

Mutanti cvjetače: genetička regulacija boje i fraktalne strukture cvata

Miculinić, Leticia

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:217:787910>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-29**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Leticia Miculinić

**Mutanti cvjetače: genetička regulacija boje
i fraktalne strukture cvata**

Završni rad

Zagreb, 2024.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Leticia Miculinić

**Cauliflower mutants: genetic regulation of
curd color and fractal structure**

Bachelor thesis

Zagreb, 2024.

Ovaj završni rad je izrađen u sklopu studijskog programa Znanosti o okolišu na Molekularnom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Nenada Malenice.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Biološki odsjek

Završni rad

Mutanti cvjetače: genetička regulacija boje i fraktalne strukture cvata

Leticia Miculinić

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Sažetak:

Cvjetača ili karfiol (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) pripada porodici kupusnjača ili krstašica (Brassicaceae). Porodica kupusnjača vrlo je važna u ljudskoj prehrani. Posebno se ističe dvogodišnja vrsta *Brassica oleracea* od koje je čovjek umjetnom selekcijom stvorio kultivare poput kelja, raštike, kelja pupčara, korabe, brokule i cvjetače. Tako raznovrsni kultivari dobiveni su ciljanom selekcijom pojedinih biljnih organa, u slučaju cvjetače, selekcijom njezinog hipertrofiranog cvata. Selekcija je nastavljena unutar samog kultivara cvjetače pa su tako nastali i njezini brojni subkultivari. Prirodno mutirane jedinice iskorištene su kako bi se dobili novi subkultivari različitih boja i oblika cvata. Obzirom na potrošačke navike, vizualne promjene postignute na biljkama morale su biti atraktivne, pa su pomno birani kultivari lijepih ili intenzivnih boja ili zanimljiva izgleda. Osim toga iskorištene su i druge pozitivne genetske promjene poput promjena u veličini, otpornosti ili povećanog sadržaja spojeva bitnih u ljudskoj prehrani. Genetička istraživanja omogućila su ciljanu hibridizaciju novih kultivara ili stjecanje novih znanstvenih spoznaja poput mehanizma nastanka prirodnih fraktala na cvatu nekih subkultivara cvjetače kao npr. *Romanesco*.

Ključne riječi: *Brassica oleracea* var. *botrytis*, mutacije, antocijani, Romanesco

(21 stranica, 7 slika, 3 tablice, 21 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nenad Malenica

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Biology

Bachelor thesis

Cauliflower mutants: genetic regulation of curd color and fractal structure

Leticia Miculinić

Rooseveltovo trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Summary:

Cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) belongs to the cabbage or cruciferous family (Brassicaceae). The cabbage family is highly significant in human nutrition. Among its notable members is the species *Brassica oleracea*, from which humans have selectively bred cultivars such as kale, collard greens, cabbage, kohlrabi, broccoli, and cauliflower. These diverse cultivars were developed through the selection of specific plant organs. In the case of cauliflower, selection focused on its hypertrophied flower head. Further selection occurred within the cauliflower variety itself, resulting in numerous subvarieties. Naturally occurring mutants were also utilized to create new subvarieties with different colors and head shapes. Visual changes in the plants had to be attractive, so carefully chosen cultivars with beautiful or intense colors, or interesting appearances, were preferred. Additionally, other positive genetic changes such as alterations in size, resistance, or increased content of compounds essential in human nutrition were exploited. Genetic research enabled the targeted hybridization of new cultivars and the acquisition of scientific knowledge, including the mechanisms behind the formation of natural fractals on the heads of some cauliflower subvarieties.

Keywords: *Brassica oleracea* var. *botrytis*, mutations, anthocyanin, Romansesco

(21 pages, 7 figures, 3 tables, 21 references, original in: Croatian language)

Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nenad Malenica

Sadržaj

1. UVOD	1
2. CVJETAČA.....	4
2.1. Osnovne karakteristike kultivara	4
3. GENETIKA BOJE CVATA CVJETAČE.....	6
3.1. Bijela boja	6
3.2. Zelena boja	6
3.3. Narančasta boja.....	10
3.4. Ljubičasta boja.....	11
4. FRAKTALI CVATA CVJETAČE	14
5. ZAKLJUČAK.....	19
6. LITERATURA.....	20

1. UVOD

Jedna od izgledom najzanimljivijih porodica biljaka koje se koriste u ljudskoj prehrani jesu kupusnjače (lat. Brassicaceae), poznate i kao krstašice. Najvažniji predstavnik porodice jest kupus po kojemu je i dodijeljeno ime porodice. Broje više od 3200 vrsta koje su podijeljene u oko 350 rodova. Vrlo je ekonomski značajna obzirom da se mnoge vrste koriste u ljudskoj prehrani, ali i u prehrani domaćih životinja. Uzgajaju se tisućama godina, što je uveliko pridonijelo njihovoj kozmopolitskoj rasprostranjenosti.

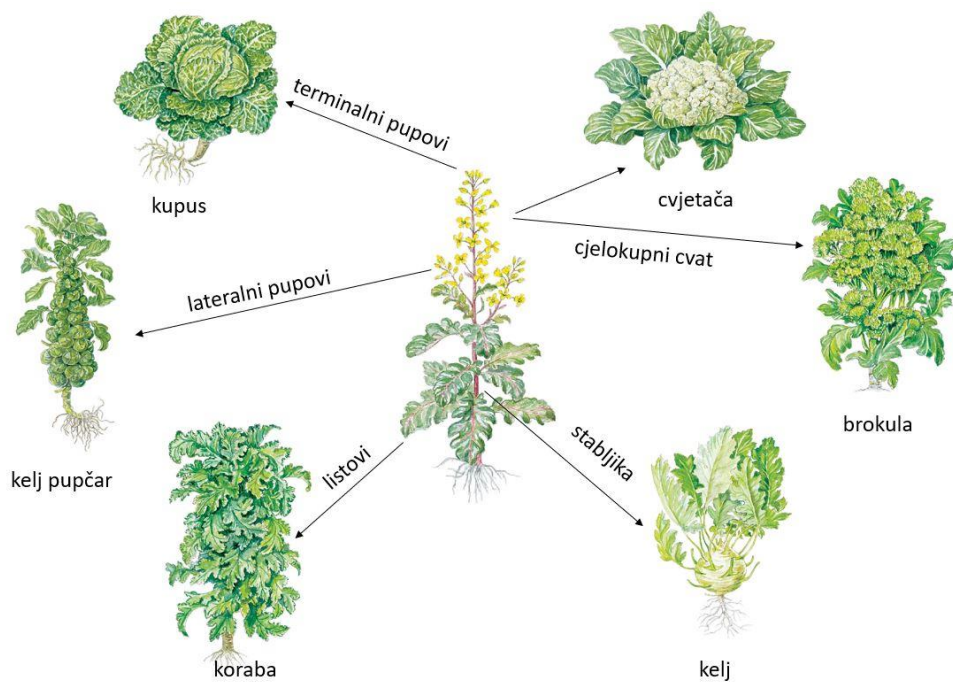
Vrsta *Brassica oleracea* evoluirala je prije oko 3,5 milijuna godina (Sun i sur. 2019). Domestikacija vrste prema arheološkim i pisanim povijesnim dokumentima smještena je u kasni holocen, i to prije najmanje 2000 godina. Istraživanjem je ustanovljeno da je endemska vrsta *B. cretica* najbliži divlji srodnik vrste *B. oleracea*, a kultivacija je započela na području istočnog Mediterana (Mabry i sur. 2021).

