustan keskellä. Kolmannessa versiossa testattiin, että kykeneekö kimalainen ratkaisemaan tehtävän ilman demonstraatiota pallon liikuttamisesta, kun testivaiheessa pallo on siirretty eri paikkaan. Koulutusvaiheen aikana kaksi lähintä palloa oli liimattuna alustaan kiinni, jotta voitiin varmistaa, että demonstraattori kuljettaa kauimman pallon alustan keskelle. Kun koulutusvaiheessa demonstroitettiin ainoastaan kauimman pallon kuljettaminen keskelle, pystyttiin koetilanteessa tarkkailemaan, että kopioiko kimalainen demonstraattoria kuljettamalla kauimman pallon keskelle, vai kuljettaako se maalia lähempänä olevia palloja.

Koevaiheessa kimalaiselle annettiin viisi minuuttia aikaa kuljettaa pallo maaliin, jonka jälkeen se sai palkkion (200 µl 30 % sokerivettä). Tutkimuksessa havaittiin, että sosiaalisella oppimisella oli vaikutus kimalaisen suoriutumiseen tehtävässä. Kimalaiset, jotka oppivat toisilta kimalaisilta, onnistuivat keskimäärin useammin ratkaisemaan tehtävän ja ratkaisuun kului vähemmän aikaa, kuin ”haamu”-demonstraattorin kouluttamilla kimalaisilla tai kimalaisilla, jotka eivät nähneet demonstraatiota ollenkaan. Kuitenkin ”haamu”-demonstraattoria tarkkailleet kimalaiset onnistuivat

useammin, kuin ne kimalaiset, jotka eivät nähneet demonstraatiota, eli pelkän liikkuvan pallon tarkkailu riitti kimalaisille tehtävän ratkaisuun. Lisäksi demonstraatiota tarkkailleet kimalaiset kuljettivat useimmiten keskustaa lähimpänä olleen pallon keskelle, mikä kertoo siitä, että kimalainen ei ollut kiinnostunut demonstraattorikimalaisen sijainnista (*engl. local enhancement*). Tämä kertoo, ettei kimalainen myöskään vain kopioinut suoraa demonstraattorikimalaisen käyttäytymistä, vaan muokkasi sitä tehokkaammaksi. Kun lähin pallo vaihdettiin mustaan palloon, kimalaiset silti valitsivat useimmin mustan pallon onnistuneissa kokeissa, joten kimalaiset eivät olleet kiinnostuneita myöskään pallon väristä (*engl. stimulus enhancement*). Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan sanoa, että kimalaiset kykenivät ennenäkemättömään joustavuuteen käyttäytymisessä, kun ne oppivat tarkkailemalla suorittamaan haastavan ongelmanratkaisutehtävän ja tekivät sen tehokkaammin, kuin demonstraattorit.

Pallonpyöritysmenetelmällä on tutkittu myös kimalaisen kykyä leikkimään omaksi ilokseen (Galpayage Dona ym., 2022). Tutkimuksessa havaittiin, että kimalaiset leikkivät puisella pallolla ja että leikkiminen oli sisäisesti palkitsevaa, toistuvaa, erosi muusta tarkoituksenmukaisesta käyttäytymisestä, ei liittynyt millään tavalla selviytymiseen ja tuli esiin stressittömissä olosuhteissa. Tutkimuksen olosuhteilla Galpayage Dona ja kollegat (2022) pystyivät pääättelemään, että käyttäytyminen ei ollut siivoamista, ruoanhankintaa tai parittelua tavoittelevaa käyttäytymistä. Tutkimuksessa havaittiin myös, että nuoret kimalaiset pyörittivät enemmän palloja, kuin vanhat ja että koiraat pyörittivät kauemmin, kuin naaraat. Galpayage Dona ja kollegoiden (2022) mukaan vastaavanlaisia havaintoja on tehty selkärankaisilla ja leikkimistä on aiemmin havaittu enimmäkseen nisäkkäiden poikasilla ja linnuilla.

2.2.4. Pulmalaatikkokoe

Kimalaisten ongelmanratkaisukykyä ja sosiaalista oppimista on tutkittu myös pulmalaatikkokokeen (*engl. puzzle box experiment*) avulla. Bridges ja kollegat (2023) tutkivat, voiko epäluonnollinen ruoanhankintatapa levitä yhdeltä koulutetulta kimalaiselta muille kouluttamattomille eli naiiveille kimalaisille sosiaalisen oppimisen kautta. He kehittivät pulmalaatikon, jonka avattua kimalainen sai palkkioksi sokerivettä. Pulmalaatikon sai aukaistua kahdella eri tavalla. Kokeessa he käyttivät kehittämänsä avoimen leviämisen menetelmää, joka mahdollisti ruoanhankintatavan leviämisen koulutetulta demonstraattorina toimivalta kimalaiselta naiiveille kimalaisille.

