

# Točkaste mutacije i bolesti

---

**Bobinec, Adriana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:601618>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET  
BIOLOŠKI ODSJEK**

**TOČKA KASTE MUTACIJE I BOLESTI**

**POINT MUTATIONS AND DISEASES**

**SEMINARSKI RAD**

Adriana Bobinec  
Preddiplomski studij molekularne biologije  
(Undergraduate Study of Molecular Biology)  
Mentor: prof.dr.sc. Mirjana Pavlica

Zagreb, 2010.

## SADRŽAJ:

1. Uvod.....	3
2. Podjela mutacija.....	5
3. To kaste mutacije.....	6
3.1 Tihe mutacije ili „samesense” (istosmislene) mutacije.....	8
3.2 Pogrešne ili „missense” mutacije.....	9
3.3 Besmislene ili „nonsense” mutacije.....	9
3.4 Pomak okvira čitanja ili „frame-shift” mutacije.....	10
4. Bolest uzrokovana to kustom mutacijom - srpasta anemija.....	11
4.1. Genetika bolesti srpastih stanica.....	12
4.2. Patofiziologija bolesti srpastih stanica.....	12
5. Mitohondrijska DNA i bolesti.....	14
5.1 Leberova nasljedna optička neuropatija.....	17
5.2 MELAS sindrom.....	18
5.2.1 Genetika i patofiziologija MELAS sindroma.....	19
6. Detekcija to kastih mutacija.....	20
7. Zaključak.....	21
8. Literatura .....	23
9.Sažetak.....	25
9.Summary.....	26

# 1. Uvod

Mutacije su trajne promjene u geneti kom materijalu stanice (DNA ili RNA molekuli) koje, ukoliko su se dogodile u spolnim stanicama, postaju nasljedne i prenose se na potomstvo. Uzroci mutacija su mnogobrojni: nastaju spontano u DNA tijekom replikacije kada se parovi baza pogrešno spare, ili kada nasumi no nastanu spontane lezije unutar DNA molekule. Osim spontanih mutacija, postoje i inducirane mutacije. Stopa takvih mutacija pove a se pod utjecajem vanjskih faktora poput zra enja ili djelovanja nekih mutagenih kemijskih tvari ili virusa (<http://en.wikipedia.org/wiki/Mutations>).

U ve ini se slu ajeva, greške u replikaciji DNA, odmah ispravljaju zahvaljuju i stani nom mehanizmu DNA popravka bez kojeg organizam koji je pretrpio mutaciju na nekom od esencijalnih gena ne bi preživio. Osim brojnih mehanizama popravka krivo sparenih baza u stanici i sama gra a DNA kao dvostruke zavojnice te komplementarnost me u parovima baza (A se uvijek sparuje s T, a C se uvijek sparuje s G) omogu uju visoku vjernost replikacije. Ukoliko je došlo do pogreške prilikom sparivanja, krivo sparene baze se izrežu uz pomo enzima i ponovno nadomjeste pravilnim bazama uz pomo komplementarnog lanca DNA koji služi kao kalup. Prosje na stopa mutacija iznosi  $10^{-6}$  do  $10^{-10}$  po jednom replikacijskom ciklusu. Odre ena mjesta u DNA zavojnici nazivaju se "vru im mjestima" za mutacije i odlikuju se ve om stopom mutacija od prosje ne. U tim regijama je DNA osjetljivija na ošte enja nego u ostalim regijama ili su odre ene sekvence DNA poput CpG sekvenci podložnije spontanim mutacijama. Citozin je esto metiliran te postoji u obliku 5-metilcitozina i zato lako deaminacijom prije e u timin koji prirodno postoji u molekuli DNA i DNA sustav za popravak krivo sparenih baza ne e ga prepoznati kao grešku (<http://www.dodaj.rs/f/2H/jE/2oJI0WBo/05-mutabilnost-i-reparac.pdf>).

Ponekad stani ni sustav koji radi korekciju krivo sparenih baza u DNA ne ispravi sve greške i do e do trajne promjene u DNA sekvenci koju onda nazivamo mutacijom (Alberts i sur. 1994.). Osobito je važno da se stopa mutacija u spolnim stanicama održava niskom kako se mutacije ne bi prenosile na potomstvo i kako bi se o uvale karakteristike vrste. U somatskim pak stanicama, mutacije mogu uzrokovati proliferaciju odre enih stanica koje preživljavaju na ra un drugih stanica i stvaraju tumore. Ve ina mutacija koje su smrtonosne za organizam eliminiraju se putem prirodne selekcije (Alberts i sur. 1994.) te se letalna ošte enja u DNA

molekuli ne smatraju pravim mutacijama jer uzrokuju smrt stanice. To posebice vrijedi za bakterije kod kojih letalne mutacije uzrokuju smrt organizma i stoga mutacija ne može biti prenesena na potomke.

Iako je za preživljavanje organizma geneti ka stabilnost jedan od glavnih preduvjeta, dugoro no gledaju i, za preživljavanje vrsta i populacija, ve a stopa mutacija može biti korisna jer donosi geneti ku varijabilnost koja u promjenjenim životnim uvjetima može biti od velike koristi. Mutacije stoga ubrzavaju evoluciju samih organizama jer su zahvaljuju i promjenama u DNA oni bolje adaptirani na okoliš i imaju ve u šansu za preživljavanje (Alberts i sur. 1994.).

Mutacije mogu imati razli ite u inke na organizam ovisno o tome koji dio genoma zahva aju te jesu li zahvatile kodiraju u ili nekodiraju u regiju DNA što je zna ajno kod eukariotskih organizama.

Mutacije se koriste i kao vrlo prakti no oru e u otkrivanju funkcije gena u molekularnoj biologiji, posebice na prokariotskim organizmima kod kojih je generacijsko vrijeme kratko i jednostavni su uvjeti uzgoja. Prou avanjem fenotipa mutanata za razli ite lokuse na razli itim genima dolazi se do zaklju aka o funkciji gena (Snyder i Champness, 2007.).

Mutacije imaju važnu ulogu i u razumijevanju evolucije, posebice makromolekula koje su važne za razvoj odvedenijih karakteristika me u živim bi ima. Naime, utvr eno je kako je za svaku promatranu evolucijsku liniju evolucijska stopa konstantna. To zna i da je broj mutacija kroz odre eno vrijeme za pojedinu molekulu relativno stalan te se stoga može odrediti starost pojedinih makromolekula i trenutak njihove divergencije od zajedni kog pretka (Stearns i Hoekstra, 2005.).

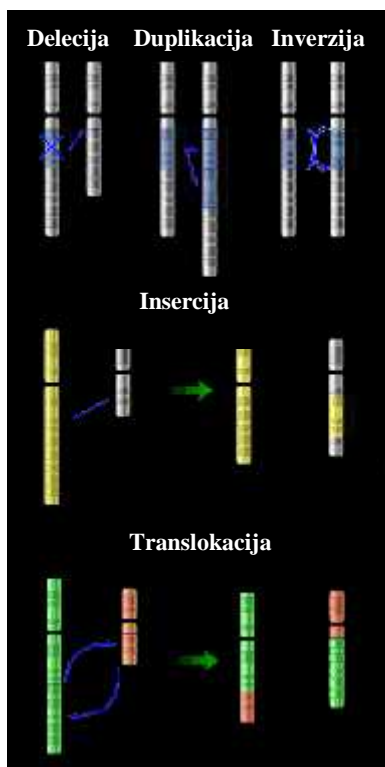
To kaste mutacije su mutacije supstitucije jednog nukleotida drugim u sekvenci DNA i mogu bitno utjecati na sintezu proteina odnosno njegovu funkcionalnost. Danas je poznato da mutacije uzrokuju oko 6 000 bolesti kod ljudi, a polimorfizmi u DNA stvaraju predispozicije za još tisu e drugih bolesti. Geneti ki utjecaj može biti jedini potreban faktor za ispoljavanje bolesti- tada govorimo o monogenским bolestima koje su uzrokovane mutacijom u jednom genu. U drugom slu aju su za bolest odgovorni kako geneti ki faktori tako i faktori okoline. Me u naj eš e bolesti uzrokovane to kastim mutacijama ubrajaju se cisti na fibroza, hemofilije te razli ite neuromiši ne bolesti (<http://www.dodaj.rs/f/2H/jE/2oJIOWBo/05-mutabilnost-i-reparac.pdf>).