Tablica 1. Neke od najvažnijih povrtnih kultura iz porodice Brassicaceae koje se koriste u čovjekovoj prehrani (preuzeto i prilagođeno iz Šamec i Salopek Sondi 2019)

Vrsta	Kultivar (grupa)	Hrvatsko ime
<i>Brassica oleracea</i>	var. <i>capitata</i>	kupus
	var. <i>acephala</i>	kelj
	var. <i>viridis</i>	raštica
	var. <i>gemmifera</i>	kelj pupčar
	var. <i>gongylodes</i>	koraba
	var. <i>botrytis</i>	cvjetača
	var. <i>italica</i>	brokula

Najvažniji rod unutar porodice jesu vrzine (*Brassica*) unutar kojeg se nalaze vrste koje imaju najveću agronomsku važnost, poput uljane repice i gorušice iz kojih se proizvode ulja te povrtnje kulture od kojih su najčešće uzgajani kultivari *Brassice* (Šamec i Salopek Sondi 2019).

Umjetnom selekcijom iz divlje vrste *Brassica oleracea* dobiveni su brojni kultivari koje danas čovjek koristi u prehrani. Svi dijelovi tijela biljke tijekom umjetne selekcije su povećani odnosno selektirani u željenom smjeru kako bi se dobio najveći potencijal iz pojedine biljke. Tako je npr. kultivacijom biljke sa zadebljalom stabljikom došlo do nastanka kultivara korabe. Kultiviranjem biljaka s jače razvijenim lateralnim pupovima dobiven je kelj pupčar, a kelj je dobiven kultiviranjem biljaka s jače razvijenim i mesnatijim listovima. U selekciji kupusa temelj su apikalni (vršni, terminalni) pupovi, dok je tijekom selekcije cvjetače i brokule selektiran povećani nerazvijeni cvat koji se koristi u prehrani.

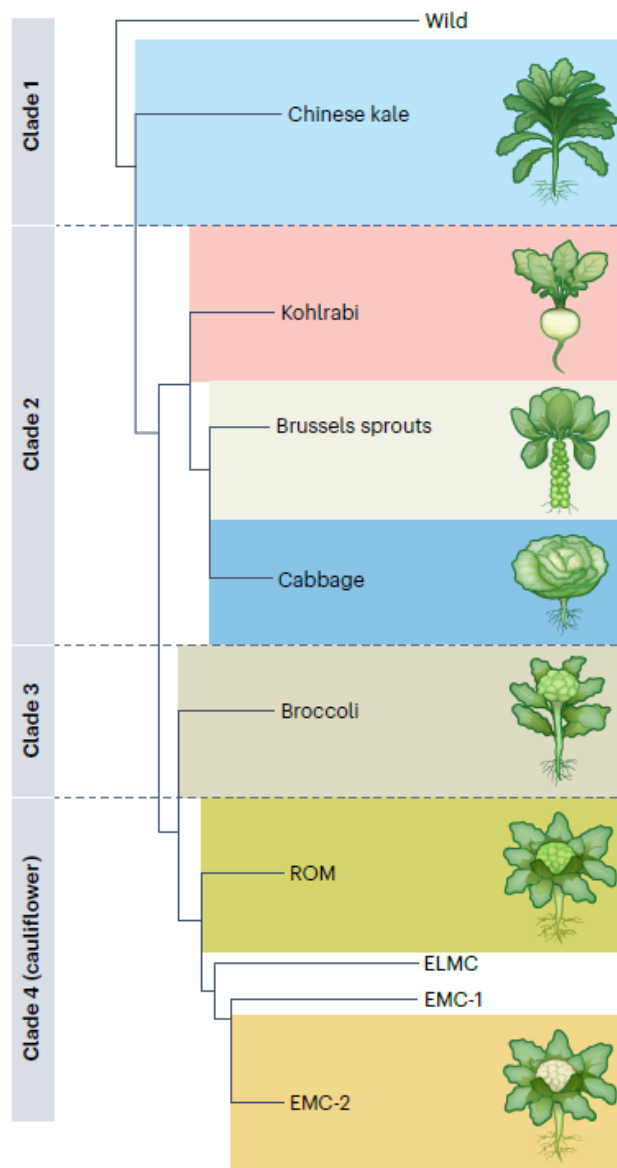


Slika 1. Kultivari dobiveni umjetnom selekcijom iz divlje vrste *Brassica oleracea*.

Genom cvjetače je sekvenciran i jedan je od najvećih u skupini kultivara *B. oleracea*, oko 580 Mb, s 47.772 predviđenih gena. Iako je najveći, odnosno ima najviše parova baza, broj gena približno je isti u odnosu na druge sekvencirane kultivare, što upućuje na činjenicu da se u genomu cvjetače nalazi dosta ponavljajućih i nekodirajućih sekvenci, koje su i otvorile prostor za evoluciju cvjetače i nastanak njezina specifičnog fenotipa. Kako je riječ o najmlađem kultivaru, samo je 2116 genskih porodica specifično za cvjetaču, dok su druge zajedničke s ostalim članovima vrste *B. oleracea* (Sun i sur. 2019).

Kako bi ustanovili evolucijsku povezanost podvrsta *Brassica oleracea* Chen i sur. (2024) kladističkom su analizom 971 uzoraka vrste ustanovili grupiranje u četiri klastera. Klaster 1

sastoji se samo od kineske brokule i najbliži je filogenetskim korijenima. Klaster 2 čine lisnati kultivari i kelj pupčar. Klaster 3 čine brokule koje su izvorišne za klaster 4 koji čine cvjetače.



Slika 2. Različiti oblici cvata. Klasteri i grupe divlje *Brassica oleracea* i glavnih podvrsta. EMC 1 i 2 – ranosazrijevući kultivari; ELMC – ekstremno kasnosazrijevući kultivar; ROM – Romanesco. Preuzeto iz Chen i sur. (2024).

2. CVJETAČA

2.1. Osnovne karakteristike

Cvjetača (*Brassica oleracea* var. *botrytis*), poznata i pod nazivom karfiol, dvogodišnja je biljka zeljaste građe koja je proširena diljem svijeta, a potječe s Mediterana i Bliskog istoka. U Europi je kultivirana od 15. stoljeća. Budući da je bogata vitaminima, mineralima i vlaknima te je niskokalorična namirnica, danas se uzgaja u cijelom svijetu, no uzgoj je ograničen na hladnija područja jer se cvjetni pup teže formira na temperaturama iznad 25 °C. Ipak, razvijeni su kultivari, posebno u Indiji i Japanu, koji su pogodni za uzgoj u toplim klimama i za kratkog dana, pa se danas dvije trećine ukupnoga svjetskog uzgoja odvija na Dalekom istoku (Grout 1988). U Europi najveći su uzgajivači u Francuskoj, Italiji i Španjolskoj. Godišnje se proizvede oko 15 milijuna tona cvjetače. U Hrvatskoj prema zastupljenosti uzgoja na prvom je mjestu kupus, a odmah slijedi cvjetača. U kontinentalnom dijelu uzgaja se cvjetača za jesensku potrošnju, a u primorskom dijelu za kasnojesensku i proljetnu potrošnju (Matotan 2006).