Demonstraattorikimalaiselle opetettiin yksi kahdesta tavasta avata laatikko. Kimalainen oppi pyörittämään pulmalaatikon kantta työntämällä joko punaista kielekettä myötäpäivään tai sinistä

kielekettä vastapäivään. Kun kantha oli pyöritetty tarpeeksi, palkkio eli sokerivesi paljastui kannen alta. Bridges ja kollegat (2023) tekivät tutkimuksessa kokonaisuudessaan kolme koetta. Ensimmäisessä ja toisessa kokeessa käytettiin yhden demonstraattorin avointa diffuusiota, eli demonstraattorina toimiva kimalainen esitti populaation muille yksilöille pulmalaatikon ratkaisun. Ensimmäisessä kokeessa annettiin avoimelle diffuusiolle aikaa kuusi päivää. Näiit kimalaiset oppivat onnistuneesti demonstraattorilta tämän uudenlaisen tavan hankkia ravintoa. Kontrollipopulaation kimalaisille ei opetettu pulmalaatikon ratkaisua, mutta ne saivat itsenäisesti tutustua pulmalaatikkoon. Tästä huolimatta kontrollipopulaatiossa kuitenkin yksi kimalainen onnistui ratkaisemaan pulmalaatikon, vaikkakin ratkaisi sen vain toisinaan.

Toisessa kokeessa haluttiin selvittää, että löytyisikö populaatiosta lisää oma-aloitteisia oppijoita, kun avoimen leviämisen aikaa pidennettiin kuudesta päivästä kahteentoista päivään. Kokeessa oli kaksi pesää, joissa oli demonstraattorikimalaiset ja kaksi kontrollipesää. Kaikissa pesissä 4–5 kimalaista oppi ratkaisemaan pulmalaatikon, paitsi C4 kontrollipesässä, jossa yllättäen 14 kimalaista oppi ratkaisun. Tämä viittaa siihen, että kimalaiset voivat oppia pulmalaatikon ratkaisun ilman sosiaalista oppimista, mutta kun he vertasivat kontrolli- ja koekimalaisten osaamista, he huomasivat, että koepesien kimalaiset aukaisivat huomattavasti enemmän pulmalaatikkoja. Koepesissä oli myös nähtävissä selkeä ero osaamisessa 1. ja 3. koulutuspäivien välillä ja koepesien kimalaisten osaaminen myös säilyi paremmin. Sosiaalinen oppiminen oli siis välttämätöntä, että pulmalaatikon ratkaiseminen tuli osaksi yksilön tai pesän käyttäytymistä ja osaamista.

Ensimmäisessä ja toisessa kokeessa huomattiin, että kimalaiset pidättäytyvät siinä tavassa aukaista pulmalaatikko, minkä ne olivat oppineet ensin demonstraattorikimalaiselta, senkin jälkeen, kun olivat löytäneet myös toisen tavan aukaista laatikon. Tämä kertoo myös sosiaalisen oppimisen merkityksestä. Tästä herää kuitenkin kysymys, että miten valinta tapahtuu silloin, kun populaatiossa on useampi demonstraattorikimalainen, jotka näyttävät kahta eri tapaa avata pulmalaatikat.

Bridges ja kollegat (2023) tutkimuksen kolmannessa kokeessa haluttiin selvittää, miten tietty käyttäytyminen lähtee leviämään populaation sisällä silloin, kun populaation demonstraattorit näyttävät kahta eri tapaa avata pulmalaatikko. Kokeessa edettiin muuten samalla tavalla kuin edellisissä, mutta koetta varten muodostettiin kaksi koepopulaatiota (1R2B2 ja 2R2B2), joista kumpikin muodostui kahdesta pesästä, joilla oli pääsy samalle lentoareenalle. Molempiin koepopulaatioihin sijoitettiin neljä demonstraattorikimalaista, joista kaksi demonstroi punaisen kielekkeen työntämistä myötäpäivään ja kaksi sinisen kielekkeen työntämistä vastapäivään. Toisessa

koepopulaatiossa (1R2B2) punaisen kielekkeen työntämisestä ja toisessa (2R2B2) sinisen kielekkeen työntämisestä tuli hallitseva käyttäytymismalli. 1R2B2-koepopulaatiossa molempien käyttäytymismallien suosio vaihteli kahdeksanteen päivään saakka, jonka jälkeen punaisen kielekkeen työntämisestä tuli suositumpi. Kahdenteentoista päivään mennessä 97.3 % pulmalaatikon avauksista oli tehty punaista kielekettä työntämällä. 2R2B2-koepopulaatiossa sinisen kielekkeen työntäminen oli dominoiva käyttäytymismalli kaikkina päivinä, lukuun ottamatta ensimmäistä päivää, jolloin punaisen kielekkeen työntäminen oli suositumpi.