## 2. Podjela mutacija

Mutacije se mogu podijeliti prema veličini segmenta DNA koji zahvaćaju, prema njihovom utjecaju na strukturu i funkciju gena, te na fitness organizma. Podjela mutacija može se raditi i prema faktorima koji ih uzrokuju tj. mutacije mogu nastati spontano ili mogu biti inducirane pomoću nekih vanjskih mutagena. S obzirom na to koliki je njihov utjecaj na strukturu DNA molekule i koliko su parova baza zahvatile, možemo ih podijeliti na makrolezije i mikrolezije.

U makrolezije ubrajamo sve mutacije koje uzrokuju velike kromosomske rearanžmane poput delecija, inverzija, duplikacija, insercija i translokacija. Takve mutacije mogu zahvatiti nekoliko gena pa i cijele kromosome (Slika 1).

Mikrolezije su mutacije koje zahvaćaju manje dijelove DNA. Nastaju supstitucijom (zamjenom) jednog nukleotida drugim (točaste mutacije) te insercijom ili delecijom jednog ili više nukleotida u genu. Takve mutacije su "frame-shift" mutacije jer uzrokuju promjene u okviru čitanja gena, mogu izazvati preuranjenu terminaciju sinteze polipeptidnog lanca ili producirati inaktivne proteine.

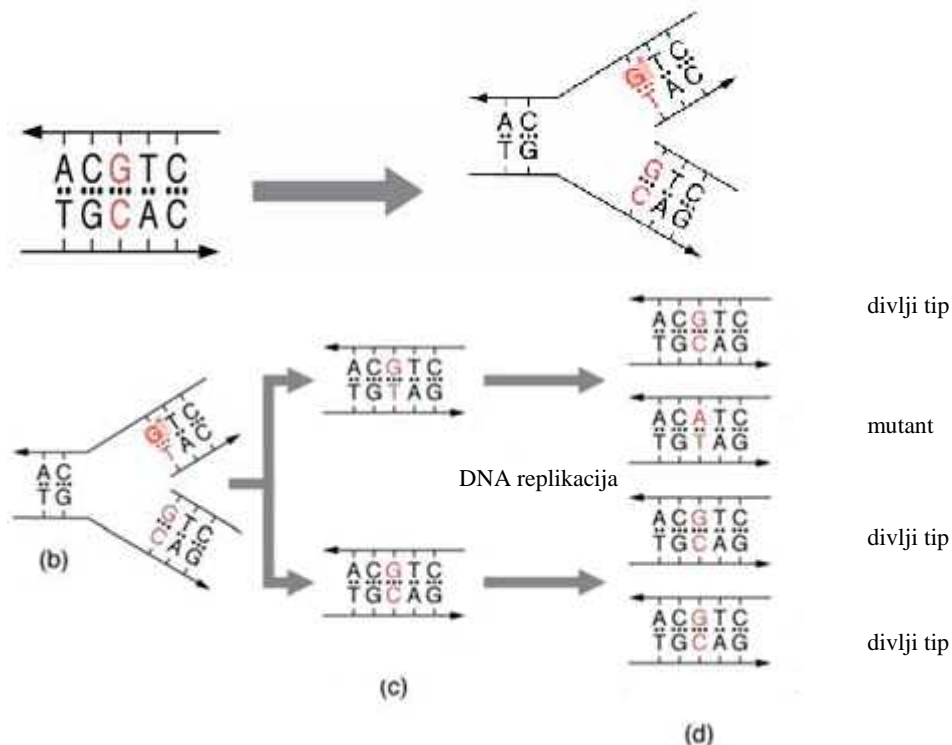


**Slika 1.** Prikaz 5 različitih kromosomskih makrolezija (<http://en.wikipedia.org/wiki/Mutations>).

### 3. To kaste mutacije

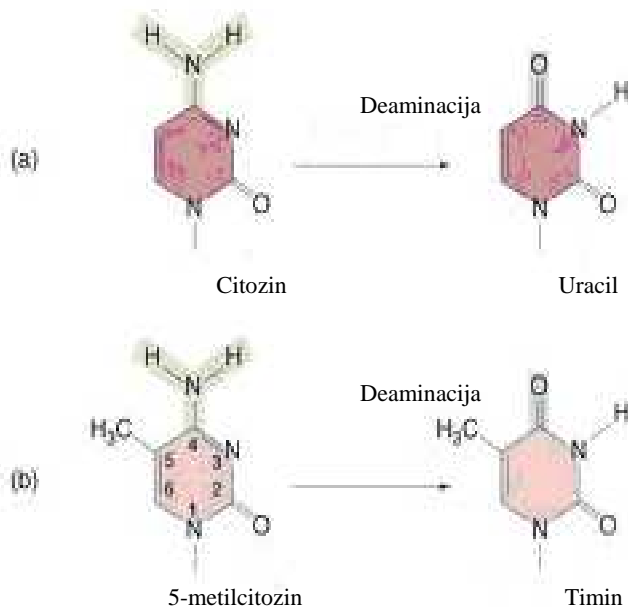
To kaste mutacije spadaju u kategoriju mikrolezija jer su to mutacijske promjene u DNA ili RNA koje obuhvaćaju supstituciju jedne baze ili para baza (<http://en.wikipedia.org/wiki/Mutations>). Baze adenin i gvanin sadrže dva prstena i nazivamo ih purinskim bazama, dok citozin i timin kao i uracil gradi samo jedan prsten i nazivamo ih pirimidinskim bazama (Alberts i sur. 1994.). Supstitucije baza dijelimo na tranzicije i transverzije. U tranziciji je purinska baza (A ili G) u baznom paru zamijenjena drugim purinom, a pirimidin (C ili T) je zamijenjen drugim pirimidinom. U tom slučaju AT par bit će zamijenjen GC parom (Slika 2) ili obrnuto CG par TA parom. U transverziji se dođe do zamjene purina pirimidinom i obrnuto npr. GC par se zamijeniti TA parom odnosno CG se postati AT par (Snyder i Champness, 2007.).

Tranzicije su općenito češće od transverzija. Do takvih promjena u parovima baza dolazi najčešće zbog pogrešaka prilikom replikacije DNA, a to se posebice događa na mjestima koja se nazivaju "vrućim mjestima" budući da su podložnija mutacijama.



**Slika 2.** G je u lancu kalupu prešao u tautomerni oblik i njemu nasuprot ugrađen je T. Ako nije došlo do popravka prije sljedeće replikacije dolazi do trajne promjene u strukturi DNA odnosno mutacije (<http://www.studentsguide.in/microbiology/microbial-genetics-mutations-genetic-recombination-in-bacteria/spontaneous-mutations.html>).

Deaminacija baza odnosno micanje jedne amino grupe sa baznog prstena tako er može uzrokovati to kaste mutacije. Citozin je posebno sklon deaminaciji i tada lako postane uracil micanjem amino grupe sa 6. položaja u citozinskom prstenu (Slika 3). Budu i da se uracil sparuje sa adeninom, a ne s timinom kao citozin, ukoliko se uracil nastao deaminacijom ne makne iz DNA, do i e do promjene CG baznog para u TA par tj. do tranzicije. Budu i da je deaminacija citozina esta pojava, organizmi su razvili posebni mehanizam za izrezivanje uracila iz DNA pomo u enzima uracil-*N*-glikozilaze. Ova deaminacija toliko je esta kod svih organizama da sve toplokrvne životinje, uklju uju i sisavce, imaju testise izvan tijela gdje je temperatura niža i time je smanjena frekvencija deaminacije, dakle mutacija (Snyder i Champness, 2007.).