Korijen cvjetače je vretenast i dobro razgranjen. Stabljika u prvoj godini u visinu naraste do 50 cm, a na njezinu se vrhu razvija mesnato zadebljao metamorfoziran cvat s reduciranim cvjetnim stapkama bijeložućkaste ili maslinaste boje. Cvat je najčešće okruglasta ili blago spljoštena oblika, zbijen i fine površinske zrnatosti. Listovi su izmjenično raspoređeni na stabljici – na dnu stabljike listovi su veći i sivozelene boje, dok su uz cvat manji i žućkasto zelenkasti. Cvat suvremenih sorata prekrivaju listovi kako ne bi poprimili žutu ili zelenu boju uslijed sunčeva svjetla. Stabljika u drugoj godini naraste od 60 do 75 cm. Vrh joj je razgranjen i s više cvjetova u produženim grozdastim cvatovima, sumporastožute boje, karakterističnom građom za kupusnjače. Plod cvjetače (u drugoj godini) je komuška u obliku cilindra od 8 do 12 centimetara, sadržava oko 15 sjemenki okruglasta oblika promjera 2-3 mm crvenkaste ili plavičaste boje. Cvjetača je osjetljivija od kupusa na visoke i/ili niske temperature te na nedostatak pojedinih makro- i mikrohranjiva, pa se mogu pojaviti različite deformacije na cvatovima, ili se cvatovi slabo formiraju ili se uopće ne formiraju. Najpovoljnije temperature za rast i razvoj cvjetače iznose od 18 do 20 °C. Naime, cvjetača prestaje s rastom na temperaturi nižoj od 5 °C i višoj od 27 °C. Niske temperature mogu oštetiti vegetativni pup u ranim stupnjevima razvoja pa se cvat ne formira ili se umjesto jednog cvata formira više malih cvatova koji imaju nisku tržišnu vrijednost. Osim temperature, formiranje više malih cvatova može uzorkovati pojava štetnika ili mehaničkih ozljeda biljke (Matotan 2008).

2.2. Hibridi

Hibridi cvjetače su u današnje doba najviše uzgajaju iako postoje i mutnati cvjetače koji mogu biti različitih boja i oblika cvata kao i hibridi. Brojni hibridi dijele se na skupine vrlo ranih i ranih hibrida, srednje ranih hibrida te srednje kasnih i kasnih hibrida. Razlog postojanja tolikog broja hibrida jest ekonomski. Naime, jednu od glavnih prednosti hibrida u odnosu na sorte čini veća ujednačenost dospijevanja na berbu, pa tako postoje jednokratne berbe ili berbe u manje navrata. Osim toga, cvatovi hibrida ujednačeniji su nego cvatovi sorata, a razlikuju se i po razdoblju trajanja vegetacije te po sposobnosti samoprikrivanja cvata. Na cijeni su hibridi koji imaju zbijen cvat fine površinske teksture snježnobijele boje. Za svježiju potrošnju traženiji su hibridi čiji je cvat srednje veličine, težine oko 1 kg, a za preradu preferiraju se hibridi krupnih cvatova čije se grane lako razdvajaju.

Budući da cvjetača spada u rod kupusnjača (*Brassica*) koji je stranooplodan (različite roditeljske jedinke) te u velikoj mjeri i samooplodan (isti muški i ženski roditelj), razina hibridizacije je značajna. Poljoprivreda je prepoznala vrijednost hibrida, te se njihov razvoj dodatno i potiče. Hibridi cvjetače mogu se uzgajati po potrebi, tako imamo hibride različitih boja, one s višom koncentracijom pojedinih tvari, npr. antocijana, one koje dozrijevaju u pogodno vrijeme, veće i krupnije sorte, sorte otporne na razne parazite i bolesti i dr. (Nikolić 2013). S obzirom na boju cvata, najčešće uzgajani hibridi imaju bijele cvatove premda postoje hibridi čija je boja cvata maslinasta, žuta, zelena ili ljubičasta (Matotan 2008).

U posljednje vrijeme sve je veći interes za povrćem i voćem crveno-ljubičaste boje. Ta boja uglavnom potječe od biljnog pigmenta antocijana koji svojim svojstvima pozitivno utječe na zdravlje, ponajprije antioksidacijskim djelovanjem odnosno neutraliziranjem štetnog djelovanja slobodnih radikala (Repajić 2019).

Ovi, po boji različiti hibridi cvjetače osim što su privlačni kupcima, predmet su znanstvenih istraživanja vezanih za nasljeđivanje boje, ekspresiju gena, mutacije i dr.

3. GENETIKA BOJE CVATA CVJETAČE

3.1. Bijela boja

Cvjetača bijele boje cvata uobičajena je, najraširenija i najviše se uzgaja. Osim samooplodnih bijelih sorti, razvijeno je i puno različitih hibrida. Cvatovi su uglavnom okruglasta oblika, a razlikuju se po stupnju zbijenosti i zrnatosti te po obliku, nijansi bijele boje i uspravnosti listova. Cjenjeniji su hibridi koji imaju zbijeniji snježnobijeli cvat, fine površinske strukture.

Bijela boja cvata cvjetače uglavnom je rezultat nedostatka izloženosti sunčevoj svjetlosti tijekom rasta. Cvjetača ima listove koji okružuju cvat te ga štite od svjetlosti. Tijekom rasta biljke listovi se povlače prema gore i prekrivaju cvat sprečavajući tako izravnu izloženost cvata sunčevoj svjetlosti. Taj je proces poznat i kao samoprekrivanje. Neke sorte nemaju fenotip samoprekrivanja pa se cvat štiti ručnim povezivanjem vrhova listova ili se cvat prekrije otrgnutim donjim listovima biljke. No da bi se osigurala snježnobijela boja cvata, stvaraju se kultivari s gušćim i većim listovima. Taj postupak prekrivanja cvata sprečava proizvodnju klorofila odgovornog za zelenu boju lišća i drugih dijelova biljaka. Nedostatak klorofila razlog je što cvat cvjetače zadržava bijelu boju. (Matotan 2006).

Veću potražnju za cvjetačom bijelog cvata donekle je moguće objasniti i njezinim nutritivnim vrijednostima. Naime, cvjetača bijelog cvata sadrži kalij, magnezij, kalcij, mangan, željezo, bakar, cink, fluor, karoten, vitamine C, K, B1, B2, B6, stoga se preporučuje u dijetnoj prehrani te za jačanje imuniteta i u prevenciji razvoja bolesti (Badanjak Sabolović i sur. 2021). Cvjetače narančastog cvata, uz ostale nutritivne vrijednosti koje ima i bijela, bogate su i α - i β -karotenom, dok ljubičasto obojane cvjetače imaju visoki udio antocijana.