Kun tarkastellaan tutkimuksen taitavien oppijoiden käyttäytymistä, eli kimalaisten, jotka suorittivat laatikon avaamisen enemmän kuin kymmenen kertaa, huomataan, että ne muodostivat yksilökohtaisen preferenssin toista käyttäytymistä kohtaan, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Kummassakin koepopulaatiossa osa kimalaisista kehittivät preferenssin sinisen kielekkeen työntämiseen ja osa punaisen kielekkeen työntämiseen. Kimalaiset saattoivat aluksi suorittaa kumpaakin käyttäytymismallia, mutta kunnes kimalaisella muodostui oma preferenssi jompaakumpaa käyttäytymismallia kohtaan, pysyi se sillä loppuun saakka. Yhden yksilön preferenssi punaista käyttäytymismallia kohtaan pysyi vielä kahden päivän ruoanhankintataulun jälkeen. Muutokset pesien preferensseissä ei johtunut yksilöiden mielenmuutoksista vaan se johtui ennemmin uusien oppijoiden syntymisestä, joille kehittyi oma henkilökohtainen preferenssi jompaakumpaa käyttäytymismallia kohtaan ja aiempien kimalaisten ruoankeruun lopettamisesta.

Bridges ja kollegoiden (2023) tutkimuksen tulokset todistavat, että kimalaiset kykenevät sosiaaliseen oppimiseen ja että uudenlaiset luonnossa esiintymättömät käyttäytymismallit voivat levitä populaation sisällä sosiaalisen oppimisen avulla. Samanlaisia tuloksia on saatu aiemmin esimerkiksi tiaisilla ja simpansseilla käyttäen samoja metodeja, eli avoimen leviämisen protokollaa (Aplin ym., 2015; Whiten ym., 2007). Yhtäläisyydet näiden tutkimustulosten välillä voivat kertoa samankaltaisista oppimisstrategioista tiaisten, simpanssien ja kimalaisten välillä. Tämä lienee ensimmäinen tutkimus, jossa on havaittu uudenlaisen käyttäytymismallin synty, leviäminen ja ylläpitäminen selkärangattomilla. Erityisen mielenkiintoisen tutkimustuloksista tekee se, että kädellisten ja lintujen tutkimuksissa näitä tuloksia on pidetty todisteena lajin kognitiivisesta kapasiteetista kulttuurin muodostumiseen. Voidaan siis todeta, että myös tämä tutkimus tukee päätelmää siitä, että kimalaisilla on kognitiivinen kapasiteetti kulttuurin muodostumiseen.

Hiljattain julkaistiin tutkimus myös kaksivaiheisesta pulmalaatikkokokeesta kimalaisilla, jossa kimalaiset oppivat ratkaisemaan kaksivaiheisen pulmalaatikon sosiaalisen oppimisen avulla, siten

että kimalainen ei saanut ensimmäisestä vaiheesta palkkiota (Bridges ym., 2024). Tosin tehtävä oli niin haastava, että demonstraattoriksi koulutettu kimalainen ei oppinut ensimmäistä vaihetta ilman, että se yhdisti sen ensin palkkioon, jonka jälkeen se oppi suorittamaan ensimmäisen vaiheen ilman palkkiota. Osa demonstraattorilta oppineista kimalaisista (5/15) taas oppivat tekemään kaksi vaihetta ilman välipalkkioita, sosiaalisen oppimisen avulla. Tosin tapa, jonka tarkkailijat oppivat demonstraattoreilta oli ns. puristautumistekniikka (*engl. squeezing*), jossa kaksivaiheinen liike muuttui yhdeksi jatkuvaksi liikkeeksi, jossa kimalainen oikaisi puristautumalla kahden kielekkeen välistä. Tästä herääkin kysymys: onko tämä käyttäytyminen todella kaksivaiheinen, jos kimalainen käsittää liikkeen yhtenäisenä jatkuvana liikkeenä ja siten assosioi molemmat vaiheet palkkioon? Bridges ja kollegat (2024), kuitenkin väittävät, että kimalaiset oppivat kaksivaiheisen pulmalaatikon ratkaisun sosiaalisesti, mitä kimalaiset eivät kyenneet ratkaisemaan itsenäisesti ja viittaavat tässä ihmisen kumulatiiviseen kulttuuriin, joka on luonnehdittu olevan käyttäytymistä, joka on liian monimutkaista opittavaksi itsenäisesti, mutta on kuitenkin mahdollista oppia sosiaalisesti. Toistaiseksi ainoastaan ihmisillä on katsottu olevan kumulatiivista kulttuuria (Bridges ym., 2024). Toisaalta demonstraattorikimalaiset eivät oppineet edes puristautumistekniikkaa ilman välipalkkioita, joten tällöin kimalainen oppi kuitenkin sosiaalisen oppimisen avulla jotain, mitä demonstraattorikimalaiset eivät kyenneet oppimaan itsenäisesti. Tosin lisätutkimukset, joissa tehtävä on todella kaksivaiheinen, olisivat tarpeen.

