



Co-funded by
the European Union

MUTACIJOS IR SUPERGALIOS



BIO54YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: 2023-1-DE03-KA220-SCH-000126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Turinys

Įvadas	4
1. Tyrinėjimas.....	5
Mutacijos ir supergalios	5
Ką iš tikrųjų reiškia mutacija?.....	5
Kaip mutacijos gali paveikti organizmą?	6
Ptaškų mutacijos	7
Kodėl mutacijos vieta svarbi	8
Tyliosios mutacijos	9
Missensinės mutacijos	9
Nesąmoningos mutacijos	10
Įterpimo mutacijos	11
Delecijos mutacijos	13
Subalansuota translokacija	15
Nesubalansuota translokacija	15
Kaip atsiranda mutacijos?	16
Aplinkos veiksniai	16
DNR pažeidimai ir taisymas	16
Mutacijos dažnis ląstelių dalijimosi metu	17
Mutacijų fiksacija	17
2. Taikymas.....	20
Mokymo programos įgyvendinimas.....	20
3. Gilinimas	22
Gilesnis supratimas	22
Sudėtingų sąvokų prieinamumas	22
Didesnis įsitraukimas per žaidimų kūrimą	22
Ryšių su realaus pasaulio programomis kūrimas.....	23
Išvados.....	24
Literatūra.....	26





Bendra mokymosi kelio tema	Mutacijų genetika ir biologija
Konkretus mokymosi vieneto pavadinimas	Mutacijos: pobūdis, priežastys ir poveikis organizmams
Tikslinių vartotojų amžius	14–18 metų
Reikalavimai besimokančiajam	Pagrindinės biologijos žinios; DNR ir genų supratimas; susidomėjimas mokslu ir moksline fantastika
Mokymosi vieneto aprašymas	Šiame mokymosi skyriuje nagrinėjamos genetinės mutacijos, jų rūšys, priežastys ir poveikis gyviesiems organizmams. Mokiniai nagrinėja, kaip mutacijos atsiranda natūraliai arba dėl aplinkos veiksnių ir kaip jos gali sukelti žalingą poveikį, neutralius pokyčius arba naudingas adaptacijas. Šiame skyriuje mokslinės žinios susiejamos su populiariąja kultūra, lyginant tikras mutacijas su išgalvotomis „supergaliomis“. Papildytosios realybės (AR) užduotys „Delightex“ platformoje padeda mokiniams vizualizuoti DNR struktūras, mutacijų procesus ir chromosomų pokyčius, todėl abstrakčios sąvokos tampa konkretesnės ir patrauklesnės.
Tema: Dalyvaujančios šalys	Biologijos mokytojai, mokiniai
Raktiniai žodžiai	Mutacija, genetika, DNR, supergalios, evoliucija, genomai, papildyta realybė (AR), Tyrinėk–Vykdok–Patobulink
Pagrindinės kvalifikacijos, įgūdžiai ir žinios, kurias galima įgyti	Mutacijų tipų ir priežasčių supratimas; gebėjimas analizuoti biologinę informaciją; kritinis mąstymas; pagrindiniai papildytosios realybės sąveikos įgūdžiai; kūrybiškumas; pristatymo ir savęs vertinimo įgūdžiai.
Naudoti ištekliai ir didaktinės priemonės	Biologijos vadovėliai, trumpi moksliniai tekstai, vaizdo įrašai, superherojų komiksai ir filmų ištraukos, „Delightex“ sukurtos papildytosios





	realybės užduotys, „Explore–Execute–Enhance“ sistema
Vertinimo kriterijai ir vertinimas	Žinių patikrinimai ir viktorinos; papildytosios realybės (AR) užduotys „Delightex“ aplinkoje; kūrybinis projektas (mutacijomis paremtas personažas ar scenarijus); trumpi žodiniai pristatymai; refleksija apie mutacijų etinius aspektus; savęs vertinimas tobulinimo etape.

Įvadas

Mutacijos yra esminė evoliucijos ir genetinės įvairovės dalis, tačiau jos taip pat gali sukelti ligas ir vystymosi problemas. Mutacija yra DNR sekos pokytis, ir šie pokyčiai daro įtaką organizmų augimui, funkcionavimui ir prisitaikymui prie aplinkos (Griffiths ir kt., 2019). Tyrinėdami mutacijas, mokslininkai geriau supranta, kaip genomai keičiasi laikui bėgant ir kaip šie pokyčiai veikia biologiją ir mediciną.

Šiame mokymosi skyriuje mokiniai nagrinėja įvairių tipų mutacijas, įskaitant chromosomų pokyčius, tokius kaip delecijos, dubliacijos, inversijos ir translokacijos. Šios mutacijos gali pakeisti chromosomų struktūrą ir paveikti genų veikimą (Alberts ir kt., 2015). Šiame skyriuje taip pat paaiškinama, kaip mutacijos gali atsirasti dėl klaidų DNR replikacijos metu, kai DNR kopijuojama prieš ląstelių dalijimąsi, taip pat dėl aplinkos veiksnių, tokių kaip ultravioletinė (UV) spinduliuotė ir cheminės medžiagos (Strachan ir Read, 2018).

Be to, skyriuje pabrėžiama DNR atkūrimo mechanizmų svarba. Ląstelės turi sistemas, kurios ištaiso daugelį DNR klaidų, padėdamos apsaugoti genomo stabilumą. Tačiau atkūrimo procesai ne visada yra tobuli, ir kai kurios mutacijos lieka DNR, didindamos genetinę variaciją populiacijose (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023). Ši pusiausvyra tarp genomo vientisumo išsaugojimo ir genetinės variacijos leidimo yra labai svarbi tiek organizmų išlikimui, tiek evoliucijos procesui.





1. Tyrinėjimas

Mutacijos ir supergalios

Šiuolaikinėje mokslinėje fantastikoje ir veiksmo filmuose žodžiai *mutacijai* ir *mutantas* dažnai naudojami paaiškinti supergalias. Populiarūs personažai iš filmų ir serialų, tokių kaip *Dedpulas*, *Žmogus-voras*, *Didvyriai* ir *X-Men* rodo žmonės, įgyjantys nepaprastų gebėjimų dėl genetinių pokyčių, vadinamų mutacijomis. Šios istorijos teigia, kad mutacijos gali suteikti žmonėms ypatingų galių, tokių kaip super stiprybė, regeneracija ar gebėjimas keisti kūno formą.

Tačiau realioje biologijoje mutacijos reikšmė yra daug konkretesnė. Mutacija yra tiesiog organizmo DNR sekos pokytis (Griffiths ir kt., 2019). Mokslininkai tiria mutacijas, norėdami suprasti, kaip keičiasi požymiai, kaip vystosi ligos ir kaip veikia evoliucija, o ne tam, kad sukurtų superžmones.