3.2. Zelena boja

Zelena boja cvata kod cvjetače nije česta. U Italiji koja se smatra centrom uzgoja cvjetače, postoje dva genetski uvjetovana zelena kultivara: Macerata, koja ima glatki cvat, i Romanesco, koji ima zašiljeni cvat. Prednosti cvjetače zelenog cvata naspram cvjetače bijelog cvata jest ta da zelene cvjetače manje podliježu oštećenjima biljke nastale uslijed mraza.

U istraživanju križale su se biljke čistih linija bijele cvjetače Flora Blanca i zelena cvjetača Macerata (D'Albano). Fenotip potomstva kretao se u rasponu od zelene do žute (Crisp i Angell 1985).

Kod selekcije i stvaranja potomaka različitih boja, izuzetno je bitno imati referentne boje jer se inače ne mogu pratiti promjene. Potrebe za jednostavnim i točnim imenovanjem boja biljaka bilo je i ranije, a najviše je trebala vrtlarima (Anonymus 1936). Za potrebe određivanja i imenovanja boja biljaka koristi se Royal Horticultural Society Colour Chart (RHS) u kojem su boje označene kodovima. Slijed brojeva 61, 62, 63, 64, 1, 2, 3, 4 upućuje na postupni prelazak boje od zelene do žute, s tim da je 61 najzelenija, a 4 najžuća. Prefiksi u kodu 6 ili 4 označavaju bljeđe nijanse, a sufiksi /0, /1, /2, /3 pokazuju postupan razvoj bljeđe nijanse. Prefiks 0 naznačuje sivlji ton.

Tablica 2. Križanje bijelog i zelenog roditelja. Boja cvata cvjetače kod roditelja te F1 i F2 generacije. Preuzeto i prilagođeno iz Crisp i Angell (1985).

Parentalna generacija					
Fenotip	RHS kod	Broj biljaka	Fenotip	RHS kod	Broj biljaka
Bijeli roditelj	602/3	1	Zeleni roditelj	61/2	1
	403/3	3		061/0-061/1	4
Potomci F1 generacije dobiveni križanjem parentalne generacije					
Fenotip	RHS kod	Broj biljaka	Fenotip	RHS kod	Broj biljaka
Svjetlozeleni	663/1	1	Žuti	64/3	3
	663/3	1			
Potomci F2 generacije dobiveni križanjem F1 generacije					
Fenotip	RHS kod	Broj biljaka	Fenotip	RHS kod	Broj biljaka
Bijeli	602/3	10	Žuti	64/3	7
	403/3	8		1/3	8
Svjetlozeleni	61/1-62/3	8		403/2	6
	63/2-63/3	5		604/2	1
	663/0	3	Zeleni	61/1	2
663/1-663/3	33	061/1		2	

Bijeli roditelj je *WiWigr1gr1*, a zeleni *wiwigr2gr2* genotipa. Oznaka *Wi/wi* dobila je ime po engleskoj riječi za bijelu boju (white), a oznaka *gr1/gr2* po engleskoj riječi za zelenu boju (green). U prvoj filijalnoj (F1) generaciji dobivene su biljke intermedijarnog fenotipa, to su biljke heterozigoti koji su fenotipska mješavina roditeljska homozigotna tipa. Daljnjim križanjem F1 generacije dobivena su 4 različita fenotipa omjera 9:3:3:1. Rezultati dobiveni istraživanjem ukazuju da je alel za bijelu boju (*Wi*) dominantan nad alelom za žutu boju (*wi*). Gen za bijelu odnosno žutu boju nasljeđuje se neovisno o genu za zelenu boju te su oni međusobno kodominantni. Aleli *gr1* i *gr2* su aleli istog lokusa. Biljke s genotipom *gr2gr2* intenzivnije su zelene boje nego biljke s genotipom *gr1gr2* odnosno *gr1gr1*.



Slika 3. Zelena cvjetača Macerata. Preuzeto s <https://premierseedsdirect.com/product/organic-cauliflower-green-macerata/>

3.3. Narančasta boja

Cvjetača s cvatom narančaste boje prvi je puta zabilježena 1971. godine u Kanadi u mjestu Bradfordu. Jedna biljka narančastog cvata pojavila se u usjevu *Extra Early Snowball* cvjetače bijele boje cvata. Iz te spontano mutirane narančaste biljke napravljeni su klonovi od dijelova cvata, a od njih i sjeme za daljnji uzgoj. Iz dobivenih biljaka nastavljena su genetska, uzgojna i druga istraživanja vezana uz prehrambenu i ekonomsku vrijednost. Ustanovljeno je da su aleli koji su zaslužni za narančastu boju rezultat recentne mutacije jednog gena. Pigmenti koji daju narančastu boju mješavina su ksantofila i karotena. Daljnjim uzgojem klonova dobila su se tri različita tipa cvjetača dobivenih samooplođivanjem heterozigota: uobičajene bijele boje cvata, narančastog cvata poput očinske biljke i biljke vrlo malog cvata intenzivne narančaste boje. Osim što je ustanovljen način uzgoja cvjetače narančaste boje, zaključeno je da ta boja može biti konkurentna na tržištu (Crisp i sur. 1975). Ekonomska isplativost uzgoja narančaste cvjetače jest u “oku ugodnoj” narančastoj boji te nutritivno značajnoj, visokoj razini β -karotena.

Narančasta boja kontrolirana je dominantnim alelom nazvanim *Or*, dok je recesivni alel koji daje bijelu boju, nazvan *or*. Homozigotna biljka (*OrOr*) je intenzivnije narančaste boje nego heterozigotna biljka (*Oror*). Eksperimentalnim uzgojem kultivara s *OrOr* biljkama dobile su se cvjetače narančaste boje cvata zadovoljavajuće veličine i bez drugih mana te s viskom razinom β -karotena (Dickson i sur. 1988).



Slika 4. Cvjetača narančastog cvata, takozvana Cheddar cvjetača. Preuzeto s

<https://efloraofindia.com/2011/04/14/brassica-cretica/>

Tablica 3. Analiza karotena raznih narančastih i bijelih cvjetača (preuzeto i prilagođeno iz Dickson i sur. 1988).

Hibridi	Genotip	α -karoten ($\mu\text{g}/100\text{g}$)	β -karoten ($\mu\text{g}/100\text{g}$)
(Stove Pipe x NY 163)	<i>Or or</i>	5,5	320
(Stove Pipe x NY 163)	<i>Or or</i>	4,5	267
7632 x NY 165	<i>Or or</i>	1,5	61
7632 x NY 163	<i>Or or</i>	2,9	42
(7642 x 78-882)	<i>or or</i>	-	3,0

Stove pipe, 7632, 7642 i 78-882 su bijeli kultivari, dok su NY 163, NY 165 narančaste boje.

Najintenzivnije narančasto obojeni hibridi cvjetače (Stove Pipe x NY 163) imaju najviše razine α -karotena i β -karotena, dok se sa smanjenjem intenziteta boje smanjuje i količina karotena (NY 7632 x NY 165; NY 7632 x NY 163). Bijelo obojeni hibridi cvjetače imaju nisku količinu karotena ili ga nemaju (NY 7642 x 78-882).