2.2.5. Palikkakoe

Loukolan ja kollegojen (2024) tuoreessa tutkimuksessa tutkittiin kimalaisten kykyä yhteistyöhön palikkakokeen avulla. Tutkimuksessa koulutettiin kimalaiset työntämään legopalikkaa yhdessä saadakseen palkinnon. Tutkimuksessa tehtiin myös viivästystesti, jossa päästettiin aluksi vain toinen kimalainen lentoareenalle. Viivästystestissä havaittiin, että kimalaiset odottivat pariaan ja reagoivat parin poissaoloon sekä läsnäoloon. Ensimmäisenä vapautetut kimalaiset pitkittivät ensimmäistä palikan työntöä pidempään, kuin kontrollikimalaiset, jotka oli koulutettu työntämään palikkaa yksin. Lisäksi ensimmäisenä vapautetut kimalaiset työnsivät palikkaa todennäköisemmin, kun pari oli läsnä. Tämä viittaa siihen, että palikkakokeessa kimalaisten yhteinen koordinaatio ei ole sattumanvaraista yksittäisten kimalaisten ponnistelua, vaan yhteistyötä, jonka tavoitteena on siirtää painava palikka ja saada palkkio.

Palikkakokeen lisäksi Loukola ja kollegat (2024) tekivät tunnelikokeen, jossa kimalaisten piti kulkea läpinäkyvän tunnelin läpi ja koskettaa ovea yhtä aikaa parinsa kanssa päästäkseen käsiksi palkintoon. Kimalaisten välillä oli läpinäkyvä seinä, jonka läpi kimalaiset pystyivät näkemään toisensa.

Viivästyskokeessa havaittiin, että parin kanssa koulutetut, ensimmäisenä vapautetut kimalaiset odottivat pariaan ja hidastivat vauhtiaan, ennen kuin koskettivat ovea. Ne myös pysähtelivät tunnelissa ja kääntyivät takaisin kohti pesää, kun paria ei näkynyt. Kimalaiset myös kääntyivät takaisin kohti ovea todennäköisemmin, kun pari tuli vastaan tunnelissa. Kontrollikimalaiset, jotka oli koulutettu kulkemaan tunnelin läpi ja koskettamaan ovea yksin, taas eivät käyttäytyneet näin. Videomateriaaleista havaittiin myös, että toisin kuin kontrollikimalaiset, parin kanssa koulutetut kimalaiset katsoivat pariaan kohti päästyään ovelle (Loukola ym., 2024).

Nämä tulokset viittaavat siihen, että kimalaiset kykenevät yhteistyöhön ja se pohjautuu sosiaaliseen vuorovaikutukseen (Loukola ym., 2024). Kimalaiset mahdollisesti ymmärtävät parin merkityksen koetilanteessa ja koordinoivat liikkeitään tilanteen mukaan (Loukola ym., 2024).

3. Pohdinta

Tätä tutkielmaa tehdessäni olen kerta toisensa jälkeen yllätynyt kimalaisten kognitiivisista kyvyistä. Kimalaiset kykenevät yllättävienkin tehtävien ratkaisemiseen ja oppimaan toisiltaan sosiaalisen oppimisen avulla. Kimalaisilla on myös kognitiivinen perusta kulttuurin muodostumiseen ja ne kykenevät yhteistyöhön. Bridges ja kollegoiden (2024) mukaan myös jopa kumulatiivisen kulttuurin muodostumiseen, vaikka tutkimus ei minua täysin vakuuttanutkaan. On myös mahdollista, että kimalaisilla on jo muodostunut kulttuuria luonnossa. Esimerkiksi meden varastamista kukilta voidaan pitää väliaikaisena kulttuurina. Lisäksi trooppisilla alueilla elävät sosiaaliset hyönteiset, kuten tarhamehiläiset, trooppiset kimalaiset ja pükittömät mehiläiset, joiden koloniat kestävät vuosia tai jopa vuosikymmeniä, ovat hyvä alusta kulttuurin muodostumiselle – jopa kumulatiivisen kulttuurin (Bridges ym., 2024). On siis mahdollista, että kulttuuria on jo muodostunut selkärangattomilla, mutta emme ole vain havainneet sitä vielä. Usein ongelmana kulttuurin todisteiden havaitsemisessa on se, että havaitsemme sen vasta sitten, kun se on jo muodostunut, jolloin on vaikea tietää, onko käyttäytyminen vaistopohjaista vai opittua.