Tai kelia svarbių klausimų: ką mutacija iš tikrųjų veikia žmogaus organizme? Ar žmogus gali gimti turėdamas dramatiškų gebėjimų, tokių, kokius matome filmuose, arba įgyti galių po sąlyčio su radiacija ar genetiškai pakeistu organizmui? Moksliniai tyrimai rodo, kad nors mutacijos gali paveikti fizinius bruožus ar sveikatą, jos nesukelia staigių ar ekstremalių gebėjimų, tokių kaip laipiojimas sienomis ar formos keitimas (Alberts ir kt., 2015). Vietoj to, dauguma mutacijų turi nedidelį poveikį, visai neturi jokio matomo poveikio arba turi neigiamų pasekmių organizmui.

Supratimas skirtumo tarp išgalvotų mutacijų ir realių genetinių pokyčių padeda mokiniams ugdyti mokslinį raštingumą ir kritiškai mąstyti apie tai, kaip biologija vaizduojama populiariojoje kultūroje (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023 m.).

Ką iš tikrųjų reiškia mutacija?

Genomas yra visas gyvo organizmo DNR rinkinys. Jį sudaro baltymus koduojantys genai, taip pat nekoduojantys regionai, tokie kaip intronai ir pseudogenai, kurie tiesiogiai negamina





baltymų, bet vis tiek atlieka svarbų vaidmenį reguliavime ir struktūroje (Alberts ir kt., 2015). Kiekviena rūšis turi savo unikalų genomą. Pavyzdžiui, žmonės ir šimpanzės turi apie 99 % bendros DNR, tačiau likęs 1 % sukuria reikšmingus išvaizdos, elgesio ir gebėjimų skirtumus (Griffiths ir kt., 2019).

Naudingas būdas suprasti genomą yra įsivaizduoti jį kaip namo brėžinį. Brėžinyje paaiškinama, kaip namas turėtų būti pastatytas – jo dydis, struktūra ir medžiagos. Gyvuose organizmuose „statybinės medžiagos“ yra baltymai, lipidai (riebalai) ir cukrūs. Genomas lemia, kurie baltymai yra gaminami, kurios genų versijos (aleliai) yra naudojamos ir kiek kiekvieno baltymo yra pagaminamas. Šis procesas vadinamas genų raiška (Strachan ir Read, 2018).

Tačiau genai neveikia vieni. Aplinka taip pat stipriai veikia organizmo vystymąsi. Pavyzdžiui, genai gali pateikti raumenų augimo instrukcijas, tačiau raumenys stiprėja tik tinkamai maitinantis ir fiziškai aktyviai. Ši genų ir aplinkos sąveika paaiškina, kodėl asmenys, turintys panašią DNR, vis tiek gali išsiugdyti skirtingus bruožus (Alberts ir kt., 2015).

Nors kiekviena žmogaus kūno ląstelė turi tą pačią DNR, skirtingos ląstelės naudoja skirtingus genus. Pavyzdžiui, odos ir raumenų ląstelės gamina skirtingus baltymus skirtingu kiekiu. Šis selektyvus genų aktyvumas formuoja fizinius bruožus, tokius kaip akių spalva, plaukų spalva, ūgis ir kūno struktūra (Griffiths ir kt., 2019).

Kadangi bruožai priklauso nuo DNR, bet koks geno pokytis gali paveikti organizmą. Mutacija yra DNR sekos pokytis, kuris gali įvykti atsitiktinai arba būti sukeltas aplinkos veiksnių, tokių kaip radiacija ar cheminės medžiagos. Mutacijos gali įvykti genuose arba nekoduojančiose DNR srityse. Nors kai kurios mutacijos neturi matomo poveikio, kitos gali turėti įtakos bruožams, sveikatai ar išgyvenimui (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023).

Kaip mutacijos gali paveikti organizmą?

Gyvi organizmai gali patirti daug įvairių mutacijų. Kai kurios mutacijos sukelia aiškius ir rimtus pokyčius, o kitos nesukelia jokio pastebimo poveikio. Kad tai geriau suprastume, vėl galime panaudoti namo plano pavyzdį. Atsitiktinis kruopščiai parengto plano pakeitimas gali lemti labai skirtingus rezultatus (Alberts ir kt., 2015).

Pavyzdžiui, nedidelis pokytis gali sukurti tarpą tarp lango ir sienos, leisdamas į namus patekti šaltam orui. Kitas pokytis gali sugadinti vandentiekio sistemą ir apsunkinti





kasdienį gyvenimą. Biologijoje panašios mažos mutacijos gali šiek tiek paveikti baltymo veikimą ar jo gamybos efektyvumą.

Kartais didelis atsitiktinis pokytis gali sukelti rimtų problemų. Pašalinus laikančiąją namo sieną, gali sugriūti visas pastatas. Lygiai taip pat kai kurios mutacijos smarkiai sutrikdo esminius genus ir gali sukelti ligas ar vystymosi problemas (Strachan ir Read, 2018).

Tačiau ne visi pokyčiai yra žalingi. Kai kurios mutacijos neturi jokio poveikio, pavyzdžiui, vienos stogo čerpės pakeitimas kita identiška. Genetikoje tai vadinamos neutraliomis mutacijomis. Labai retai mutacija gali būti netgi naudinga. Pavyzdys yra laktozės tolerancija žmonėms – suaugusiųjų gebėjimas virškinti pieną – kuri tapo naudinga prijaukinant galvijus (Griffiths ir kt., 2019).

Mutacijos poveikis daugiausia priklauso nuo:

- ar tai pakeičia geną, kuris koduoja baltymą ar RNR,
- koks svarbus tas genas organizmui,
- ir kaip stipriai genas yra ekspresuojamas (kiek jis „įjungtas“).

Kadangi genai sąveikauja sudėtinguose tinkluose, net ir maža mutacija kartais gali turėti didelį poveikį, o kitos mutacijos lieka nepastebėtos (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023).

Ptaškų mutacijos

Paprasčiausias mutacijos tipas įvyksta, kai viena DNR raidė, vadinama nukleotidu, pakeičiama kita. Šis pokyčio tipas žinomas kaip taškinė mutacija arba vieno nukleotido variantas (SNV) (Alberts ir kt., 2015).

Jei taškinė mutacija perduodama iš tėvų vaikams ir tampa dažna populiacijoje, tai vadinama vieno nukleotido polimorfizmu (SNP). Pokytis paprastai laikomas SNP tik tuo atveju, jei jis pasireiškia bent nedidelėje populiacijos dalyje, pavyzdžiui, maždaug 1 % žmonių (Griffiths ir kt., 2019).

Pavyzdžiui, įsivaizduokite, kad 98 % žmonių turi DNR seką:





...acgtg~~c~~gAtgattg...

tačiau 2 % žmonių turi šiek tiek kitokią versiją:

...acgtg~~c~~gTtgattg...

Šiuo atveju DNR raidė A vienoje pozicijoje pakeista raide T. Tai yra A–T SNP pavyzdys.

Jei šis SNP yra geno viduje, jis vadinamas aleliu arba geno variantu. Skirtingi aleliai gali lemti nedidelius individų skirtumus, tokius kaip akių spalva, ūgis ar gebėjimas virškinti tam tikrus maisto produktus (Strachan ir Read, 2018).