3.4. Ljubičasta boja

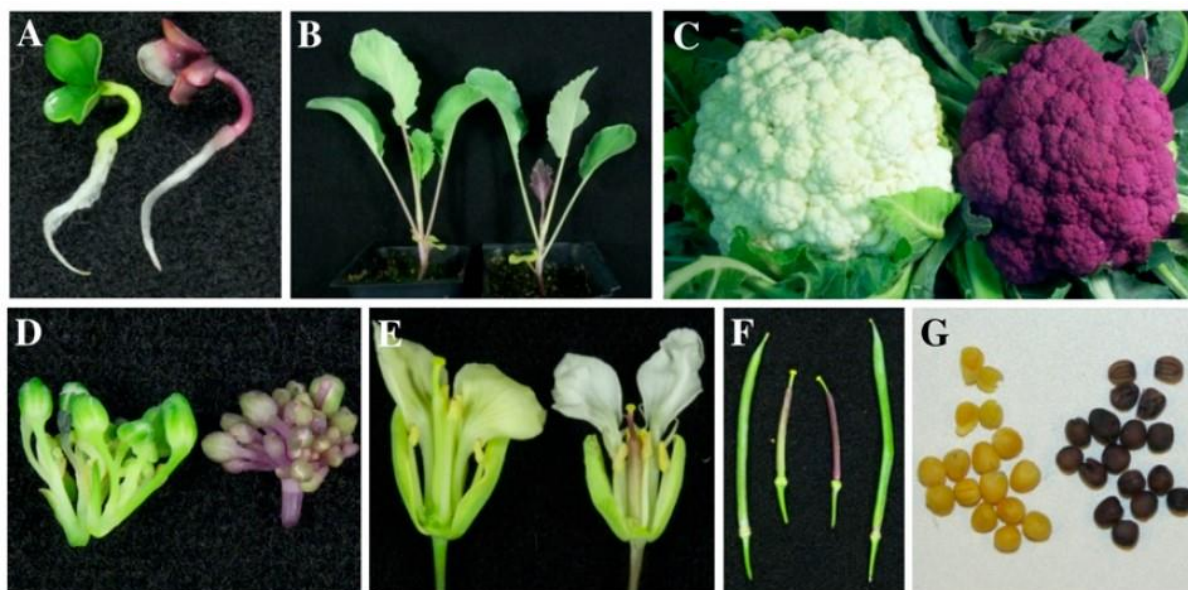
Povrće i voće temeljne su komponente ljudske prehrane jer osim što su izvor vitamina i minerala sadrže i sekundarne metabolite nužne za ljudsko zdravlje. Sekundarni metaboliti koji se sintetiziraju u biljkama, a u koje pripadaju i biljni pigmenti, nemaju izravnog utjecaja na rast i razvoj biljaka, ali imaju različite biološke funkcije kao obrambeni i signalni spojevi u razmnožavanju, patogenezi i simbiozi. Zahvaljujući nutritivnim i zdravstvenim vrijednostima sekundarnih metabolita, obojeno povrće i voće dobiva na sve većoj važnosti u ljudskoj prehrani upravo zbog visokog sadržaja biljnih pigmenata. Jedna od takvih jest ljubičasta cvjetača koja je danas komercijalno dostupna u prodaji i vizualno vrlo privlačna. Ljubičasta boja cvjetače posljedica je nakupljanja antocijana, u vodi topljivih biljnih pigmenata smještenih u vakuoli biljnih stanica. Antocijani se ubrajaju u skupinu flavonoidnih spojeva, a javljaju se u svim tkivima biljaka, uključujući listove, stabljike, korijenje, cvjetove i plodove. Biljnim tkivima daju nijanse boja od crvene, plave, ljubičaste, čak i do crne, ovisno o pH vrijednosti vakuolnoga sadržaja. Pokazuju znatna antioksidativna svojstva te imaju mnogobrojne pozitivne učinke na

ljudsko zdravlje zbog kojih pobuđuju veliko zanimanje prehrambene i farmaceutske industrije (Pevalek-Kozlina 2002, Winkel-Shirley 2001).

Svi geni biosintetskog puta antocijana i brojni regulacijski čimbenici identificirani su iz istraživanja provedenih na modelnim organizmima; *Arabidopsis thaliana*, *Zea mays*, *Petunia hybrida* i drugim biljnim vrstama. Regulacija transkripcije strukturnih gena glavni je mehanizam kojim se regulira biosinteza antocijana u biljkama. R2R3 MYB i osnovni helix-loop-helix (bHLH) transkripcijski faktori te WD40 proteini predstavljaju tri glavne porodice antocijanskih regulatornih proteina koji tvore regulatorne komplekse za aktiviranje ekspresije strukturnih gena antocijana (Chiu i sur. 2010).

Istraživanja mutanata olakšale su otkrivanje gena i rasvjetljavanje regulatorne kontrole biosinteze antocijana, ali samo se mali broj tih istraživanja usredotočio na povrće. Ljubičasti mutant cvjetače predstavlja zanimljivu mutaciju kojom dolazi do značajne proizvodnje antocijana u inače niskopigmentiranom cvatu i sjemenkama što je značajno i za proučavanje regulatorne kontrole biosinteze antocijana u povrtnim kulturama (Chiu i sur. 2010).

Ljubičasta boja cvjetače nastala je mutacijom, tj. insercijom transpozona u regulatornu regiju gena *Pr* odgovornog za ljubičastu boju, koji aktivira transkripcijski faktor R2R3 MYB, čija je uloga sinteza antocijana i njegova akumulacija u tkivima koja normalno akumuliraju antocijan. Njegova mutirana forma Pr-D pojačano aktivira transkripcijski faktor R2R3 MYB koji potom izaziva akumulaciju antocijana u većim količinama i u tkivima u kojima se to uobičajeno ne događa. Akumulacija antocijana u cvjetače izaziva ljubičasto obojenje cvata cvjetače (Chiu i sur. 2010).



Slika 5. Fenotipska usporedba između divljih tipova i mutanta *Pr-D* cvjetače. (A) Sadnice 5 dana starih biljaka. (B) Mlade biljke stare 3 tjedna. (C) Cvat uzgojenih biljaka cvjetače u polju. (D) Mladi cvjetni pupoljci. (E) cvijeće. (F) Mladi (unutarnji) i stari silici (vrsta ploda) divljeg tipa (lijevo) i mutanta (desno). (G) Endospermi sjemenka. Preuzeto iz Chiu i sur. (2010). Istraživanjima Chiu i sur. (2010) utvrđeno je da je ljubičasta mutacija cvjetače kontrolirana jednim, semidominantnim genom. Simbolom *Pr-D* označili su ljubičasti alel, dok je za njegov pandan divljeg tipa korišten simbol *pr*. Kombinacijom analize gena i finog mapiranja, izoliran je gen *Pr-D* koji kodira transkripcijski faktor R2R3 MYB. Preuzeto iz Chiu i sur. (2010).