Kulttuurin mahdollisuus kimalaisilla ei välttämättä kuitenkaan tarkoita, että kimalaiset ovat älykkyydeltään lähempänä ihmistä, vaan että vain ihmisille ominaisina ja ihmisen ylivertaista älykkyyttä selittävinä pidetyt piirteet eivät välttämättä vaadikaan korkeaa pitkälle kehittyneitä kognitiota. Toisaalta on todennäköistä, että ihmisen ja muiden eläinten väliset erot kognitiivisissa kyvyissä, älykkyydessä, sosiaalisessa oppimisessa ja kulttuurissa eivät olekaan niin suuria, kuin on aiemmin ajateltu. Joka tapauksessa tämä herättää mielenkiinnon syventymään edelleen

selvittämättömään mysteeriiin – mitä älykkyys oikein on ja mikä tekee ihmisestä tai kimalaisesta älykkään?

On havaittu, että sosiaalisten hyönteisten aivojen *corpora pedunculata* -osat (engl. *mushroom bodies*) ovat suuremmat, kuin muilla hyönteisillä. Muokkaako sosiaalinen elinympäristö eläimestä älykkäämmän? Myös ravinnonhankinnan vaatima spatiaalinen kognitio ja useiden ravinnonlähteiden muistaminen voisi luoda ekologiset olosuhteet älykkyyden kehittymiseen. Narunvetotutkimuksessa taas havaittiin, että luonteeltaan erityisen tutkivat ja uteliaat kimalaiset kykenivät ratkaisemaan narunvetotehtävän ilman minkäänlaista koulutusta tai demonstraatiota narunvedosta. Narunvedon innovaatio syntyi joko erityisen tutkivien ja uteliaiden kimalaisten ponnistelujen seurauksena tai sattumalta – tai ehkä molempien seurauksena. Näin on myös ihmisten innovaatiot syntyneet – mukana on ollut sopivasti uteliaisuutta ja hyvää tuuria.

Kimalaisen kognition tunteminen on tärkeää tietysti itseisarvoltaan, mutta myös ihmisten kannalta, sillä eläinten kognitio auttaa meitä ymmärtämään myös meidän ihmisten omaa käyttäytymistä ja kognitiota paremmin. Erityisesti koko ajan muuttuvassa maailmassa, jossa etäännyimme yhä kauemmaksi luonnosta ja vietämme yhä enemmän aikaa sisätiloissa – maailmassa, jossa myös mielenterveyden ongelmat ovat kasvussa – on hyödyllistä ymmärtää ihmisen mielen toimintaa ja kognition kehityksen evoluutiota. Eli sitä, kuinka varhain tietyt kognitiiviset piirteet ovat kehittyneet ja kuinka tärkeitä ne ovat läpi eläinkunnan. Lisäksi eläinten, kuten kimalaisten kognition ymmärtäminen on tärkeää, jotta voisimme vastata nykyajan haasteisiin, kuten luontokatoon ja pölyttäjäkatoon. Ekosysteemit ja ihmiset ovat riippuvaisia pölyttäjästä, sillä 80 % kaikista kukkivista kasveista lisääntyvät pölyttäjien avulla ja 35 % maailman sadoista hyötyvät pölyttäjästä. Ihmisten aiheuttamat muutokset ympäristössä, kuten torjunta-aineiden käyttö ja luonnontilaisten elinympäristöjen väistyminen ihmisasutuksen tieltä, pirstoutuminen ja maan muokkaaminen ovat johtaneet pölyttäjien määrän ja monimuotoisuuden hälyttävään laskuun maailmanlaajuisesti (Helander ym., 2023).