Dauguma taškinių mutacijų neturi matomo poveikio, tačiau kai kurios gali pakeisti baltymo veikimą arba jo gamybos kiekį. Tam tikrais atvejais taškinės mutacijos yra susijusios su genetinėmis ligomis, o kitais atvejais jos tiesiog padidina genetinę įvairovę populiacijoje (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023).

Kodėl mutacijos vieta svarbi

Taškinių mutacijų atveju labai svarbu, kur DNR įvyksta mutacija. Mutacija gali įvykti geno viduje arba tarp genų. Mutacijos, vykstančios už genų ribų, dažnai turi mažai arba visai neturi poveikio, nes didelės genomo dalys tiesiogiai nekoduoja baltymų ir turi pasikartojančias arba reguliavimo sekas (Alberts ir kt., 2015).

Kai mutacija įvyksta baltymą koduojančiame gene, jos poveikis priklauso nuo to, ar ji pakeičia baltymą. Jei DNR pokytis nepakeičia baltymo aminorūgščių sekos, tai vadinama sinonimine mutacija. Tai įmanoma, nes genetinis kodas yra perteklinis, o tai reiškia, kad skirtingi DNR tripletai (kodonai) gali koduoti tą pačią aminorūgštį (Griffiths ir kt., 2019).

Pavyzdžiui, kodonai TCA ir TCG koduoja aminorūgštį seriną. Jei mutacija pakeičia paskutinę raidę iš A į G, baltymas išlieka visiškai toks pats. Dėl to mutacija paprastai neturi jokios įtakos baltymo veikimui.





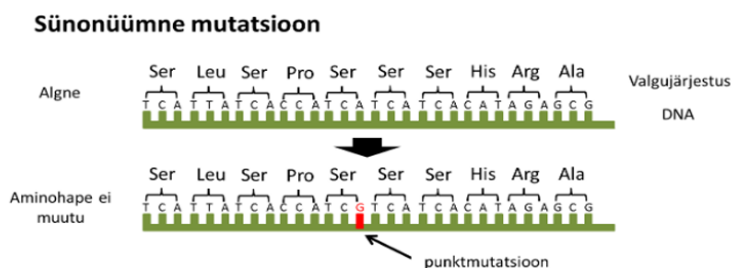
M.Bet kokios sinoniminės mutacijos įvyksta trečioje kodono pozicijoje, dar vadinamoje svyruojančia pozicija. Šios pozicijos pokyčiai dažnai neturi įtakos baltymo struktūrai ar funkcijai (Strachan ir Read, 2018).

Taip pat yra neutralių mutacijų, kai viena aminorūgštis pakeičiama kita, turinčia panašias chemines savybes, pvz., krūvį ar dydį. Kadangi nauja aminorūgštis elgiasi panašiai, baltymas dažnai vis dar gali normaliai funkcionuoti. Šie nedideli pokyčiai paprastai nekenkia organizmui ir padeda paaiškinti, kodėl genetinė variacija gali egzistuoti nesukeldama ligų (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023).

Tyliosios mutacijos

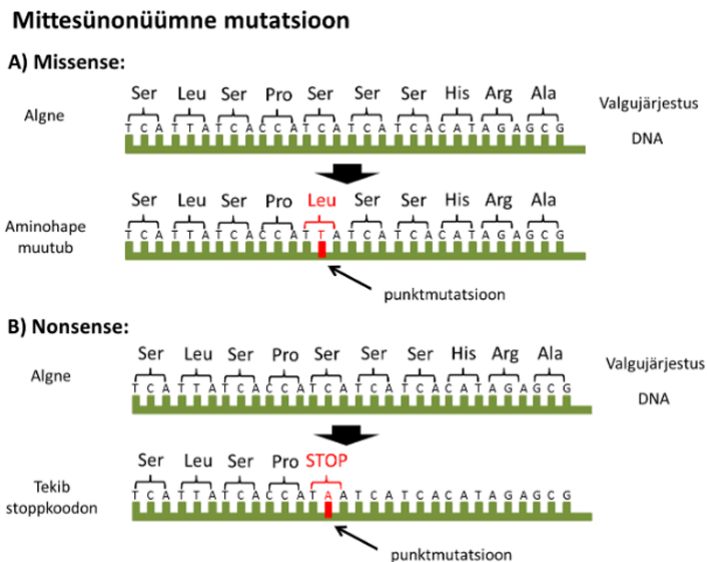
Jei mutacija nepakeičia matomų organizmo požymių, dar vadinamų fenotipu, ji vadinama tyliąja mutacija. Daugeliu atvejų tyliosios mutacijos nesukelia pastebimo poveikio, tačiau skirtumas tarp tyliųjų ir sinoniminių mutacijų ne visada aiškus (Griffiths ir kt., 2019). Nors sinoniminės mutacijos nekeičia baltymo aminorūgščių sekos, jos vis tiek gali turėti nedidelį poveikį. Pavyzdžiui, skirtingi kodonai, koduojantys tą pačią aminorūgštį, gali naudoti skirtingą kiekį atitinkančių tRNR molekulių. Tai gali turėti įtakos baltymo gamybos greičiui, o tai gali šiek tiek paveikti ląstelės funkciją (Alberts ir kt., 2015). Daugeliu atvejų tyliosios ir sinoniminės mutacijos turi labai mažai įtakos organizmui. Šios mutacijos rodo, kad genetinės sistemos yra lanksčios ir gali toleruoti nedidelius pokyčius neprarasdamos savo funkcijos. Šis lankstumas yra svarbus evoliucijai ir ilgalaikiai adaptacijai (Strachan ir Read, 2018).

1 paveiksle pavaizduota sinoniminė mutacija, kai DNR sekos pokytis nepakeičia gauto baltymo aminorūgščių sekos.





Missensinės mutacijos



2 pav. Misensines ir nonsensinės mutacijos baltymą koduojančiame gene

Misensinės mutacijos metu viena baltymo aminorūgštis pakeičiama kita aminorūgštimi. Šis pokytis gali paveikti baltymo formą ir funkciją bei sutrikdyti jo tinkamą veikimą. Misensinės mutacijos sukelia daugelį genetinių ligų, nes net ir nedidelis baltymo struktūros pokytis gali turėti rimtų pasekmių (Alberts ir kt., 2015).

Gera žinoma misensinės mutacijos pavyzdys yra pjautuvinė ląstelių anemija. Šią ligą sukelia taškinė mutacija β -globino gene. Šios mutacijos metu vieno kodono antroji bazė pasikeičia iš adenino (A) į timiną (T). Dėl to hemoglobino baltyme aminorūgštis glutamo rūgštis pakeičiama valinu (Griffiths ir kt., 2019).

Šis nedidelis pokytis turi didelį poveikį. Pakitę hemoglobino molekulės sulimpa, todėl raudonieji kraujo kūneliai tampa pusmėnulio formos, o ne apvalūs. Šios nenormalios ląstelės negali efektyviai pernešti deguonies ir suvira greičiau nei normalūs raudonieji kraujo kūneliai. Tai sukelia tokius simptomus kaip skausmas, nuovargis ir padidėjusi infekcijų rizika (Strachan ir Read, 2018).