**Slika 3.** Spontana deaminacija baza  
(<http://www.bio.miami.edu/dana/pix/deamination.jpg>)

To kaste mutacije koje se dogode u nekodiraju oj regiji genoma obično nemaju nikakvih posljedica, no ukoliko se mutacija dogodila u promotorskoj regiji gena, ona može imati utjecaja na njegovu ekspresiju. Ukoliko se mutacija dogodila na mjestu izrezivanja introna tako er može do i do pogrešnog izrezivanja što može imati posljedice za transkribiranu pre-mRNA molekulu ([http://en.wikipedia.org/wiki/Point\\_mutation](http://en.wikipedia.org/wiki/Point_mutation)).

To kaste mutacije su reverzibilne tj. povratne, iako se to doga a manjom učestaloš u. Reverzija može biti egzaktna ili ekvivalentna (Shema 1):



## 1. Egzaktna reverzija

AAA (Lys)	GAA (Glu)	AAA (Lys)
divlji tip	mutant	reverzija

## 2. Ekvivalentna reverzija

UCC (Ser)	UGC (Cys)	AGC (Ser)
divlji tip	mutant	reverzija

CGC (Arg, bazi na ak)	CCC (Pro, neutralna ak)	CAC (His, bazi na ak)
divlji tip	mutant	reverzija

**Shema 1.** Prikaz egzaktne i ekvivalentne reverzije to kastih mutacija.

### 3.1 Tihe mutacije ili “samesense” (istosmislene) mutacije

To su one to kaste mutacije koje se dogode u kodiraju o j regiji genoma, ali nemaju nikakav utjecaj na slijed aminokiselina u proteinu za koji gen kodira (Slika 4). Ponekad takva mutacija stvori istu ili vrlo sli nu aminokiselinu onoj koja bi nastala da se mutacija nije dogodila. Npr. zamjena AGG CGG ne e uzrokovati promjenu u aminokiselinskom sastavu proteina jer oba tripleta kodiraju za aminokiselinu arginin.

### 3.2 Pogrešne ili “missense” mutacije

Ovakve mutacije uzrokuju zamjenu jedne aminokiseline u polipeptidnom lancu drugom aminokiselinom (Slika 4). Te mutacije su često propusne (“leaky”) što znači da se fenotip mutacije ne ispoljava i funkcija proteina je očuvana. No takvi proteini se ipak često eksprimiraju u manjoj mjeri ili su manje stabilni nego što je slučaj kod divljeg tipa. Ovakve mutacije mogu biti:

1. Sinonimne- npr. bazi na aminokiselina se promjeni u neku drugu bazu u aminokiselinu
2. Nesinonimne- npr. bazi na aminokiselina se promjeni u kiseli aminokiselinu

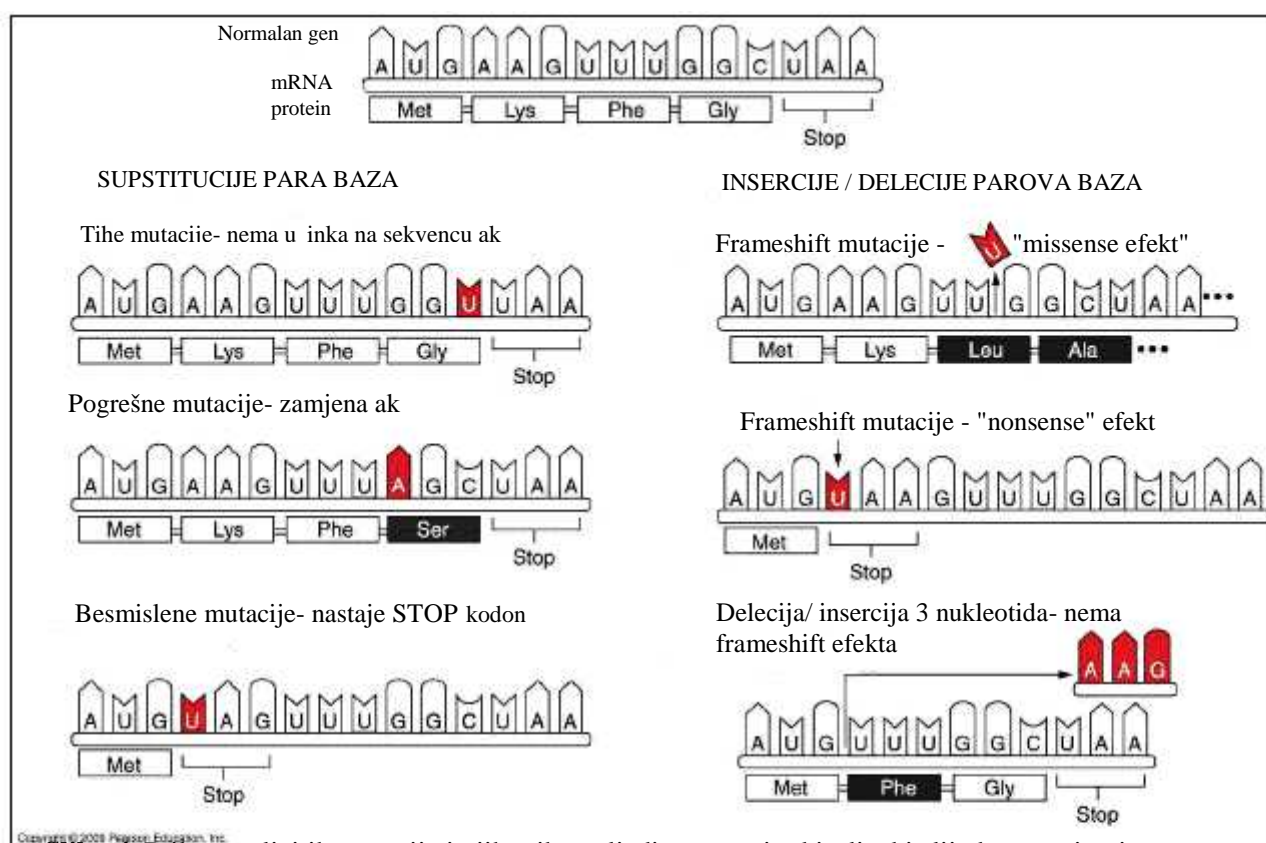
Veoma je važan i položaj aminokiseline u peptidu na kojem se dogodila mutacija. Ukoliko je mutirana aminokiselina npr. važna za aktivnost proteina onda će to imati veći utjecaj na protein nego što bi imala mutacija u nekoj drugoj manje važnoj proteinskoj domeni (Snyder i Champness, 2007.).

### 3.3 Besmislene ili “nonsense” mutacije

Ponekad umjesto da mutacijom nastane kodon za neku drugu aminokiselinu, promjenom baznih parova nastanu besmisleni kodoni UGA (“opal”), UAA (“ochre”) ili UAG (“amber”) (Slika 4). Takve mutacije nazivamo besmislenima jer ovi kodoni označavaju kraj transkripta gena i uzrokuju oslobađanje polipeptidnog lanca sa ribosoma čime se završava sinteza proteina. Ukoliko je ovakva mutacija nastupila u otvorenom okviru čitanja doći će do preuranjene terminacije translacije proteina i proteinski produkt neće biti skraćen i uvelike će biti nefunkcionalan. Ako do ove mutacije dođe u nekodirajućoj DNA ili u regiji koja kodira za RNA takve promjene neće imati bitnije posljedice po stanicu. Ako je mutacija zahvatila mjesto izrezivanja introna u DNA to može imati negativan utjecaj na proteinsku funkciju kod eukariota. Ponekada i besmislene mutacije mogu biti propusne jer se nekada umjesto “nonsense” kodona umetne kodon za neku aminokiselinu; najpropusnija je UGA mutacija. “Nonsense” mutacije također su reverzibilne (Snyder i Champness, 2007.).