Mutant ljubičaste cvjetače pokazao je tkivno specifičan obrazac nakupljanja antocijana. Intenzivno ljubičasto obojenje uočeno je u cvatu i nekoliko drugih tkiva biljke (sl. 2. A–D, F i G), uključujući mlade klijanke, vrlo mlade listove i vrlo mlade cvjetne pupove te endosperm sjemenke, tkivo u koje se rijetko nakupljaju pigmenti u mutantima. Ljubičasta boja nije uočena kod starijeg lišća, stabljika i cvjetnih latica (sl. 2. B, E i F). Čini se da je ljubičasti fenotip povezan prvenstveno s vrlo mladim tkivima, cvatom i sjemenkama više nego u cvjetnim laticama, koje su uobičajeno tkivo nakupljanja antocijana. U istim uvjetima rasta, divlji tip (*pr*) biljke cvjetače nije pokazao ljubičastu nijansu u tim tkivima (sl. 2. A–G) (Chiu i sur. 2010).

4. FRAKTALI CVATA CVJETAČE

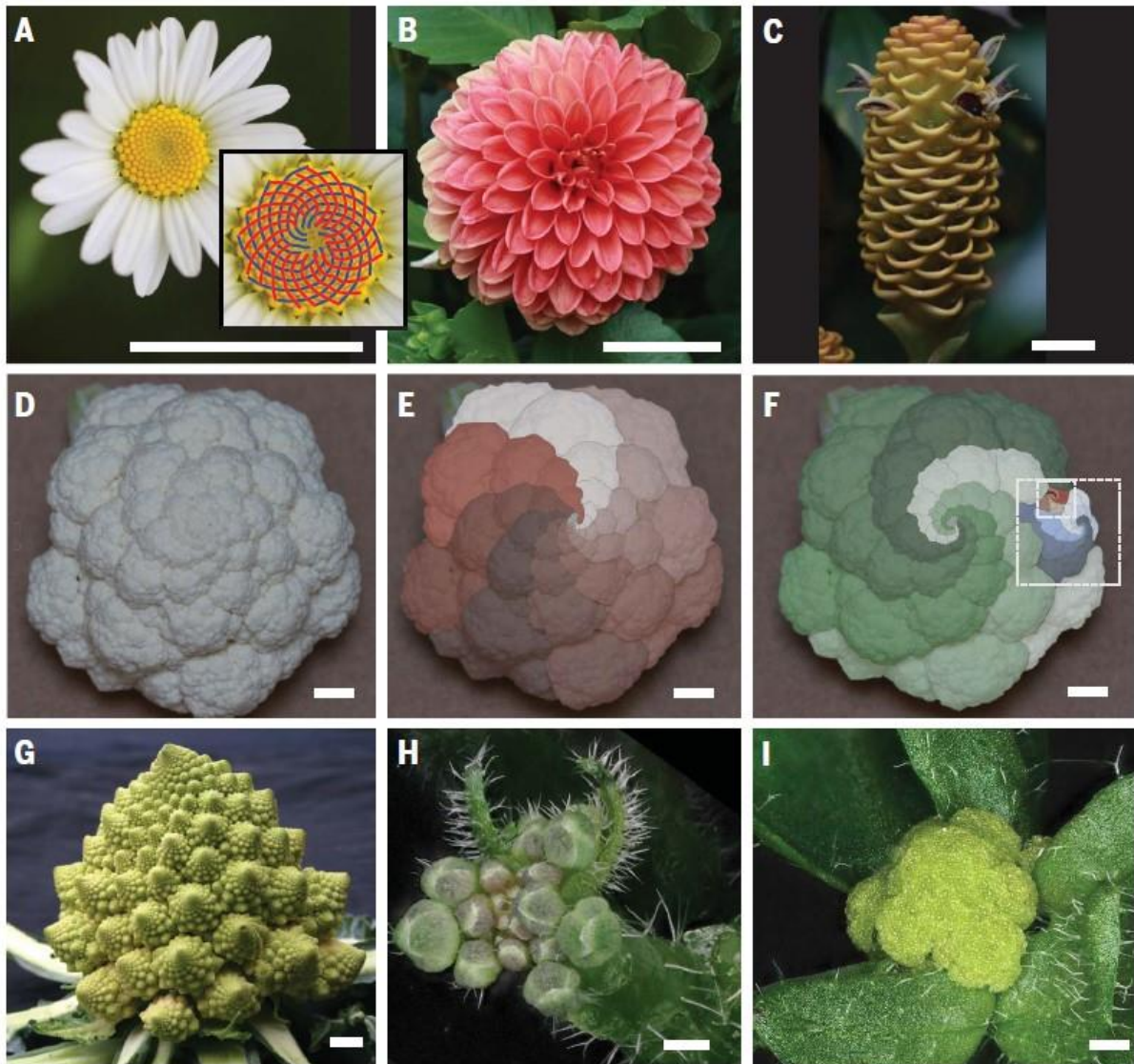
Fraktali su prirodni ili umjetni objekti čija se površina odlikuje samosličnošću svojih dijelova. Kao primjeri prirodnih fraktala navode se “obalna crta, ljudska pluća, glavice brokule ili cvjetače, iskre pri električnom izboju, oblaci...” (Hrvatska enciklopedija 2021).

Kod cvjetače fraktalni oblici nalaze se na cvatu, a nastaju zbog poremećaja u genskoj ekspresiji.

Tijekom razvoja biljni meristem producira biljne organe u definiranoj spirali, obrnutoj spirali ili u kovrčastom uzorku. Kod cvjetača je prisutan neobičan raspored organa s mnoštvom spiralnih uzoraka. Istraživanjem na mutantu *Arabidopsis thaliana* utvrđeno je da cvat u obliku mozga nastaje jer biljka ne uspijeva formirati konačni cvijet, već meristem u konačnici formira pupove složene u mnoštvo spiralnih uzoraka. Dodatne mutacije koje utječu na rast meristema mogu potaknuti nastanak stožastih struktura na svim nivoima kod Romanesco sorte cvjetače (Azpeitia i dr., 2021).

Arhitektura nadzemnog dijela biljke vezana je za aktivnost apikalnog meristema, meristema izdanka (SAMs) – nakupina matičnih stanica iz kojih će kasnije u razvoju nastati organi kao što su lišće, izdanci ili cvjetovi. Koji organi će nastati ovisi o tome koji se geni ekspimiraju.

Filotaksija je raspored organa na stabljici. Biljke sa spiralnom filotaksijom obično formiraju dva tipa spiralnosti organa, a koji su vidljivi na čvrstim strukturama kao što su cvjetne glavice, češeri i kaktusi. Ova dva tipa spiralnosti zavijaju u suprotnim smjerovima. Kod cvjetače spiralnost je vidljiva na više nivoa, a ponavljanje istih uzoraka najvidljivije je kod Romanesco sorte kod koje se spiralnost javlja reljefno zbog ponavljajućih stožastih oblika na svim nivoima, dajući čitavoj strukturi fraktalni izgled (Azpeitia i sur., 2021).