Nesąmoningos mutacijos

Nesąmoningos mutacijos įvyksta, kai taškinė mutacija per anksti gene sukuria stop kodoną. Dėl to baltymų sintezė sustoja prieš susidarant pilnam baltymui. Dėl to





susidaro sutrumpintas (sutrumpintas) baltymas, kuris paprastai neveikia tinkamai arba visai neveikia (Alberts ir kt., 2015) (žr. 2 pav.).

Kadangi baltymams dažnai reikia visos jų struktūros, kad jie tinkamai veiktų, nonsensinės mutacijos paprastai yra žalingesnės nei sinoniminės ar neutralios mutacijos. Trūkstant baltymo dalis gali pašalinti esminius funkcinis regionus, todėl baltymas tampa nestabilus arba nenaudingas (Griffiths ir kt., 2019).

Nonsensinės mutacijos sukelia kelias sunkias genetines ligas, įskaitant Diušeno raumenų distrofiją ir cistinę fibrozę (Strachan ir Read, 2018).

Pavyzdys: cistinė fibrozė

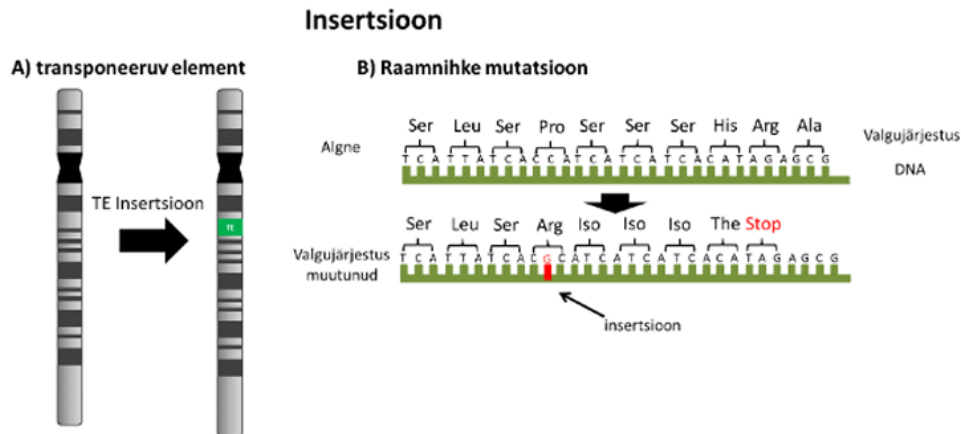
Cistinę fibrozę sukelia geno, koduojančio jonų kanalo baltymą, kuris kontroliuoja druskos ir vandens judėjimą tam tikruose audiniuose, ypač plaučiuose, mutacijos. Kai šis baltymas neveikia tinkamai, kvėpavimo takuose kaupiasi tirštos gleivės. Šios gleivės apsunkina kvėpavimą ir sukelia dažnas plaučių infekcijas.

Nors cistinės fibrozės išgydyti neįmanoma, šiuolaikiniai gydymo būdai gali padėti valdyti simptomus ir pagerinti gyvenimo kokybę. Šis pavyzdys parodo, kaip viena mutacija, įvedanti ankstyvą stop kodoną, gali turėti rimtų pasekmių visam organizmui (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023 m.).





Įterpimo mutacijos



3

pav.

Įterpimas

Įterpimo mutacija įvyksta, kai prie DNR sekos pridedamas vienas ar keli nukleotidai. Įterpimai gali būti labai maži arba itin dideli, kartais apimantys tūkstančius ar net milijonus nukleotidų. Maži įterpimai dažnai įvyksta DNR replikacijos arba DNR atkūrimo procesų metu (Alberts ir kt., 2015).

Jei į baltymą koduojantį geną įterpiami nukleotidai ir pridėtų nukleotidų skaičius nesidalija iš trijų, mutacija sukelia rėmelio poslinkio mutaciją. Tai pakeičia geno skaitymo rėmelį, pakeisdama visus tolesnius kodonus. Dėl to pakinta visa baltymo seka ir baltymas paprastai praranda savo normalią funkciją (žr. 3 pav.) (Griffiths ir kt., 2019).

Rėmelio poslinkio mutacijos paprastai paveikia tik vieną baltymą, nes genus genome skiria ilgi nekoduojantys regionai. Tačiau poveikis tam vienam baltymui gali būti labai rimtas ir dažnai sukelti ligas.

Įterpimus taip pat gali sukelti transpoziciniai elementai (TE). Tai DNR sekos, kurios gali judėti į skirtingas genomo vietas. Dažniausias transpozicinis elementas žmonių organizme yra Alu elementas, kuris yra apie 300 bazinių porų ilgio ir žmogaus genome aptinkamas šimtais tūkstančių kopijų (Strachan ir Read, 2018).

Perkeliami elementai gali judėti dviem pagrindiniais mechanizmais:

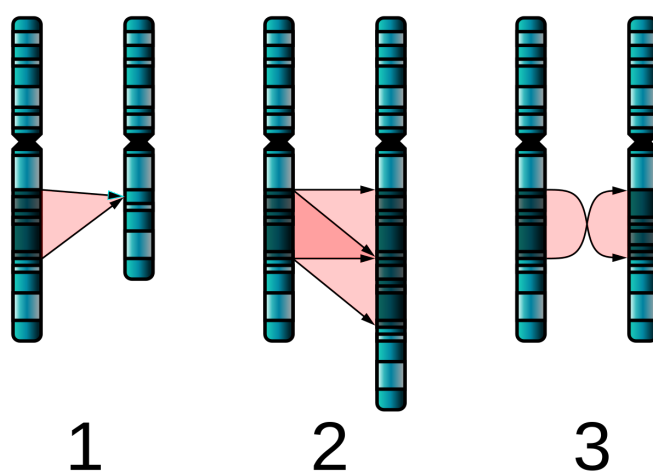




- „Iškirpti ir įklijuoti“, kai elementas pašalinamas iš vienos vietos ir įterpiamas į kitą.
- „Kopijuoti ir įklijuoti“, kai elemento kopija įterpiama į naują vietą, o originalas lieka.

Moksliniai tyrimai parodė, kad Alu įterpimai gali sutrikdyti genus ir yra susiję su genetiniais sutrikimais, tokiais kaip hemofilija ir krūties vėžys (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas [NHGRI], 2023).

Delecijos mutacijos



4 pav.: Chromosomų ištrynimai, dubliavimas ir inversija

Delecijos mutacija įvyksta, kai iš DNR sekos pašalinamas vienas ar keli nukleotidai. Skirtingai nuo įterpimų, delecijos paprastai yra negrįžtamos, nes prarastos DNR nebegalima atkurti, kai ji pašalinama (Alberts ir kt., 2015). Nors kai kurie transpoziciniai elementai gali pasislinkti iš genomo, deletuotos DNR sekos prarandamos visam laikui.