### 3.4 Pomak okvira itanja ili "frame-shift" mutacije

"Frame-shift" mutacije su u velikom postotku zastupljene kod spontanijh mutacija. Nastaju kada se odre eni broj baza (manje od 3) doda ili makne iz sekvence DNA što uzrokuje pomak u okviru itanja ako se mutacija dogodila u dijelu DNA koja kodira za polipeptide. Budu i da je svaka aminokiselina kodirana tripletom parova baza koji ine jedan kodon, delecija ili insercija jedne ili više baza, može dovesti do pomaka u okviru itanja (Slika 4). To za posljedicu može imati inaktivaciju proteina, budu i da je svaka aminokiselina ugra ena nakon mutacije, kriva aminokiselina. Protein je esto i kra i od normalnog jer se iza ovakvih mutacija esto pojave i "nonsense" kodoni koji uzrokuju preuranjenu terminaciju translacije proteina. Ove mutacije su obi no nepropusne, ali mogu revertirati. Doga aju se spontano na mjestima gdje postoje kratke ponavljaju e sekvence koje prokližu (Snyder i Champness, 2007.) tijekom replikacije zbog ega neke baze ostanu nesparene i do e do pomaka u okviru itanja.



Slika 4. Prikaz razli itih mutacija i njihovih posljedica na aminokiselinski slijed u proteinu i sintezu samog protein. (<http://www.dodaj.rs/f/2H/jE/2oJI0WBo/05-mutabilnost-i-reparac.pdf>)

Bolest srpastih stanica ili anemija srpastih stanica je geneti ki poreme aj uzrokovan to kastom mutacijom u genu za globinski  $\beta$  lanac hemoglobina koji za posljedicu ima abnormalne, rigidne eritrocite srpastog oblika. Takvi eritrociti manje su elasti ni od normalnih, lakše se kidaju i stoga prijevremeno propadaju te njihov raspad osim anemije uzrokuje cijeli niz razli itih komplikacija u organizmu.

Bolest srpastih stanica se javlja u djetinjstvu i eš e zahva a negroidno stanovništvo tropskih i subtropskih podru ja (Slika 5). Razlog tome je malarija koja se tako er ve om u estaloš u javlja upravo u tim podru jima. Ove dvije bolesti imaju zanimljivu poveznicu tako što osobe heterozigoti za bolest srpastih stanica imaju ve e šanse za preživljavanjem malarije ukoliko budu zaražene. Naime, parazit malarije dio svog životnog ciklusa provodi u crvenim krvnim stanicama, no ukoliko su one srpaste, nakon ulaska parazita do i e do njihovog raspadanja i parazit se u njima ne može razmnožiti. Nosioci jednog od alela za anemiju srpastih stanica u sluaju zaraženosti malarijom mo i e stvarati nešto srpastih stanica i stoga imati ve u šansu za preživljavanjem malarije. Drugim rije ima, heterozigoti za bolest srpastih stanica e imati bolji fitnes u odnosu na bilo koji od dva mogu a homozigota ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)).



**Slika 5.** Zemljopisna karta podru ja u kojima je zastupljena bolest srpastih stanica. Smatra se da je mutacija koja dovodi do bolesti srpastih stanica nastala spontano na više razli itih geografskih podru ja ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)).

#### 4.1. Genetika bolesti srpastih stanica

Uzrok bolesti srpastih stanica je jedna to kasta mutacija u  $\beta$ - globinskom genu koji kodira  $\beta$  globinski lanac hemoglobina (Hb). Naj eš i tip Hb kod ljudi je hemoglobin A gra en od dva i dva  $\beta$  lanca. Alel odgovoran za ovu anemiju nalazi se na kra em kraku kromosoma 11 i producira hemoglobin srpastih stanica (Hb<sup>S</sup>). Zamjena jednog nukleotida (A T) uzrokuje zamjenu hidrofilne glutaminske kiseline hidrofobnim valinom na položaju 6, odnosno zamjenu GAG kodona u GTG kodon prilikom translacije proteina. Ovakva mutacija je u normalnim uvjetima bezazlena i ne utje e bitnije na sekundarnu, tercijarnu ili kvarternu strukturu Hb ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)). No, primjerice u uvjetima niske koncentracije kisika, ova mutacija uzrokuje polimerizaciju lanaca Hb<sup>S</sup> što za posljedicu prvenstveno ima nastanak abnormalnih eritrocita, a to uzrokuje brojne ozbiljne poteško e za organizam.

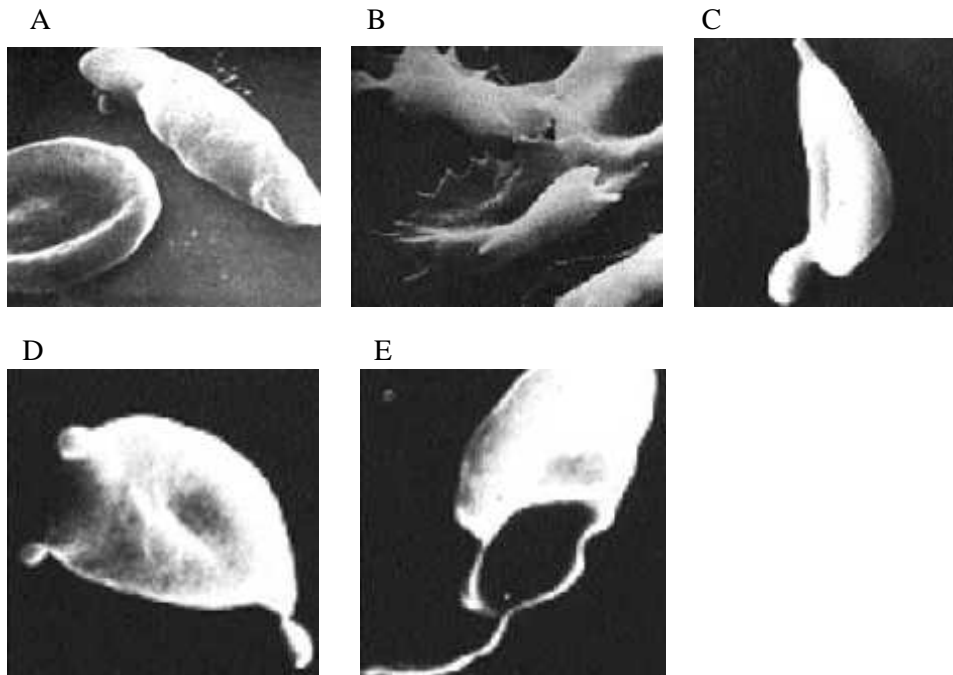
Heterozigoti za ovu bolest rijetko pokazuju simptome jer normalni alel stvara preko 50% normalnog Hb. Kod homozigota za ovu bolest, do polimerizacije Hb<sup>S</sup> e do i samo u odre enim uvjetima. To se može dogoditi npr. u uvjetima nedostatka kisika na višim nadmorskim visinama, jake dehidracije organizma, acidoze ili poja ane fizi ke aktivnosti ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)).

Ova bolest je ujedno prva smrtonosna bolest kod ljudi za koju je otkriveno da je uzrokovana to kastom mutacijom na nekom genu.

## 4.2. Patofiziologija bolesti srpastih stanica

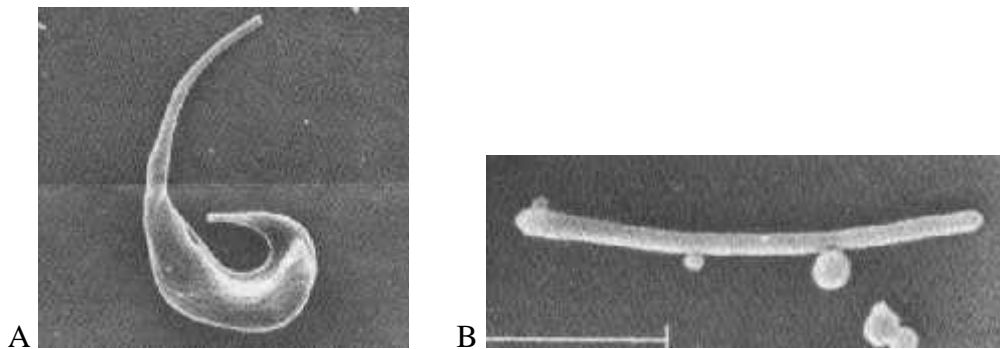
Kada se hemoglobin iz srpastih stanica deoksigenira, zamjena  $\beta_6$  glutaminske kiseline valinom, uzrokuje hidrofobnu interakciju jedne molekule Hb<sup>S</sup> sa drugom molekulom Hb<sup>S</sup>. Jedna od dvije  $\beta$  podjedinice stvara hidrofobne interakcije sa akceptorskom  $\beta$  podjedinicom drugog  $\beta$  lanca (<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>). Naime, nedostatak polarne glutaminske aminokiseline na šestom mjestu u Hb<sup>S</sup>, u uvjetima niske koncentracije kisika, primjerice na visokim nadmorskim visinama, uzrokovati e spontanu, nekovalentnu polimerizaciju Hb<sup>S</sup> lanaca. To uzrokuje promjenu oblika eritrocita i znatno smanjuje njihovu elasti nost ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)). Polimerizacija Hb<sup>S</sup> je jedan od prvih doga aja u molekularnoj patogenezi bolesti srpastih stanica. Crvene krvne stanice mogu imati razli ite oblike, ovisno o tome gdje se u stanici dogodila polimerizacija