Eliöiden olemassaolon ja luonnon monimuotoisuuden itseisarvojen lisäksi pölyttäjäkato on myös uhka ihmisten olemassaololle ja yksi tapa ymmärtää näitä kehityssuuntia, on kognition tutkimus. Kognition tutkimusta voidaan soveltaa esimerkiksi käytössä olevien kasvien tehoaineiden vaikutusten tutkimukseen kimalaisilla. Thompson ja kollegat (2023) tutkivat kasvien tehoaineiden (kasvin torjunta-aine *glyphosate* ja sienien torjunta-aine *prothioconazole*) vaikutusta kimalaisten hajuoppimiseen käyttäen hyödyksi imukärsän ojemusrefleksiä. He saivat selville, että kasvin

torjunta-aine vähensi kimalaisten responsiivisuutta tuntosarvien stimulaatioon sokerivedellä, kun taas joissain tilanteissa sienen torjunta-aine nosti kimalaisten oppimistasoa. Aiemmin kerroin myös tutkimuksesta, jossa havaittiin glyfosaatin vaikuttavan negatiivisesti kimalaisen kykyyn erottaa värit toisistaan, sekä oppimiseen ja muistiin (ks. 2.1.1. Värioppiminen)(Helander ym., 2023). Glyfosaattipohjaiset kasvin torjunta-aineet ovat maailmanlaajuisesti käytössä metsänhoidossa, maataloudessa, puutarhoissa, maisemoinnissa ja kaupungeissa, ja ovat kaikista laajimmin käytettyjä kasvin torjunta-aineita (Helander ym., 2023). Eli vaikka kimalainen ei välittömästi kuole sallittuihin määriin torjunta-ainetta, voi torjunta-aine aiheuttaa niin suurta haittaa kimalaisen kognitiolle, ettei kimalainen kykene toimimaan lajityypillisellä tavalla ja hankkimaan ruokaa tarpeeksi tehokkaasti ja tämä taas johtaa pesän kelpoisuuden heikkenemiseen. Pahimmassa tilanteessa tämä voi johtaa pölyttäjäkatoon. Tutkimusta glyfosaattipohjaisten torjunta-aineiden vaikutuksesta kognitioon ei tosin ole vielä tehty muilla kuin kontukimalaisilla (*Bombus terrestris*) ja tarhamehiläisillä, joten lisätutkimus eri lajien yksilöillä lienee tarpeen.

Muita mahdollisuuksia soveltaa kimalaisen kognitiivisia kykyjä ovat kimalaisten käyttö biosensorina. Kimalaisten hajuaisti on hyvin tarkka, joten imukärsän ojennusrefleksiä voitaisiin käyttää klassisen ehdollistamisen avulla merkkinä jonkin tietyn hajun läsnäolosta. Kimalaiset voisivat haistaa tauteja, pommeja lentokentällä tai melkein mitä tahansa (Hadagali & Suan, 2017). Ehkä meillä onkin tulevaisuudessa huume-kimalaisia huumekoirien sijasta. On myös ehdotettu, että hyönteisten älykkyyttä voitaisiin käyttää tekoälyn apuna autonomisten robottien kehittämisessä (de Croon ym., 2022). Voidaan siis todeta, että ei pidä aliarvioida hyönteisten, kuten kimalaisten kognition tutkimuksen sovellusten mahdollisuuksia – voimme löytää sieltä ratkaisuja teknologian kehitykseen ja ihmisten kohtaamiin suuriin haasteisiin tulevaisuudessa.

Kuitenkin ehkä mielestäni tärkeimpiä syitä kimalaisten kognition tutkimukselle on muiden eläinlajien ymmärtäminen. Erityisesti lajien suojelun kannalta on hyödyllistä, että ymmärrämme eri lajien käyttäytymistä, siten niiden ekologiaa ja niiden rooleja monimutkaisissa ekosysteemeissä. Ymmärtäminen on myös tärkeää sen kannalta, että ihmiset olisivat empaattisempia myös pieniä selkärangattomia eläimiä kohtaan ja näkisivät niiden itseisarvon. Ehkä jos ihmiset ymmärtäisivät, että kimalaisetkin toimivat monissa asioissa aivan kuten mekin – mekin rakennamme yhteiskuntia, opimme vertaisiltamme, ratkaisemme ongelmia, teemme yhteistyötä ja leikimme omaksi iloksemme – voisimme nähdä, että olemme osa luontoa, riippuvaisia siitä, emmekä ole ollenkaan niin kaukana muista eläimistä. Ja mikä tärkeintä – emme ole muiden eläinten yläpuolella.