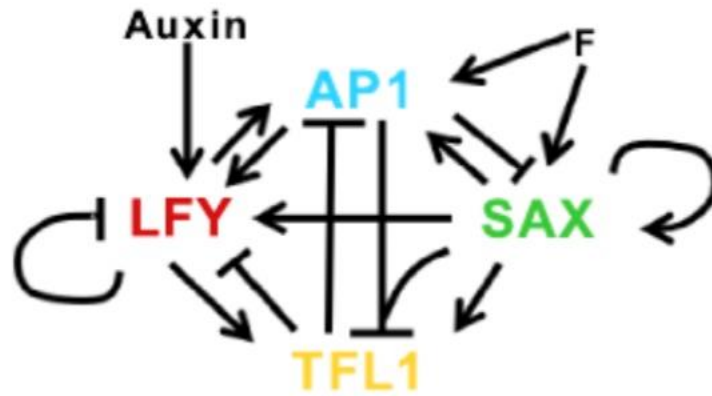


Slika 6. Ilustracije filotaktičkih spirala na cvatovima biljaka. (A) Cvijet tratinčice. Dvije obitelji spirala prikazane u krupnom planu (13 plavih spirala i 21 crvena). (B) Kompozitni cvijet daliije. (C) Đumbirov cvat. (D do F) *B. oleracea* var. *botrytis* cvjetača s osam spirala u smjeru suprotnom od kazaljke na satu [(E); smeđa obitelj] i pet spirala u smjeru kazaljke na satu [(F); zelena obitelj]. Isprekidani pravokutnici prikazuju obitelji spirala različitih mjerila. (G do I) Romanesco cvat (G), *Arabidopsis* cvat divljeg tipa (H) i cvat dvostrukog mutanta *ap1 cal* (I). Skala 2 cm [(A) do (G)]; 500 mm [(H) i (I)]. Preuzeto iz Azpeitia i sur. (2021).

Cvjetača je nastala mutacijom kupusa. Kod cvjetače cvat poprima strukturu koja podsjeća na ljudski mozak, što je uvjetovano mutacijom gena, ali i različitim morfodinamičkim parametrima. Naime, svaki cvjetni pup koji nastaje u spiralnoj formaciji nikad se ne razvije do kraja u cvijet, već ostaje u obliku cvjetnog pupa, a nastaju i novi cvjetni pupovi, što pridonosi tomu da cijela struktura ima oblik mozga. Formiranje mozgolikog cvata poligena je

karakteristika, što znači da više gena utječe na to svojstvo. Na primjer, kod mutanta modelnog organizma *A. thaliana* koji u svom razvoju poprima oblik cvata kao kod cvjetače, to je svojstvo uvjetovano dvostrukom mutacijom u genima APETALA1 (*Ap1*) i CAULIFLOWER (*Cal*). Riječ je o dva gena slične funkcije (paralozi) koji kodiraju za transkripcijske faktore koji reguliraju razvoj cvijeta. Njihovom mutacijom nema nastanka odgovarajućih transkripcijskih faktora i nema nastanka cvijeta (Azpeitia i sur., 2021). Svi geni koji su odgovorni za nastanak cvata objedinjeni su u gensku regulacijsku mrežu (GRN). Ona se sastoji od gena TFL1, AP1/CAL, LFY te od takozvanih SAX gena (SOC1, AGL24 i XAL2). (Azpeitia i sur., 2021, (Azpeitia i sur., 2023).

Transkripcijski faktor LEAFY (LFY) određuje početak cvatnje. Njegovu koncentraciju reguliraju geni SOC1 i AGL24 te povećana koncentracija auksina (inducira inicijaciju floralnog meristema). LFY se specifično eksprimira u primordijima cvjetova i inducira gene AP1 i CAL (prethodno spomenuti dvostruki mutant) i izazivaju represiju SOC1/AGL24 te posljedično i TFL1 (sva tri gena promoviraju razvoj cvijeta). Znači, AP1 i CAL onemogućuju ekspresiju SOC1/AGL24 i TFL1 i time blokiraju razvoj cvijeta. Kod *ap1cal* mutanta vrste *A. thaliana* koji je služio u ovom istraživanju, AP1 i CAL geni su mutirani tako da je njihovo inhibitorno djelovanje na SOC1/AGL24 i TFL1 uklonjeno. Posljedica je zadržavanje meristema u fazi pupa. Osim SOC1 i AGL24 gena, na TFL1 utječe i XAL2 koji ga inducira. Za potrebe istraživanja oni su grupirani u SAX faktore. Kako u mutantu ne dolazi do ekspresije AP1 i CAL gena, oni ne inhibiraju SAX gene te budući da nisu inhibirani, TFL1 se pojačano eksprimira te on inhibira LFY. Kod biljaka s visokom ekspresijom AP1, CAL i LFY te niskom ekspresijom TFL1 i SAX iz meristema dolazi do nastanka cvijeta, dok u slučaju niske ekspresije AP1, CAL i LFY te visoke ekspresije TFL1 i SAX meristem izrasta u izdanak. (Azpeitia i sur., 2021).



Slika 7. Genska regulacijska mreža. Strelice prikazuju pozitivnu regulaciju, strelice s ravnom crtom negativnu regulaciju, a strelice koje se od AP1 i SAX koje se spajaju i idu prema TFL1 predstavljaju formiranje SAX-AP1 kompleksa. Preuzeto iz Azpeitia i sur., 2023.

Cvatovi različitih vrsta unutar porodice kupusnjača različite su fraktalne morfologije. Cvjetače imaju okrugli cvat nalik na kupolu te je svaki cvat sastavljen od manjih cvatova, jednakog kupolastog oblika, s tipičnim spiralnim rasporedom. Kod Romanesco cvjetače vidljiv je isti spiralni raspored, no cvatovi su u obliku stošca. (Azpeitia i sur., 2023).

Arhitektura biljaka ne ovisi samo o sudbini meristema, već i o morfodinamičkim parametrima: molekularni pragovi/nivoi za određivanje sudbine meristema, brzina rasta organa, kašnjenje meristema u proizvodnji organa i stopa proizvodnje organa – neovisno regulirana. Arhitektura biljne cvatnje proizlazi iz kompletne interakcije floralne genske regulatorne mreže (GRN) i morfodinamičkih parametara (Azpeitia i dr., 2021).

Osim genetike bitni su i morfodinamički parametri: plastokron odnosno vrijeme između nastanka dva meristema, broj spirala nastalih iz danog meristema, veličina meristema, vrijeme potrebno da lateralni primordiji počnu proizvoditi vlastite primordije. Povećanjem veličine centralne zone meristema plastokron se smanjuje, što dovodi do povećanja broja spirala i do lateralne produkcije apikalnih meristema i nastanka pupova kod cvjetače. Smanjenjem plastokrona razvija se Romanesco forma, a kad je plastokron konstantan, nastaje obična cvjetača. Povećanjem centralne zone meristema + plastokron + genetika + spiralnost nastaje tipična forma cvjetače s njezinim fraktalnim oblicima (Azpeitia i sur., 2021).