lanaca, eritrociti postaju rigidniji te lakše pucaju prolaskom kroz kapilare (Slika 6) (<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>). To uzrokuje za epljenje krvnih žila što pak dovodi do ishemije koja može uzrokovati nekrozu tkiva.



**Slika 6.** Prikaz crvenih krvnih stanica. A, Normalni eritrocit. B - E, različiti oblici eritrocita sa srpastom anemijom (<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>).

Srpasti eritrociti imaju drugačiju organizaciju fosfolipidnog dvosloja membrana. Membrane ovih eritrocita su razorene zbog unutarstaničnog nakupljanja polimera što rezultira nastankom spikula (Slika 7). Proteini skeleta se više ne mogu vezati za membranu eritrocita što uzrokuje pojačanu izmjenu lipida između unutrašnje i vanjske membrane, procesom koji je poznat pod nazivom “flip-flop” (Franck i sur. 1985). Abnormalni skelet membrane je uzrok intenzivnih flip-flop procesa. Nastanak spikula tako uzrokuje promjenu u kemijskoj strukturi što povećava vjerojatnost nakupljanja i koagulacije eritrocita zahvaćenih ovom bolešću (predtrombinsko stanje) (<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>).



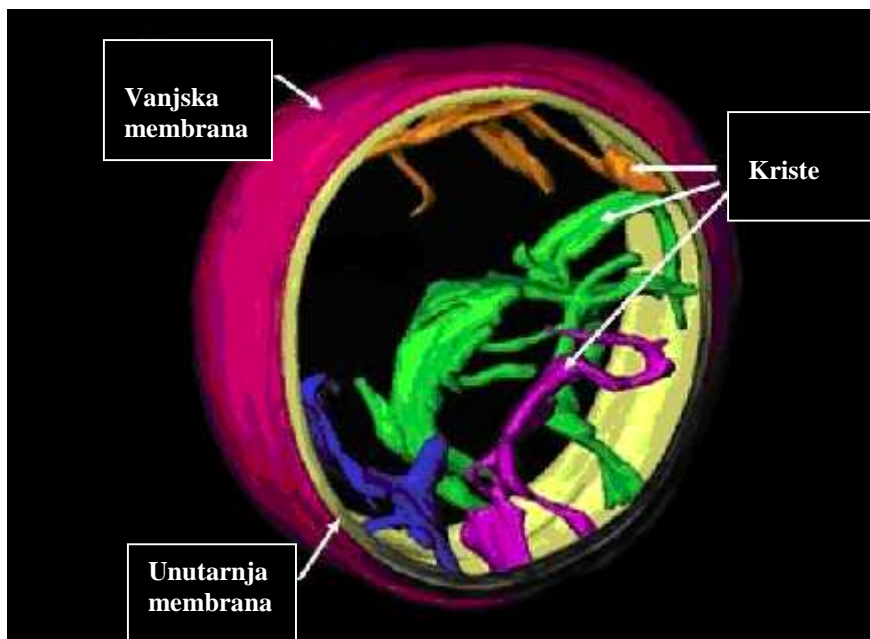
**Slika 7.** A, deoksigenirani nativni eritrocit kod srpaste anemije. B, spikule izolirane iz srpastog eritrocita (<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>).

Iako vlada pretpostavka kako oboljeli od ove bolesti rijetko dožive odraslu dob, 1980-ih je provedeno istraživanje u SAD-u koje je pokazalo da je za muškarce srednja dob preživljenja 42 godine, a za žene 48 godina. Primjetno je da oboljeli koji u krvi imaju veće koncentracije fetalnog Hb imaju veći šansu da duže počive. Također je ustanovljeno da ukoliko su bolesnici kao djeca imali niske koncentracije fetalnog Hb u krvi imaju veći rizik od ranije smrti u odrasloj dobi. Taj podatak je važan jer se kod djece sa dijagnosticiranom bolešću u ranom djetinjstvu može odmah po etički sa poticanjem stvaranja fetalnog Hb lijekovima (Platt i sur. 1994.) ili ih se može uputiti na transplantaciju koštane srži. Pokazalo se da kod djece koja imaju dijagnosticiranu bolest srpastih stanica, transplantacija koštane srži ima pozitivan efekt, ali isti zahvat ne pomaže bolesnicima u odrasloj dobi ([http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)).

## 5. Mitohondrijska DNA i bolesti

Mitohondriji su stanični semiautonomni organeli koji sadrže vlastitu DNA, vlastitu RNA i vlastite ribosome što im omogućuje da se repliciraju samostalno, neovisno od replikacije jezgrične DNA, te samostalno sintetiziraju neke od proteina. Smatra se da su mitohondriji porijeklom prokariotske proteobakterije koje su procesom endosimbioze ušle u preteku današnje eukariotske stanice i postali njeni endosimbionti. Brojni dokazi potvrđuju ovu teoriju, a jedan od najvažnijih je postojanje vlastite mitohondrijske DNA unutar eukariotske stanice ([http://en.wikipedia.org/wiki/Endosymbiotic\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Endosymbiotic_theory)).

Mitohondrijska DNA ima ukupno 37 gena: 22 tRNA, 2 rRNA i 13 peptidnih gena (<http://en.wikipedia.org/wiki/Mitochondrion#Structure>). Mitohondriji unato posjedovanju vlastitog geneti kog materijala ipak u određenoj mjeri ovise o jezgri DNA jer nisu sposobni sami sintetizirati sve proteine koji su im potrebni. Ovi organeli su obavijeni dvostrukom membranom i unutrašnja membrana je jako naborana te tvori nabore ili kriste. Na njima se odvija glavna procesa oksidativne fosforilacije kojom mitohondriji stvaraju zalihe stanih ATP-a (Slika 8).



**Slika 8.** Ilustracija poprečnog prereza mitohondrija. Vidljiv je odnos površine dviju membrana i površine krista na kojima se odvija proces oksidativne fosforilacije (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MitochondrionCAM.jpg>).

Mitohondrijski poremećaji uglavnom pogađaju tkiva koja imaju povećane potrebe za ATP-om, poput mozga i mišića. Većina takvih poremećaja se ne može uspješno liječiti i smrtonosni su za oboljelu osobu (Bigger i sur., 1999.).

Mitohondrijske encefalomiopatije su raznovrsne skupine poremećaja uzrokovane strukturnim, biokemijskim ili genetičkim promjenama u mitohondrijima. Disfunkcije u ovim organelima mogu zahvatiti gotovo sve organske sustave, a neke od karakteristika njihove DNA zaslužne su za povezivanje ovih organela i različitih bolesti (Johns, 1995.).