4. Lähteet

- Alem, S., Perry, C. J., Zhu, X., Loukola, O. J., Ingraham, T., Søvik, E., & Chittka, L. (2016). Associative Mechanisms Allow for Social Learning and Cultural Transmission of String Pulling in an Insect. *PLoS Biology*, *14*(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002564>
- Aplin, L. M., Farine, D. R., Morand-Ferron, J., Cockburn, A., Thornton, A., & Sheldon, B. C. (2015). Experimentally induced innovations lead to persistent culture via conformity in wild birds. *Nature*, *518*(7540), 538–541. <https://doi.org/10.1038/nature13998>
- Battesti, M., Moreno, C., Joly, D., & Mery, F. (2012). Spread of social information and dynamics of social transmission within *Drosophila* groups. *Current Biology*, *22*(4), 309–313. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.12.050>
- Bridges, A. D., MaBouDi, H., Procenko, O., Lockwood, C., Mohammed, Y., Kowalewska, A., Romero González, J. E., Woodgate, J. L., & Chittka, L. (2023b). Bumblebees acquire alternative puzzle-box solutions via social learning. *PLOS Biology*, *21*(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002019>
- Bridges, A. D., Royka, A., Wilson, T., Lockwood, C., Richter, J., Juusola, M., & Chittka, L. (2024). Bumblebees socially learn behaviour too complex to innovate alone. *Nature*, *627*, 572–578. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07126-4>
- Chittka, L., & Geiger, K. (1995). Can honey bees count landmarks? *Animal Behaviour*, *49*(1), 159–164. [https://doi.org/10.1016/0003-3472\(95\)80163-4](https://doi.org/10.1016/0003-3472(95)80163-4)
- Chittka, L., & Niven, J. (2009). Are Bigger Brains Better? *Current Biology*, *19*(21), R995–R1008. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.08.023>
- Dacke, M., & Srinivasan, M. V. (2008). Evidence for counting in insects. *Animal Cognition*, *11*(4), 683–689. <https://doi.org/10.1007/s10071-008-0159-y>
- de Croon, G. C. H. E., Dupeyroux, J. J. G., Fuller, S. B., & Marshall, J. A. R. (2022). Insect-inspired AI for autonomous robots. *Science Robotics*, *7*(67). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abl6334>

- Emery, N. J., & Clayton, N. S. (2004). The mentality of crows: Convergent evolution of intelligence in corvids and apes. *Science*, *306*(5703), 1903–1907. <https://doi.org/10.1126/science.1098410>
- Galef, B. G. (2012). Social learning and traditions in animals: Evidence, definitions, and relationship to human culture. *WIREs Cognitive Science*, *3*(6), 581–592. <https://doi.org/10.1002/wcs.1196>
- Galpayage Dona, H. S., Solvi, C., Kowalewska, A., Mäkelä, K., MaBouDi, H., & Chittka, L. (2022). Do bumble bees play? *Animal Behaviour*, *194*, 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2022.08.013>
- Gatto, E., Guan, C., Christian, A., Cutini, S., Chittka, L., & Petrazzini, M. E. M. (2023). An insect’s view of a numerosity illusion: a simple strategy may explain complex numerical performance in bumblebees. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.08.22.554303>
- Giurfa, M. (2007). Behavioral and neural analysis of associative learning in the honeybee: A taste from the magic well. *Journal of Comparative Physiology A*, *193*(8), 801–824. <https://doi.org/10.1007/s00359-007-0235-9>
- Goulson, D., & Stout, J. C. (2001). Homing ability of the bumblebee *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae). *Apidologie*, *32*(1), 105–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/apido:2001115>
- Gumbert, A. (2000). Color choices by bumble bees (*Bombus terrestris*): innate preferences and generalization after learning. *Behav Ecol Sociobiol* *48*, 36–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s002650000213>
- Hadagali, M. D., & Suan, C. L. (2017). Advancement of sensitive sniffer bee technology. *Trends in Analytical Chemistry*, *97*, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.006>
- Haun, D. B. M., Rapold, C. J., Call, J., Janzen, G., & Levinson, S. C. (2006). Cognitive cladistics and cultural override in Hominid spatial cognition. *PNAS*, *103*(46), 17568–17573. <https://doi.org/10.1073/pnas.0607999103>