Delecijos gali turėti rimtų pasekmių, ypač kai pašalinama didelė chromosomos dalis. Tai gali lemti heterozigotiškumo praradimą, o tai reiškia, kad lieka tik viena geno kopija (alelis). Jei likęs alelis yra klaidingas, o deletuotas alelis buvo sveikas, organizmas gali patirti rimtų biologinių pasekmių (Griffiths ir kt., 2019).





Mažos delecijos baltymus koduojančiuose genuose taip pat gali sukelti rėmelio poslinkio mutacijas, kurios pakeičia geno skaitymo rėmelį ir paprastai lemia neveikiantį baltymą.

Dublikacijos mutacijos

Skirtingai nuo delecijų, duplikacijos mutacijos įvyksta, kai DNR segmentas yra nukopijuojamas vieną ar daugiau kartų. Šios mutacijos dažnai įvyksta dėl klaidų genetinės rekombinacijos metu (žr. 4 pav.) (Strachan ir Read, 2018).

Dėl nedidelių dublikatų tam tikros DNR sekos pasikartoja, todėl pakinta kopijų skaičiaus variacija (CNV). Tai reiškia, kad kai kurių genų kopijų skaičius gali būti didesnis arba mažesnis nei įprastai, o tai gali turėti įtakos pagaminamo baltymo kiekiui.

Pasikartojimų skaičiaus pokyčiai gali sukelti genetinius sutrikimus. Gera žinoma pavyzdys yra Huntingtono liga. Huntingtino genas (HTT) paprastai turi 27–35 trijų nukleotidų sekos CAG pasikartojimus. Kai pasikartojimų skaičius viršija 40, tai sukelia progresuojantį neurodegeneracinį sutrikimą, pažeidžiantį centrinę nervų sistemą (NHGRI, 2023).

Didelės dubliacijos, apimančios ištisus genus arba chromosomų segmentus, gali padidinti genų ekspresiją ir dažnai yra susijusios su tokiais ligomis kaip vėžys, kai vyksta per didelis ląstelių augimas.

Inversijos mutacijos

Inversinė mutacija įvyksta, kai DNR segmentas nutrūksta ir vėl įterpiamas priešinga kryptimi chromosomos viduje. Nors tai skamba dramatiškai, inversijos dažnai nesukelia didelės žalos, nes neprarandama jokia genetinė medžiaga (Griffiths ir kt., 2019).

Daugeliu atvejų genų tvarka chromosomoje neturi didelės įtakos organizmo funkcionavimui. Tačiau problemų gali kilti lūžio taškuose, kur DNR nutrūksta ir vėl susijungia. Šiose vietose gali būti sutrikdyti svarbūs genai.

Yra du pagrindiniai inversijų tipai:





- Paracentrinės inversijos: atsiranda vienoje chromosomos rankoje ir neapima centromeros.
- Pericentrinės inversijos: apima centromerą apverstame segmente.

Chromosomų translokacija

Achromosomų translokacija įvyksta, kai vienos chromosomos segmentas nutrūksta ir prisitvirtina prie kitos chromosomos arba prie kitos tos pačios chromosomos vietos. Šio tipo mutacija pakeičia **genų padėtis**, o tai gali paveikti jų funkcionavimą (Griffiths ir kt., 2019).

Yra du pagrindiniai chromosomų translokacijų tipai:

Subalansuota translokacija

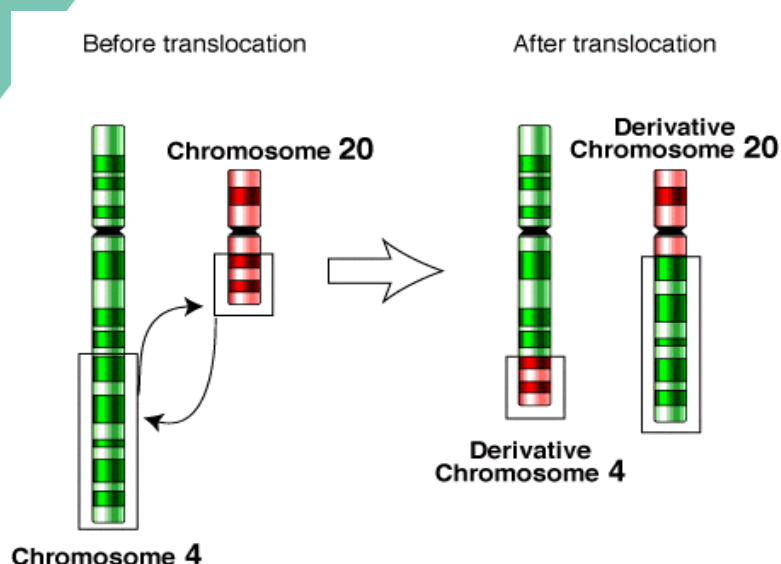
Į **asubalansuota translokacija**, genetinė medžiaga neprarandama ir neįgyjama – DNR segmentai tiesiog pertvarkomi. Daugeliu atvejų individai su subalansuotomis translokacijomis nerodo matomų simptomų. Tačiau reprodukcijos metu gali kilti problemų, nes subalansuotos translokacijos gali padidinti nevaisingumo ar genetinių sutrikimų riziką palikuonims (Strachan ir Read, 2018).

Nesubalansuota translokacija

Annesubalansuota translokacija įvyksta, kai genetinė medžiaga prarandama arba dubliuojasi. Tai dažnai sukelia rimtų biologinių pasekmių, nes sutrinka normali genų pusiausvyra. Nesubalansuotos translokacijos yra susijusios su tokiais ligomis kaip **vėžys**, **nevaisingumas** ir genetiniai sutrikimai, įskaitant **Dauno sindromą** (NHGRI, 2023).

Translokacijos taip pat gali sukelti **genų susilieėjimą**, kai dviejų skirtingų genų dalys susijungia. Šie susilieję genai gali gaminti nenormalius baltymus, kurie sutrikdo normalią ląstelių funkciją ir gali prisidėti prie ligų vystymosi, ypač tam tikrų vėžio rūšių atveju (Alberts ir kt., 2015).





5 pav. Chromosomų translokacija

Kaip atsiranda mutacijos?

Mutacijos atsiranda dėl DNR sekos pokyčių ar klaidų, tokių kaip trūkiai, neatitikimai ar trūkstamos bazės. Šios klaidos dažniausiai atsiranda dėl dviejų priežasčių: išorinių aplinkos veiksnių arba atsitiktinių klaidų DNR replikacijos metu (Alberts ir kt., 2015).

Aplinkos veiksniai

Aplinkos veiksniai, sukeliantys mutacijas, vadinami mutagenais. Jiems priskiriama įvairių tipų spinduliuotė ir cheminės medžiagos.

Pavyzdžiui, saulės spindulių ultravioletinė (UV) spinduliuotė dažnai sukelia taškines mutacijas, pakeisdama vieną DNR bazę kita, pavyzdžiui, guaniną (G) pakeisdama timinu (T). Šio tipo pažeidimai dažni odos ląstelėse ir yra stipriai susiję su odos vėžiu (Griffiths ir kt., 2019).