Neke od karakteristika mitohondrijske DNA (mtDNA) su da mutira 10 puta češće od jezgri DNA, mtDNA ne sadrži prave intronske sekvence kakve nalazimo u jezgri



eukariotskih stanica, te se nasumične mutacije velikom većinom događaju u genima koji kodiraju proteine. Osim tih karakteristika, značajno je i da mtDNA nema histone koji bi je štitali, kao ni mehanizam popravka DNA. Istovremeno je puno podložnija mutacijama zbog oksidativnog uinka slobodnih radikala koji se oslobađaju u mitohondrijima u procesu oksidativne fosforilacije (Johns, 1995.). Zbog svega toga mitohondrijska DNA evoluirala oko 10 puta brže od jezgrične DNA.

Mitohondrijska DNA se nasljeđuje samo preko majčinske linije te u njoj ne dolazi do rekombinacije. Svaki mitohondrij sadrži dvije do deset molekula DNA, te svaka stanica sadrži veću ili manju količinu mutirane mtDNA i normalnu mtDNA koegzistiraju u stanici. Ovakvo stanje naziva se heteroplazmija i omogućuje da se i letalna mutacija održi u stanici. Homoplazmija je pojava kada stanica sadrži ili potpuno normalnu ili potpuno mutiranu mtDNA (Johns, 1995.).

Procesima replikativne segregacije dolazi do različitog omjera raspodjele mutirane i normalne mtDNA u mitohondrijima, ovisno kako se mtDNA preraspodjeli u stanice kćeri. Količina mutirane mtDNA potrebna za pojavu mutantnog fenotipa varira od osobe do osobe i ovisi o samim organskim sustavima i tkivima pojedinca.

Mitohondrijske fenotipove koji predstavljaju različite vrste bolesti mogu uzrokovati već i rearanžmani u mtDNA (delecije, duplikacije i sl.), ali i toke mutacije ukoliko se dogode u dijelovima gena važnim za aktivnost proteina. Danas je poznato 118 toke mutacija u mtDNA koje uzrokuju različite bolesti (Martin-Kleiner i sur. 2006.).

Mutacije koje mogu prouzročiti letalno oštećenje u procesu oksidativne fosforilacije su vijabilne samo ako su heteroplazmatske. No već i blažih, "missense" mutacija u genima koji kodiraju za proteine, su homoplazmatske mutacije. Također je pronađeno da mutacije gena za tRNA prevladavaju u slučajevima mitohondrijske encefalomiopatije, dok primjerice, u slučaju Leberove nasljedne optičke neuroretinopatije, prevladavaju mutacije u genima koji kodiraju za proteine (Johns, 1995.).

## 5.1. Leberova nasljedna optička neuropatija (LHON)

Leberova nasljedna optička neuropatija prva je bolest dijagnosticirana u ljudi koja je povezana sa nasljednom točkastom mutacijom u mtDNA koja se nasljeđuje po majčinskoj liniji. LHON je primjer homoplazmatske “missense” mutacije koja pogađa muškarce nego žene i javlja se u drugom ili trećem desetljeću u života (Johns, 1995.). Danas je poznato da je LHON povezan sa preko 30 različitih točkastih mutacija u mtDNA od kojih su tri najčešće G3460A, G11778A i T14484C. Ove mutacije uzrokuju defekte u podjedinicama kompleksa I (NADH-dehidrogenaza-ubikvinon-reduktaza) u mitohondrijima. G11778A točkasta mutacija u mtDNA se manifestira kao ozbiljni gubitak vida. LHON prvo uzrokuje gubitak vida tijekom nekoliko tjedana na jednoj oku, te tijekom sljedećih mjesec do dva i na drugom oku. Gubitak vida je obično jedina klinička značajka ove bolesti (Martin-Kleiner i sur. 2006.).

U radu u kojem su istraživane dvije hrvatske obitelji, dijagnosticirana je točkasta mutacija u mtDNA, LHON G11778A, kod tri mlada muškarca. Pokazalo se da su majke i žene koje su bile u srodstvu sa ova tri LHON pacijenta, nosioci LHON G11778A mutacije u mtDNA, ali one nisu imale nikakvih problema sa vidom niti su bolovale od drugih bolesti. Istraživanje je također pokazalo da se bolest javlja u mlađih muškaraca. Međutim daljnjim istraživanjem 13 pacijenata, iz triju obitelji, oboljelih od optičke neuropatije, ove tri najčešće u mtDNA mutacije nisu pronađene. Autori to objašnjavaju velikim brojem mutacija koje uzrokuju LHON te ističu kako nije dovoljno dijagnosticirati LHON samo na temelju kliničkih testova već je nužno napraviti i genetičku analizu i utvrditi postoje li točkaste mutacije u mtDNA. Budući da za ovu bolest još nema lijeka, važno je genetički savjetovati obitelji koje imaju dijagnosticiran LHON kada planiraju potomstvo. Pri tome je važno znati da žene koje su nosioci mutacije u mtDNA neće oboljeti od ove bolesti (Martin-Kleiner i sur. 2006.).

## 5.2. MELAS sindrom

MELAS sindrom (mitohondrijska encefalopatija s laktoacidozom i ishemijskim napadima) je progresivni, neurodegenerativni poremećaj. To je multisistemska bolest koja zahvaća centralni živčani sustav, skeletne mišiće, srčani mišić, oči te u rjeđim slučajevima i bubrege (<http://www.plivamed.net/?section=home&cat=t&id=24647&show=1>).

Uzrok MELAS sindroma su mutacije u mitohondrijskoj DNA i on se nasljeđuje isključivo majčinskom linijom, no zabilježeni su i slučajevi nastanka novih mutacija u mtDNA i pojave ovog sindroma kod bolesnika koji nemaju nikakvih nasljednih predispozicija za oboljevanje ([http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS\\_syndrome](http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS_syndrome)).

Glavni pokazatelj bolesti je pojava hemipareze tj. nemogućnosti voljne mišićne kontrakcije jedne polovice tijela ([http://www.plivazdravlje.hr/medicinskileksikon/5576/Hemipareza?plivahealth\[term\]=5576](http://www.plivazdravlje.hr/medicinskileksikon/5576/Hemipareza?plivahealth[term]=5576)) kao i pojava hemianopsije odnosno gubitka polovice vidnog polja ([http://hr.wikipedia.org/wiki/Oftalmolo%C5%A1ki\\_pregled](http://hr.wikipedia.org/wiki/Oftalmolo%C5%A1ki_pregled)).

U skup poremećaja koji su povezani s ovim sindromom spadaju još i hipertenzija, miopatija, hipotonija ili smanjenje mišićnog tonusa, u mišićima se nakuplja mliječna kiselina što uzrokuje zakiseljavanje krvi što pak dovodi do povraćanja, abdominalne boli i zamora mišića (Slika 9). Kod oko 25% pacijenata javlja se gluhoća, zatim različiti poremećaji s kožom, nizak rast kao jedna od prvih manifestacija ovog sindroma te napadaji koji su popraćeni konvulzijama, migrenoznim glavoboljama, poremećajem vida itd. (<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>).

Bolesnici imaju napadaje slične moždanom udaru koji uzrokuju subakutne disfunkcije mozga, promjene u cerebralnoj strukturi i neke dodatne abnormalnosti (Johns, 1995.). Ovaj progresivni poremećaj općenito ima veliku stopu smrtnosti, javlja se podjednako kod oba spola i to između 4. i 15.-te godine života (<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>).

### 5.2.1. Genetika i patofiziologija MELAS sindroma

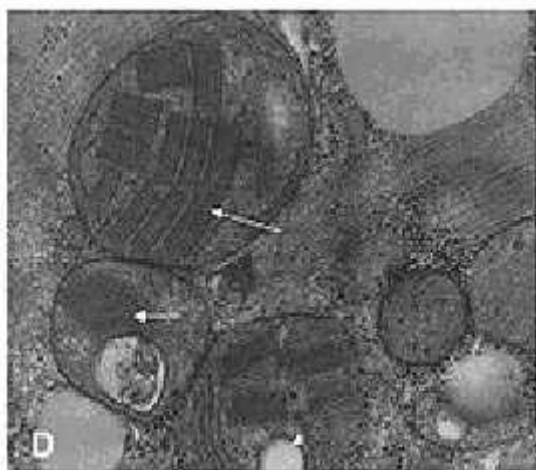
Približno 80% pacijenata sa kliničkim karakteristikama MELAS sindroma imaju heteroplazmatsku A → G to kasku mutaciju u omi dihidrouridina gena za transfer RNA; (*tRNA*)<sup>Leu (UUR)</sup> na baznom paru 3243. No osim ove, postoji još zabilježenih to kaskih mutacija na istome mitohondrijskom genu: 3244 G → A, m.3258 T → C, m.3271 T → C, i m.3291 T → C. Ove mutacije su heteroplazmatske što ukazuje na prisutnost mutirane mtDNA u različitim postocima u različitim tkivima. Varijabilna heteroplazija, kod pojedinaca zahvaćenih MELAS sindromom, posljedica je razlika u segregaciji u jajnoj stanici. Mutacije u mitohondrijskom genu za *tRNA*<sup>Leu (UUR)</sup>, kod MELAS sindroma, uzrokuju defekt u procesu aminoaciliranja i u pratej inicijaciji translacije (<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>).