- Helander, M., Lehtonen, T. K., Saikkonen, K., Despains, L., Nyckees, D., Antinoja, A., Solvi, C., & Loukola, O. J. (2023). Field-realistic acute exposure to glyphosate-based herbicide impairs fine-color discrimination in bumblebees. *Science of The Total Environment*, 857, 159298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159298>
- Lailoi, D., Sandoz, J. C., Picard-Nizou, A.L., Marchesi, A., Pouvreau, A., & Taséi, J. N. (1999). Olfactory conditioning of the proboscis extension in bumble bees. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 90, 123–129. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.1999.00430.x>
- Leadbeater, E., & Chittka, L. (2008). Social transmission of nectar-robbing behaviour in bumblebees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1643), 1669–1674. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0270>
- Loukola, O.J., Mäkelä, K., Arppi, J., Antinoja, A., Peng, F., Solvi, C. (2024) Evidence for socially-influenced and potentially actively-coordinated cooperation by bumblebees. *Proceedings of the Royal Society B*, hyväksytty julkaistavaksi. <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.0055>
- Loukola, O. J., Perry, C. J., Coscos, Louie, & Chittka, Lars. (2017). Bumblebees show cognitive flexibility by improving on an observed complex behavior. *Science*, 355, 833–836. <https://doi.org/10.1126/science.aag2360>
- Loukola, O. J., Seppänen, J.-T., Krams, I., Torvinen, S. S., & Forsman, J. T. (2013). Observed Fitness May Affect Niche Overlap in Competing Species via Selective Social Information Use. *The American Naturalist*, 182(4), 474–483. <https://doi.org/10.1086/671815>
- MaBouDi, H., Barron, A. B., Li, S., Honkanen, M., Loukola, O. J., Peng, F., Li, W., Marshall, J. A. R., Cope, A., Vasilaki, E., & Solvi, C. (2021). Non-numerical strategies used by bees to solve numerical cognition tasks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1945). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2711>
- MaBouDi, H., Galpayage Dona, H. S., Gatto, E., Loukola, O. J., Buckley, E., Onoufriou, P. D., Skorupski, P., & Chittka, L. (2020). Bumblebees use sequential scanning of countable items in

- visual patterns to solve numerosity tasks. *Integrative and Comparative Biology*, 60(4), 929–942. <https://doi.org/10.1093/icb/icaa025>
- Martin-Ordas, G. (2022). Frames of reference in small-scale spatial tasks in wild bumblebees. *Scientific Reports*, 12(21683). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26282-z>
- Roth, G., & Dicke, U. (2005). Evolution of the brain and intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 250–257. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2005.03.005>
- Schnell, A. K., Amodio, P., Boeckle, M., & Clayton, N. S. (2021). How intelligent is a cephalopod? Lessons from comparative cognition. *Biological Reviews*, 96(1), 162–178. <https://doi.org/10.1111/brv.12651>
- Sherry, D. F., & Strang, C. G. (2015). Contrasting styles in cognition and behaviour in bumblebees and honeybees. *Behavioural Processes*, 117, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2014.09.005>
- Shettleworth, S. J. (2001). Animal cognition and animal behaviour. *Animal Behaviour*, 61(2), 277–286. <https://doi.org/10.1006/ANBE.2000.1606>
- Solvi, C., Al-Khudhairy, S. G., & Chittka, L. (2020). Bumble bees display cross-modal object recognition between visual and tactile senses. *Science*, 367(6480), 910–912. <https://doi.org/10.1126/science.aay8064>
- Sommerlandt, F. M. J., Rössler, W., & Spaethe, J. (2014). Elemental and non-elemental olfactory learning using per conditioning in the bumblebee, *Bombus terrestris*. *Apidologie*, 45, 106–115. <https://doi.org/10.1007/s13592-013-0227-4>
- Tennie, C., Call, J., & Tomasello, M. (2009). Ratcheting up the ratchet: On the evolution of cumulative culture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1528), 2405–2415. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0052>
- The opening of milk bottles by birds. (1952). *Nature*, 169, 1006. <https://doi.org/doi:10.1038/1691006a0>

- Waser, N. M. (1986). Flower Constancy: Definition, Cause and Measurement. *The American Naturalist*, *127*(5), 593–603. <https://doi.org/10.1086/284507>
- Wasserman, E. A. (1997). The Science of Animal Cognition: Past, Present, and Future. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *23*(2), 123–135. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.23.2.123>
- White, D. J. (2004). Influence of social learning on mate-choice decisions. *Animal Learning & Behavior*, *32*, 105–113. <https://doi.org/10.3758/BF03196011>
- Whiten, A., Spiteri, A., Horner, V., Bonnie, K. E., Lambeth, S. P., Schapiro, S. J. J., & de Waal, F. B. M. (2007). Transmission of Multiple Traditions within and between Chimpanzee Groups. *Current Biology*, *17*(12), 1038–1043. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.05.031>
- Woodgate, J. L., Makinson, J. C., Lim, K. S., Reynolds, A. M., & Chittka, L. (2016). Life-Long Radar Tracking of Bumblebees. *PLoS ONE*, *11*(8), e0160333. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160333>
- Zhou, Y., Sun, L., Peng, X., Solvi, C., & Peng, F. (2020). Chromatic, achromatic and bimodal negative patterning discrimination by free-flying bumble bees. *Animal Behaviour*, *169*, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2020.09.009>

En ole käyttänyt tuottavaa tekoälyä tai tekoälyavusteista teknologiaa opinnäytetyöni suunnittelussa ja kirjoittamisessa. Otan täyden vastuun opinnäytetyöni sisällöstä.