Tam tikros cheminės medžiagos taip pat gali pažeisti DNR. Vienas pavyzdys yra etidio bromidas – medžiaga, kuri įsiterpia tarp DNR bazių. Tai iškreipia DNR struktūrą ir padidina replikacijos klaidų tikimybę (Strachan ir Read, 2018).

DNR pažeidimai ir taisymas





DNR pažeidimas ne visada sukelia mutaciją. Ląstelės turi keletą DNR taisymo mechanizmų, kurie nuolat tikrina ir ištaiso genomo klaidas. Tačiau DNR taisymas ne visada yra tobulas. Kartais taisymo sistema įterpia neteisingą nukleotidą priešais pažeistą bazę. Kai taip nutinka, gali įvykti mutacija – nuolatinis DNR sekos pokytis (Alberts ir kt., 2015).

Mutacijos dažnis ląstelių dalijimosi metu

Kiekvieną kartą, kai ląstelė dalijasi, visa DNR seka turi būti nukopijuota. Žmonėms tai reiškia, kad nukopijuojama apie 12 milijardų nukleotidų (abiejų diploidinės ląstelės DNR grandinių). Už šį procesą atsakingas fermentas, DNR polimerazė, yra itin tikslus ir padaro tik maždaug vieną klaidą 100 milijonų nukleotidų (Griffiths ir kt., 2019).

Net ir esant tokiam dideliame tikslumui, didelis žmogaus genomo dydis reiškia, kad kiekvieno ląstelės dalijimosi metu gali atsirasti šimtai naujų mutacijų. Dauguma šių klaidų ištaisomos DNR taisymo sistemos arba DNR polimerazės korektūros funkcija, kuri ištaiso apie 99 % klaidų.

DNR polimerazės padarytų klaidų tipai

DNR polimerazė gali sukelti įvairių tipų klaidas:

- Neatitikimai: pridedami neteisingi nukleotidai, susidarant neteisingoms bazių poroms (pavyzdžiui, A–C vietoj A–T).
- Slydimas: fermentas slysta pirmyn arba atgal išilgai DNR grandinės, sukeldamas nukleotidų įterpimą arba ištrynimą.

Jei šios klaidos nebus ištaisytos, jos gali tapti nuolatinėmis mutacijomis.

Mutacijų fiksacija

Mutacija tampa fiksuota, kai DNR atkūrimo mechanizmai neveikia arba neteisingai pataiso pažeidimą. Kito DNR replikacijos etapo metu mutavusi grandinė tarnauja kaip šablonas, o mutacija nukopijuojama į naują DNR. Šiuo metu ląstelė nebeatpažįsta jos kaip klaidos (NHGRI, 2023).





Somatinių ląstelių (kūno ląstelių) mutacijos perduodamos tik dukterinėms ląstelėms ir nėra paveldimos palikuonims. Tačiau gamalo ląstelių (spermos ar kiaušinėlių) mutacijos gali būti perduodamos kitai kartai.

Kodėl svarbus netobulas remontas

Nors mutacijos gali būti žalingos, tobulas DNR atkūrimas sustabdytų evoliuciją. Be mutacijų nebūtų genetinės variacijos, natūralios atrankos ir prisitaikymo prie kintančios aplinkos. Genetinė variacija yra būtina, kad populiacijos išgyventų ir evoliucionuotų laikui bėgant (Griffiths ir kt., 2019).

Kiek mutacijų įvyksta?

Mutacijų dažnis tarp organizmų labai skiriasi:

- Virusai pasižymi labai dideliu mutacijų dažniu – maždaug 1 mutacija 10 000 nukleotidų per infekcijos ciklą.
- Žmonių mutacijų dažnis yra daug mažesnis – maždaug 1 mutacija 30–40 milijonų nukleotidų.

Nepaisant šio mažo rodiklio, žmonės kiekvienam vaikui perduoda maždaug 100–200 naujų mutacijų dėl didelio žmogaus genomo dydžio (Strachan ir Read, 2018).

Ar visos mutacijos yra kenksmingos?

Dauguma mutacijų yra žalingos arba neutralios, nes baltymų sekos evoliucijos metu buvo labai optimizuotos. Tyrimai su vaisinėmis muselėmis rodo, kad apie 70 % nesinoniminių mutacijų, t. y. tų, kurios keičia aminorūgštis, yra žalingos (Griffiths ir kt., 2019).

Naudingos mutacijos yra retos, tačiau jos vaidina svarbų vaidmenį evoliucijoje. Tikras pavyzdys yra laktozės tolerancija žmonėms. Mutacijos, leidžiančios suaugusiems virškinti pieną, tapo naudingos po to, kai žmonės pradėjo prijaukinti galvijus. Tačiau tai, ar mutacija naudinga, dažnai priklauso nuo aplinkos. Jei sąlygos pasikeičia, kadaise naudinga mutacija gali nebeteikti pranašumo (NHGRI, 2023).

Holivudas prieš realybę





Filmuose ir komiksuose mutacijos dažnai suteikia personažams supergalių. Iš tikrųjų tai neįmanoma. Dramatiniams gebėjimams reikėtų daugybės sudėtingų mutacijų, kurios vyktų vienu metu visose kūno ląstelėse, o gemalo ląstelėse jos būtų paveldimos. Tokie pokyčiai biologiškai yra nerealūs (Alberts ir kt., 2015).

Pavyzdžiui, Žmogaus-voro sugebėjimams reikėtų koordinuotų raumenų, kaulų, nervų ir medžiagų apykaitos pokyčių visame kūne – to neįvyktų dėl įprastų mutacijų.

Kada mutacijos perduodamos palikuonims?

- Daugelio suaugusiųjų kūno ląstelių mutacijos nėra paveldimos.
- Kamieninių ląstelių mutacijos paveikia tik iš jų išsivystančias ląsteles.
- Tik gemalo ląstelių (spermos ar kiaušinėlio) mutacijos gali būti perduodamos ateities kartoms.

2. Taikymas

Mokymo programos įgyvendinimas

Project Number: 2023-1-DE03-KA220-SCH-000126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Šiame etape mokiniai pritaiko savo žinias apie genetines mutacijas per praktines, papildytosios realybės (AR) pagrįstas veiklas, sukurtas „Delightex“ platformoje. Pagrindinis dėmesys skiriamas skirtingų mutacijų tipų identifikavimui, kategorizavimui ir supratimui, sąveikaujant su vaizdiniais ir interaktyviais elementais, o ne vien skaitant tekstą.

Naudodami „Delightex“, mokiniai tyrinėja DNR ir chromosomų 3D modelius, stebi, kaip mutacijos veikia genetines sekas, ir imituoja pokyčius, kuriuos sukelia replikacijos klaidos ir aplinkos veiksniai. Šios veiklos padeda besimokantiems susieti teorines žinias iš tyrinėjimo etapo su praktiniais vaizdiniais vaizdais.