Neki od mutiranih gena u MELAS sindromu (*MT-ND1*, *MT-ND5*) kodiraju za NADH dehidrogenazu, veliki enzimski kompleks koji služi pretvorbi kisika i jednostavnih šećera u energiju u mitohondrijima, a naziva se još i kompleks I ([http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS\\_syndrome](http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS_syndrome)).

Uzroci napadaja koje bolesnici s ovim sindromom doživljavaju nisu još potpuno razjašnjeni, no smatra se da je za njih odgovorna kratkotrajna disfunkcija u oksidativnoj fosforilaciji u parenhimu mozga (<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>).

Mutacije u ostalim genima (*MT-TH*, *MT-TL1* i *MT-TV*) povezanih s ovim poremećajem utječu na funkciju mitohondrijske tRNA odnosno njenu sintezu. Te mutacije stoga remete sveukupnu sintezu mitohondrijskih proteina. Znanstvenici još nisu otkrili kako promjene u mtDNA dovode do simptoma MELAS-a, ali provode se intenzivna istraživanja mutacija u mitohondrijskim genima, osobito na tkivu mozga ([http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS\\_syndrome](http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS_syndrome)).

Mjerenjem aktivnosti respiratornih enzima kod osoba koje pate od ovog sindroma, ustanovljeno je da više od polovica pacijenata ima defekt u kompleksu I ili kompleksu I + IV. Pronađena je i poveznica između MELAS sindroma i deficijencije u kompleksu I. Naime, primjećena je smanjena aktivnost respiratornog lanca, a uzrok tome je smanjena sinteza proteina i smanjena translacija UUG-bogatih gena koji kodiraju za ND6 podjedinicu kompleksa I (<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>).



**Slika 9.** Elektronsko mikroskopska slika mišine stanice mitohondrija kod oboljelog od MELAS sindroma, ali bez detektirane mutacije. Vide se abnormalne nakupine mitohondrija sa inkluzijama (velika strelica) i mitohondrijskim vakuolama (mala strelica) ([http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS\\_syndrome](http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS_syndrome)).

## 6. Detekcija to kastih mutacija

Brojna istraživanja provedena proteklih desetljeća s ciljem otkrivanja uzroka brojnim ljudskim nasljednim bolestima rezultirala su otkrićem to kastih mutacija kao glavnih uzroka nika mnogih bolesti. Danas se velika važnost pridaje otkrivanju metoda kojima bi se što jednostavnije detektiralo ovakve promjene u DNA strukturi. Izme u ostalog razvijaju se i brojne metode detekcije to kastih mutacija i DNA polimorfizama pomoću PCR reakcije. PCR reakcija je brza metoda za detekciju promjena u parovima baza DNA, a temelji se na tome da se specifične regije genomske DNA mogu označiti i simultano amplificirati upotrebom označenih supstrata u PCR reakciji, kao i da jednolanane (j) DNA molekule pokazuju različitu elektroforetsku mobilnost u nedenaturirajućem poliakrilamidnom gelu. Do razlika u elektroforetskoj mobilnosti j) DNA dolazi zahvaljujući ne samo razlici u veličini izme u tih molekula već i zbog razlika u sastavu njihovih baza. Istraživanja su pokazala da se ovom metodom mogu zamjetiti razlike u mobilnosti DNA zahvaljujući i promjeni u jednom paru baza na fragmentima DNA veličine do 200 pb (Orita i sur. 1989.).

Metoda DNA hibridizacije omogućuje, primjerice sintezom sintetskih oligonukleotida (19 pb) komplementarnih normalnim i mutiranim genskim slijedovima za primjerice  $\beta$ -globinski lanac hemoglobina, pretraživanje slijedova baza u DNA i detektiranje mutacija u ovim genima. Probe za mutiranu i normalnu DNA je moguće razlikovati specifičnim metodama hibridizacije. Heterozigoti za ovu bolest sa jednim mutiranim i jednim normalnim alelom vezati će tako primjerice obje probe, dok homozigoti bilo za mutantni fenotip bilo za normalnu DNA, vežu samo jednu vrstu oligonukleotida. Ovakve metode alelno specifične hibridizacije oligonukleotida pogodne su za detekciju bilo koje to kaste mutacije koja izaziva neku genetičku bolest, a javlja se na genu koji postoji u samo jednoj kopiji unutar organizma (Conner i sur., 1983.).

## 7. Zaključak

To kaste mutacije nastaju supstitucijom jedne baze ili jednog baznog para u molekuli DNA i često uzrokuju promjene u genskoj strukturi koje bitno utječu na proteinsku funkciju. Ovakve mutacije mogu nastajati spontano tijekom replikacije molekule DNA ili biti inducirane različitim kemijskim agensima ili okolišnim uvjetima. Mutacije ne moraju nužno biti štetne po organizam, primjerice, one su jedno od glavnih oruđa evolucije i bez njih, raznolikost života kakav danas postoji, vjerojatno ne bi bila posve moguća. Tako je vidljivo i na primjeru bolesti srpaste anemije da mutacije ne moraju nužno imati negativan utjecaj jer heterozigoti koji nose jedan mutirani i jedan normalni alel za  $\beta$ -globinski lanac hemoglobina, imaju bolju šansu za preživljavanjem malarije.

No, mutacije su nažalost često i uzrok teških oboljenja kod ljudi. Za brojne nasljedne bolesti još nije utvrđeno kako nastaju i tome se treba posvetiti još mnogo istraživanja kako bi se što ranije dijagnosticirale i uspješnije liječile. U slučaju MELAS sindroma, primjerice, detektirano je nekoliko to kasti mutacija mtDNA povezanih s njegovim nastankom, ali zbog same prirode mutacija koje nastaju u mtDNA kao i zbog neovisne diobe mitohondrija te neovisnog nasumičnog nasljeđivanja istih u stanicama tkiva, teško je odrediti u kojem tkivu i pod kojim uvjetima će doći do nastanka bolesti. Stoga je preporučljivo detaljnije istraživanje mtDNA odnosno razvijanje dodatnih metoda kojima bi se mutacije u mtDNA mogle što

preciznije detektirati. Primjerice, metode u kojima se primjenjuju sintetski oligonukleotidi koji su komplementarni DNA kalupima i mogu pronaći i to kaste mutacije zahvaljujući i specifičnim metodama hibridizacije pokazuju dobre rezultate u detekciji to kasti mutacija na molekuli hemoglobina.