Mutirana genetika koja uvjetuje da ne dođe do cvatnje i vrijeme u rastu meristema, kao i njegova veličina te spiralni rast stabljike s organima na njoj uvjetuju nastanak siraste strukture cvjetače (struktura „mozga“) koja je u ponavljajućim/fraktalnim obrascima (Azpeitia i sur., 2021).

Usporedbom razvoja cvata kod cvjetače i Romanesco cvjetače uočeno je nekoliko različitih značajka razlika koje su konatntne kod cvjetače dok se kod Romanesca neprekidno povećavaju. To su stopa proizvodnje novih lateralnih meristema, broj spirala u smjeru kazaljke na satu i suprotno od kazaljke na satu, broj lateralnih primordija koje proizvodi meristem prije nego što počne proizvoditi svoje vlastite lateralne primordije i veličina meristema. Istraživanjem je utvrđeno da povećanjem stope proizvodnje meristema dolazi do nastanka cvata u obliku stošca dok kod normalne stope proizvodnje nastaju cvatovi kupolastog oblika kao kod cvjetače. To dokazuje da je stopa proizvodnje meristema najznačajniji faktor koji određuje izgled cvata. (Azpeitia i sur., 2023).

5. ZAKLJUČAK

Cvjetača može biti primjer intervencije čovjeka u prirodne procese. Može se reći da je umjetno stvorena i da bez čovjeka vjerojatno nikad ne bi postojala nijedna od njezinih brojnih formi. Ipak, to što je stvorena umjetnom selekcijom znači da je u sebi imala genetskog potencijala za takve brojne fenotipove, samo što oni nisu bili realizirani evolucijom. Sve boje njezina cvata vješto su stvorene manipulacijom prirodno mutiranih jedinki. Mutacije u genima dovele su do pojave brojnih hibrida, bilo vezanih za boju cvata, za oblik lista, veličinu, ali i do otpornosti na različite bolesti. Pigmenti u cvatovima imaju i potencijalne nutritivne vrijednosti, što je također bitno pri stvaranju novih kultivara. Na isti način stvoreni su i fantastični fraktalni oblici njezina cvata. Oni su posljedica toga da meristem ne uspijeva stvoriti cvijet, već ostaje u fazi cvjetnog pupa. Njihovim rastom dobiva se cvat takva izgleda koji u sebi nosi genetički reguliran fraktalni obrazac. Cvjetača sa svojim brojnim hibridima odličan je materijal za istraživanje različitih genskih mutacija, koje su u nekim slučajevima relativno lako vidljive, tako da se mogu istraživati funkcije pojedinih biljnih gena. Ovakav tip istraživanja od esencijalne je važnosti i za poboljšanje poljoprivredne proizvodnje i uroda.

6. LITERATURA

Anonymus (1936): A Horticultural Colour Chart. *Nature*, 138, str. 322–323. <https://doi.org/10.1038/138322d0>

Azpeitia, E., Tichtinsky, G., Le Masson, M., Serrano-Mislata, A., Lucas, J. i sur. (2021): Cauliflower fractal forms arise from perturbations of floral gene networks. *Science*, 373, 6551, str. 192-197.

Azpeitia, E. & Parcy, F. & Godin, C. (2023). Cauliflowers or how the perseverance of a plant to make flowers produces an amazing fractal structure. *Comptes Rendus. Biologies*. 346. 75-83. [10.5802/crbio.120](https://doi.org/10.5802/crbio.120).

Badanjak Sabolović, M., Jurašinić, L., Rimac Brnčić, S. (2021). Jestivo cvijeće: dekoracija i/ili izvor nutraceutika?. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, 16 (3-4), 94-100. <https://doi.org/10.31895/hcptbn.16.3-4.4>

Chen, R., Chen, K., Yao, X. *et al.* Genomic analyses reveal the stepwise domestication and genetic mechanism of curd biogenesis in cauliflower. *Nat Genet* 56, 1235–1244 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41588-024-01744-4>

Chiu, L-W., Zhou, X., Burke, S., Wu, X., L. Prior, R.L., Li, L. (2010): The Purple Cauliflower Arises from Activation of a MYB Transcription Factor. *Plant Physiology*, 154, str. 1470–1480.

Crisp, P., Walkey, D. G. A., Bellman, E., Roberts., E. (1975): A mutation affecting curd colour in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* DC). *Euphytica*, 24, str. 173-176.

Crisp, P., Angell, S. M. (1985): Genetic control of green curd colour in cauliflower. *Annals of applied biology*, 107, str. 601-603.

Dickson, M. H., Lee, C. Y., Blamble, A. E. (1988): Orange-curd High Carotene Cauliflower Inbreds, NY 156, NY 163 and NY 165. *HortScience* 23 (4), 778-779.

Fernie, A.R., Bulut, M. How cauliflower got its curd. *Nat Genet* 56, 1042–1044 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41588-024-01768-w>

Grout, B. W. W. (1988): Cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.). U: Crops II. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. str. 211-225.

- Mabry, M. E., Turner-Hissong, S. D., Gallagher, E. Y., McAlvay, A. C., An, H., Edger, P. P., Moore, J. D., Pink, D. A. C., Teakle, G. R., Stevens, C. J., Barker, G., Labate, J., Fuller, D. Q., Allaby, R. G., Beissinger, T., Decker, J. E., Gore, M. A., & Pires, J. C. (2021). The Evolutionary History of Wild, Domesticated, and Feral *Brassica oleracea* (Brassicaceae). *Molecular biology and evolution*, 38(10), 4419–4434. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab183>
- Matotan, Z. (2006): Tehnologija proizvodnje i sortiment kupusnjača. Glasnik Zaštite Bilja, 29 4, str. 4-34. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/164265>
- Matotan, Z. (2008): Zeljasto povrće. Neron d. o. o., Bjelovar.
- Nikolić, T. (2013): Sistematska botanika - raznolikost i evolucija biljnog svijeta. Alfa d.d., 1-882. Zagreb
- Pevalek-Kozlina, B. (2002): Fiziologija Bilja. 1. Profil, Zagreb
- prirodni fraktal. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 8. 9. 2023. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50448>.
- Raza, A., Hafeez, M. B., Zahra, N., Shaukat, K., Umbreen, S., Tabassum, J. i sur. (2020). “The plant family Brassicaceae: Introduction, biology, and importance,” U: The plant family brassicaceae, Springer, str. 1–43.
- Repajić, M., Markov, K., Frece, J., Vujević, P., Čurić, D. i Levaj, B. (2019): Studija kvalitete plodova više vrsta jagodastog voća tijekom skladištenja. Glasnik Zaštite Bilja, 42, 4, str. 68-81. <https://doi.org/10.31727/gzb.42.4.9>
- Sun, D., Wang, C., Zhang, X., Zhang, W., Jiang, H., Yao, X., Liu, L., Wen, Z., Guobao Niu, G., Shan, X. (2019): Draft genome sequence of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) provides new insights into the C genome in Brassica species. Horticulture Research, 6, 82, str. 1-11.
- Winkel-Shirley, B. (2001): Flavonoid biosynthesis. A colorful model for genetics, biochemistry, cell biology, and biotechnology, Plant Physiology, 126, str. 485-493