Interaktyvūs pratimai

- DNR replikacijos ir klaidų vizualizavimas**
Mokiniai „Delightex“ programoje sąveikauja su 3D DNR modeliu, kuriame rodomas DNR replikacijos procesas. Konkrečiuose modelio taškuose paryškinamos galimos replikacijos klaidos, pvz., neatitikimai ar praslydimas. Mokinių prašoma nustatyti, kokio tipo mutacija gali atsirasti dėl kiekvienos klaidos, ir paaiškinti galimą jos poveikį.
- Aplinkos veiksnių modeliavimas**
Interaktyvių scenų metu mokiniai stebi, kaip aplinkos veiksniai, tokie kaip UV spinduliuotė ar cheminės medžiagos, gali pažeisti DNR. Aktyvuodami skirtingus papildytosios realybės elementus, mokiniai mato, kaip šie veiksniai padidina taškinių mutacijų ar didesnių DNR pokyčių tikimybę. Tai padeda jiems suprasti ryšį tarp aplinkos ir genetinių pokyčių.
- Chromosomų pertvarkymų modeliavimas**
Naudodami „Delightex“ objektus ir scenas, mokiniai tyrinėja įterpimus, ištrynimus, dubliavimus, inversijas ir translokacijas. Chromosomų segmentus galima perkelti, apversti arba pašalinti, kad būtų vizualiai parodytas kiekvienas mutacijos tipas. Tada mokiniai aptaria, kaip šie struktūriniai pokyčiai gali paveikti genų funkciją ir organizmo sveikatą.
- Mutacijos identifikavimo testas**
Mokiniai „Delightex“ platformoje atlieka papildytosios realybės (AR) pagrindu sukurtą





viktoriną, kurioje klasifikuoja mutacijų tipus pagal trumpus aprašymus, diagramas ar animuotas sekas. Tai interaktyviai sustiprina terminologijos ir sąvokų supratimą.

Atsiliepimų rinkimas

Atsiliepimai yra tiesiogiai integruojami į „Delightex“ veiklas.

- Po kiekvienos interaktyvios užduoties ar viktorinos klausimo mokiniai iš karto gauna atsiliepimą, nurodantį, ar jų atsakymas teisingas, ar neteisingas.
- Trumpi aiškinamieji pranešimai paaiškina, kodėl konkretus mutacijos tipas yra teisingas ir kokį biologinį poveikį jis gali turėti.
- Mokytojai gali naudoti „Delightex“ testo rezultatus ir mokinių sąveiką, kad nustatytų klaidingas sampratas ir atitinkamai pakoreguotų mokymą.

Per šias papildytosios realybės (AR) technologija pagrįstas veiklas mokiniai aktyviai susipažįsta su mutacijų sąvokomis, stiprina analitinius įgūdžius ir giliau supranta, kaip vyksta genetiniai pokyčiai ir kodėl jie svarbūs.





3. Gilinimas

„Delightex“ sukurtos papildytosios realybės (AR) veiklos žymiai pagerina mokymosi procesą, paversdamos abstrakčias genetines sąvokas aiškia, interaktyvia ir vizualia patirtimi. Panardindama mokinius į DNR struktūros ir mutacijų procesų simuliacijas, AR padeda giliau suprasti ir aktyviai tyrinėti, kaip mutacijos vyksta ir veikia organizmus.

Gilesnis supratimas

„Delightex“ metu mokiniai sąveikauja su DNR grandinių ir chromosomų 3D modeliais, stebėdami, kaip replikacijos klaidos, įterpimai, ištrynimai ir chromosomų pertvarkymai keičia genetinę informaciją. Šių procesų vizualizavimas padeda besimokantiesiems suprasti priežasties ir pasekmės ryšius genetikoje, pavyzdžiui, kaip vieno nukleotido pokytis gali pakeisti baltymo funkciją arba sutrikdyti genų reguliavimą (Alberts ir kt., 2015; Griffiths ir kt., 2019).

Skirtingai nuo statinių vadovėlių vaizdų, AR modelius galima pasukti, priartinti ir manipuliuoti, o tai palaiko erdvinį mąstymą ir ilgalaikį sudėtingų biologinių procesų įsiminimą.

Sudėtingų sąvokų prieinamumas

Mutacijų tipus, tokius kaip rėmelio poslinkio mutacijos, chromosomų inversijos ar translokacijos, dažnai sunku suprasti vien diagramomis. „Delightex“ programoje mokiniai gali žingsnis po žingsnio tyrinėti šias mutacijas, vizualiai sekdami, kaip pridedami, pašalinami, dubliuojami arba apverčiami DNR segmentai. Šis interaktyvus metodas panaikina atotrūkį tarp abstrakčios genetinės teorijos ir konkretaus supratimo, todėl sudėtingos sąvokos tampa prieinamesnės įvairiems besimokantiesiems (Strachan ir Read, 2018).

Didesnis įsitraukimas per žaidimų kūrimą

„Delightex“ leidžia integruoti žaidimo pagrindu sukurtus mokymosi elementus, kurie didina motyvaciją ir ilgalaikį įsitraukimą:





- Mokiniai pelno taškus arba ženklelius už teisingą mutacijų tipų nustatymą arba jų poveikio paaiškinimą.
- Progresyvūs iššūkiai leidžia besimokantiesiems pereiti nuo paprastų taškinių mutacijų prie sudėtingų chromosomų pertvarkymų.
- Papildomos bendradarbiavimo užduotys skatina diskusijas tarpusavyje ir bendrą problemų sprendimą.

Šie elementai skatina aktyvų dalyvavimą ir skatina mokinius prisiimti atsakomybę už savo mokymosi procesą.

Ryšių su realaus pasaulio programomis kūrimas

„Delightex“ papildytosios realybės (AR) pagrindu sukurtos simuliacijos padeda mokiniams susieti mutacijų sąvokas su realaus pasaulio biologiniais ir mediciniais kontekstais. Pavyzdžiui, besimokantieji gali tyrinėti, kaip mutacijos prisideda prie genetinių ligų, atsparumo antibiotikams ar evoliucinės adaptacijos. Vizualizuodami šiuos ryšius, mokiniai geriau supranta, kodėl mutacijos yra svarbios ir už klasės ribų, ir kaip genetinė variacija formuoja gyvybę Žemėje (Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas, 2023 m.).

Švietimo poveikis

Integruodami papildytąją realybę (AR) per „Delightex“ tobulinimo etape, mokiniai peržengia įsiminimo ribas ir ugdo sąvokų supratimą, kritinį mąstymą ir refleksiją. Įtraukianti AR aplinka palaiko skirtingus mokymosi stilius, stiprina mokslinį raštingumą ir skatina smalsumą apie genetiką, evoliuciją ir biotechnologijas. Toks požiūris kloja tvirtą pagrindą būsimoms biologijos studijoms ir padeda mokiniams kritiškai įvertinti genetinių pokyčių naudą ir riziką.