Budući da su zbog grane mtDNA svi proteini koji u mitohondrijima nastaju, puno podložniji riziku da pretrpe mutaciju od proteina kodiranih jezgrićnim genomom, gdje je ipak manja vjerojatnost da se svaka nastala mutacija zahvatiti dio kodirajuće DNA, smatram da bi se više istraživanja trebalo posvetiti otkrivanju lijekova kojima bi se mogao nadomjestiti rad eventualno defektnih proteina koji su kodirani mitohondrijskim genomom. Najvažniji proces koji se u mitohondrijima odvija je svakako oksidativna fosforilacija kojom stanice dobivaju prijeko potrebnu energiju za svoj rad. Ukoliko zbog mutacija neki od proteina koji grade proteinske komplekse koji sudjeluju u ovome procesu nije funkcionalan, cijela stanica trpi. Zbog toga smatram kako bi trebalo raditi na razvijanju metoda genske terapije i mogućnostima koje, u ovakvim slučajevima, ona može pružiti. Mitohondriji predstavljaju problem za ovakav tip terapije jer dvostruka membrana kojom su obavijeni otežava unos proteina i genetičkog materijala u sam organel, no postoje i načini kojima se može smanjiti replikacija ili transkripcija mutirane mtDNA. U svakom slučaju, daljnje otkrivanje mutacija kao i otkrivanje metoda kojima se one mogu suzbiti ili barem smanjiti njihove posljedice po organizam, predstavlja veliki izazov za istraživače i znanost, samim time što nove mutacije nastaju svakodnevno i genomi nikada ne prestaju evoluirati.

## 7. Literatura

- Alberts B., Bray D., Lewis J., Raff M., Roberts K., Watson J.D. 1994. *Molecular Biology of the Cell*, 4th ed., Garland Science, New York, pp. 235-255.
- Bigger B., Collombet J.-M., Coutelle C., 1999. Tipping the scales in favour of mitochondrial gene therapy. *Gene Therapy* **12**, 1909-1910.
- Conner B.J., Reyes A.A., Morin C., Itakura K., Teplitz R.L., Wallace R.B., 1983. Detection of sickle cell BS-globin allele by hybridization with synthetic oligonucleotides, *Proc. NatL Acad. Sci. USA*, **80**, 278-282.
- Franck P.F., Bevers E.M., Lubin B.H., Comfurius P., Chiu D.T., Op den Kamp J.A., Zwaal R.F., van Deenen L.L., Roelofsen B., 1985. Uncoupling of the membrane skeleton from the lipid bilayer: the cause of accelerated phospholipid flip-flop leading to an enhanced procoagulant activity of sickled cells. *J Clin Invest* **75**, 183–190.
- Johns D.R., 1995. Mitochondrial DNA and disease, review article. *The New England journal of medicine; Seminars in medicine of The Beth Israel Hospital, Boston* **10**, 638-644.
- Martin-Kleiner I., Gabrilovac J., Bradvica M., Vidovi T., Cerovski B., Fumi K., Borani M., 2006. Leber's Hereditary Optic Neuroretinopathy (LHON) Associated with Mitochondrial DNA Point Mutation G11778A in Two Croatian Families. *Coll. Antropol.* **30**, 171–174.
- Orita M., Suzuki Y., Sekiya T., Hayashi K., 1989. Rapid and sensitive detection of point mutations and DNA polymorphisms using the polymerase chain reaction. *Genomics* **5**, 874-879.



Platt O. S., Brambilla D.J., Rosse W.F., Milner P.F., Castro O., Steinberg M.H., Klug P. P., 1994. Mortality In Sickle Cell Disease - Life Expectancy and Risk Factors for Early Death. *The New England Journal of Medicine* **23**, 1639-1644.

Snyder L., Champness W., 2007. Molecular genetics of bacteria 3rd ed., ASM Press, Washington D.C., pp.140-163.

Stearns S.C., Hoekstra R.F., 2005. Evolution: an introduction, 2nd ed., Oxford University Press, pp. 325-329.

<http://emedicine.medscape.com/article/946864-overview>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Endosymbiotic\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Endosymbiotic_theory)

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MitochondrionCAM.jpg>

[http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS\\_syndrome](http://en.wikipedia.org/wiki/MELAS_syndrome)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Mitochondrion#Structure> <http://en.wikipedia.org/wiki/Mutations>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Point\\_mutation](http://en.wikipedia.org/wiki/Point_mutation)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell\\_disease#Genetics](http://en.wikipedia.org/wiki/Sickle-cell_disease#Genetics)

<http://www.bio.miami.edu/dana/pix/deamination.jpg>

<http://www.dodaj.rs/f/2H/jE/2oJI0WBo/05-mutabilnost-i-reparac.pdf>

<http://www.kidneyatlas.org/book4/adk4-04.pdf>

<http://www.plivamed.net/?section=home&cat=t&id=24647&show=1>

[http://www.plivazdravlje.hr/medicinskileksikon/5576/Hemipareza?plivahealth\[term\]=5576](http://www.plivazdravlje.hr/medicinskileksikon/5576/Hemipareza?plivahealth[term]=5576)

<http://www.studentsguide.in/microbiology/microbial-genetics-mutations-genetic-recombination-in-bacteria/spontaneous-mutations.html>

## 9. Sažetak

Mutacije su nasljedne i trajne promjene u strukturi DNA molekule. Mutacije nastaju spontanim greškama tijekom replikacije DNA ili mogu biti inducirane nekim mutagenim agensima. To kaste mutacije su mutacije koje nastaju supstitucijom jedne baze ili jednog baznog para drugim baznim parom i uzrok su brojnim bolestima. Prva bolest za koju je otkriveno da ju uzrokuje jedna to kasta mutacija je bila anemija srpastih stanica. Ova bolest uzrokovana je jednom to kastom mutacijom u  $\beta$  globinskom lancu hemoglobina što za posljedicu ima abnormalne, rigidne eritrocite. To ima ozbiljne i esto smrtonosne posljedice za bolesnika. No pojava ove mutacije u subtropskim i tropskim podru jima dala je evolucijsku prednost osobama koje ju nose. Naime heterozigoti za ovu mutaciju imaju selekcijsku prednost budu i da ne oboljevaju od malarije koja je esta upravo u tim podru jima.

To kaste mutacije koje zahva aju mitohondrijsku DNA naslje uju se samo maj inskom linijom i uglavnom zahva aju kodiraju u DNA budu i da mitohondriji ne sadrže introne kakvi su prisutni u genomu jezgre eukariota. MELAS sindrom i Leberova nasljedna opti ka neuropatija su primjeri bolesti uzrokovanih to kastim mutacijama u mtDNA. MELAS sindrom je teška i smrtonosna bolest uzrokovana defektnim proteinima koji grade kompleks I u mitohondriju i posebice poga a tkiva poput mozga i miši a koja najviše ovise o stani nom ATP-u nastalom procesom oksidativne fosforilacije u mitohondrijima. Leberova nasljedna opti ka neuropatija za posljedicu ima potpuni gubitak vida kod vrlo mladih osoba.

Veliki izazov za istraživa e danas predstavlja otkrivanje novih metoda za detekciju to kastih mutacija, kao i razli itih metoda njihovog lije enja odnosno smanjivanja negativnog u inka po stanicu i organizam primjerice pomo u genske terapije.

## 9. Summary

Mutations are hereditary and permanent changes in DNA structure. Mutations can occur spontaneously during DNA replication or they can be induced by mutagenic agents. Point mutations are a type of mutation that causes the replacement of a single base nucleotide with another nucleotide in DNA and they are responsible for many diseases. Sickle cell anemia was the first disease known to be caused by one point mutation. The cause of this disease is one point mutation in  $\beta$  globin chain of hemoglobin which leads to formation of abnormal erythrocytes and that often includes severe and lethal consequences for the patient. Occurrence of this mutation in tropic and subtropic areas, where malaria is also very common, made persons who were heterozygous for sickle cell anemia better adapted because this way they had much greater chance of surviving malaria.

Point mutations that occur in mitochondrial DNA (mtDNA) are inherited only by mother line and since mitochondrion does not have introns similar to those in nuclear genome of eucaryotes, these mutations usually affect coding region of mtDNA. Examples of such diseases are MELAS syndrome and Leber's hereditary optic neuropathy. MELAS syndrome is a severe and lethal disease caused by defect in proteins that build complex I in mitochondrion. It specially affects brain and muscle tissue which mostly depend on cell's ATP produced during the process of oxidative phosphorylation in mitochondrion. Leber's hereditary optic neuropathy causes complete loss of vision and it affects very young persons.

Today researchers aim to find new methods for point mutations detection. They are also trying to discover various other methods of point mutations threatment like gene therapy. These methods help reduce negative effects of mutations on cells and organisms.