Išvados

Šis mokymo modulis suteikė besimokantiejiems aiškų ir struktūrizuotą genetinių mutacijų, įskaitant jų priežastis, tipus ir biologinę reikšmę, supratimą. Mokiniai tyrinėjo, kaip mutacijos atsiranda dėl DNR replikacijos klaidų ir aplinkos veiksnių, ir kaip šie pokyčiai gali turėti žalingą, neutralų ar teigiamą poveikį organizmams. Susiejant mokslinius paaiškinimus su pažįstamais populiariosios kultūros pavyzdžiais, tokiais kaip „supergalios“, modulis padėjo besimokantiejiems kritiškai atskirti Holivudo grožinę literatūrą nuo biologinės realybės.

Papildytosios realybės (AR) veiklų integravimas į „Delightex“ atliko svarbų vaidmenį padedant suprasti. Naudodamiesi interaktyviais 3D modeliais ir simuliacijomis, mokiniai galėjo vizualizuoti DNR struktūras, mutacijų procesus ir chromosomų pertvarkymus, kuriuos sunku suvokti vien per tekstą. Ši AR pagrįsta patirtis apčiuopiamus abstrakčius genetinius mechanizmus padarė ir padėjo giliau mokytiis konceptualiai.

Tyrinėjimo, vykdymo ir tobulinimo etapuose besimokantieji lavino ne tik biologines žinias, bet ir analitinius, refleksinius bei kūrybinius įgūdžius. Jie praktikavosi atpažinti mutacijų tipus, analizuoti jų poveikį ir susieti genetinę variaciją su realaus pasaulio kontekstais, tokiais kaip ligos, evoliucija ir biotechnologijos. Žaidimų elementai ir bendradarbiavimo užduotys didinaskatino įsitraukimą ir motyvaciją, o refleksijos veikla skatino mokinius apmąstyti platesnes mutacijų pasekmes.

Apskritai šis modulis sėkmingai susiejo pradinį mokymosi tikslus su prasmingais mokymosi rezultatais. Derindamas mokslinį tikslumą, papildytosios realybės (AR) paremtą tyrinėjimą ir biologijos įkvėptą mąstymą, modulis skatina nuolatinį smalsumą ir suteikia tvirtą pagrindą tolesnėms studijoms genetikos, medicinos ir biologijos mokslų srityse.





Fazė	Aprašymas
Tyrinėjimas	- Tyrimai ir atradimai: studentai studijuoja pagrindinius mutacijų tipus (taškinės mutacijas, įterpimus, delecijas, dubliavimus, inversijas ir translokacijas). Jie tyrinėja mutacijų priežastis, įskaitant DNR replikacijos klaidas ir aplinkos įtaką, pavyzdžiui, radiaciją ir chemines medžiagas.
	- Turinio kūrimas: Mokiniai dirba su adaptuotais moksliniais tekstais, diagramomis ir vaizdine medžiaga, aiškinančia mutacijas, genetines ligas, DNR atkūrimo mechanizmus ir mutacijų vaidmenį evoliucijoje. Vaizdinis ir papildytajai realybei pritaikytas turinys pateikiamas siekiant paruošti mokinius interaktyviam tyrinėjimui „Delightex“ platformoje.
	- Poreikių analizė: mokytojai įvertina ankstesnės žinias trumpų diskusijų arba diagnostinių klausimų metu. Nustatomi mokymosi poreikiai ir klaidingos nuomonės, siekiant pakoreguoti paaiškinimus ir papildytosios realybės užduotis, kad mokiniai geriau suprastų.
Taikymas	- Mokymo programos įgyvendinimas: mokiniai dalyvauja praktinėse pamokose, naudodamiesi Delightex tyrinėti 3D DNR ir chromosomų modelius. AR scenos imituoja mutacijų procesus, tokius kaip replikacijos klaidos, rėmelio poslinkio mutacijos ir chromosomų pertvarkymai.
	- Interaktyvūs pratimai: besimokantieji stebi, kaip mutacijos formuojasi ir veikia genus, sąveikaudami su papildytosios realybės modeliais. Jie klasifikuoja mutacijų tipus, analizuoja jų biologinį poveikį ir paaiškina rezultatus, naudodami vaizdinius įrodymus iš papildytosios realybės aplinkos.
	- Atsiliepimų rinkimas: integruoti papildytosios realybės testai ir interaktyvūs kontroliniai taškai suteikia tiesioginį grįžtamąjį ryšį. Mokytojo vedamos diskusijos ir trumpi apmąstymai padeda įtvirtinti supratimą ir ištaisyti klaidas.
Gilinimas	- AR integracija: „Delightex“ naudojamas kuriant įtraukią aplinką, kurioje mokiniai savarankiškai manipuliuoja DNR ir chromosomų modeliais. Mokiniai savarankiškame AR tyrinėjimo tempe iš naujo aptaria sudėtingas sąvokas, taip stiprindami įsiminimą ir pasitikėjimą savimi.
	- Interaktyvus mokymasis: mokiniai dalyvauja dinaminėse simuliacijose, kuriose rodomos mutacijų pasekmės ir DNR atstatymo procesai. Refleksijos užduotys skatina besimokančiuosius susieti mutacijų mechanizmus su realaus pasaulio biologiniais ir mediciniais kontekstais.
	Žaidimo turinys: - Taškai ir ženkleliai: Apdovanotas už teisingą mutacijų tipų identifikavimą ir jų poveikio paaiškinimą. Užduotys ir lygiai: Studentai pereina nuo paprastų mutacijų prie sudėtingų chromosomų pokyčių. Bendradarbiavimo pagrindu atliekamos žaidimo užduotys: Mažos grupės kartu analizuoja mutacijų scenarijus ir pristato išvadas.
	AR pagrįsti vertinimai: AR testai ir vaizdiniai paaiškinimai naudojami supratimui realiuoju laiku įvertinti. Rezultatai padeda mokytojams nustatyti žinių spragas ir teikia suasmenintą grįžtamąjį ryšį.





Literatūra

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K. ir Walter, P. (2015). *Lāstelēs molekulīnē biologija* (6-asis leidimas). „Garland Science“.

Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B. ir Doebley, J. (2019). *Ivadas ģenētīnē analīzē* (12-asis leidimas). W. H. Freeman ir kompanija.

Strachan, T. ir Read, A. (2018). *Žmogaus molekulīnē ģenētika* (5-asis leidimas). „Garland Science“.

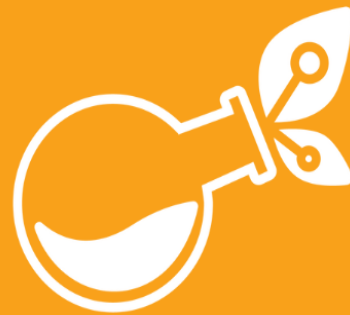
Nacionalinis žmogaus genomo tyrimų institutas. (2023). *Mutacija*. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Mutacija>

Tartu universitetas. (2024). *Molekulīnēs biologijas kurso medžiaga*. Moodle mokymosi platforma. <https://moodle.ut.ee> (Prieinama įstojusiems studentams)





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU

AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: 2023-1-DE03-KA220-SCH-000126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.