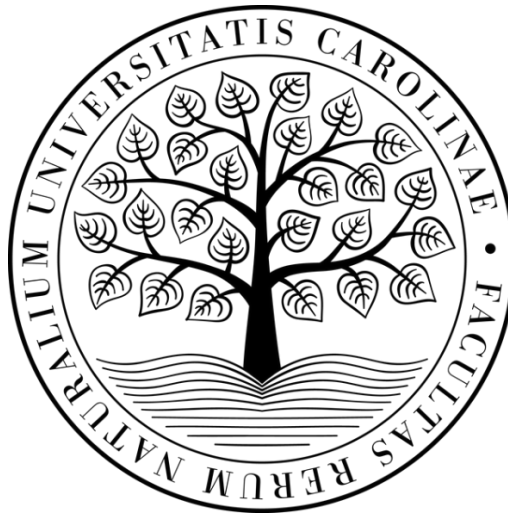


Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Katedra antropologie a genetiky člověka

Štúdijský program: Biologie
Štúdijský odbor: Antropologie a genetika člověka



Bc. Alexandra Šefčíková

Rozšírenie a overenie predikčného modelu faciálneho vývoja človeka

Extension and verification of the prediction model of human facial development

Diplomová práca

Vedúci práce: doc. RNDr. Jana Velemínska, Ph.D.

Konzultant: Mgr. Karolina Kočandrlová

Praha, 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 11.8.2022

Alexandra Šefčíková

Pod'akovanie

Rada by som sa poďakovala najmä mojej vedúcej práce pani doc. RNDr. Jane Velemínskej, Ph.D, za pomoc, ochotu a trpezlivosť pri písaní tejto diplomovej práce i počas celého štúdia. Ďalej by som rada poďakovala Mgr. Karoline Kočandrovej, konzultantke mojej práce, za jej čas, nasmerovanie a pomoc s praktickou časťou, a taktiež pánovi Mgr. Jánovi Dupejovi za pomoc pri zhotovovaní výsledkov a s prácou v programe Morphome3cs. V neposlednom rade by som chcela poďakovať rodine a priateľom za neustálu podporu.

Práca bola podporená grantom GA UK č.304221

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá rozšírením a overením už existujúceho predikčného modelu faciálneho vývoja človeka. V rámci cieľov som sa zamerala aj na porovnanie nového prediktoru s pôvodným a vytvorenie rastových trajektórií pre chlapcov a dievčatá. Na realizáciu boli použité longitudinálne dáta z databázy 3D faciálnych skenov, ktorá patrí Laboratóriu 3D zobrazovacích a analytických metód na Katedre antropológie a genetiky človeka PĚF UK. Vyhodnotených bolo 693 3D faciálnych skenov detí českej populácie vo vekových obdobiach 3–5 rokov, 7–12 rokov a 12–15 rokov, kde sme tieto časové rady obohatili o nových jedincov, celkový počet tvorilo 73 chlapcov a 87 dievčat. Skenovanie tváří prebiehalo jeden až dvakrát ročne za pomoci optických skenerov Vectra a 3dMD systému. Pre následnú analýzu sme využili metódy geometrickej morfometrie (CPD–DCA, PCA..), ktoré nám pomohli zjednotiť vytvorené jednotlivé 3D modely tváří a vypočítať priemernú predikčnú chybu, ktorá je vizualizovaná pomocou farebných máp.

Výsledná priemerná predikčná chyba medzi predikovanou a skutočnou tvárou bola získaná lineárnym modelovaním dát u detí vo veku od 3 do 5 rokov, od 7 do 12 rokov a od 12 do 15 rokov. V najmladšej skupine detí najmenšiu priemernú predikčnú chybu dosiahli chlapci s hodnotou 1,718 mm v 5 rokoch. Vo zvyšných dvoch vekových skupinách sme zaznamenali najmenšiu priemernú predikčnú chybu u dievčat v 12 rokoch s hodnotou 1,726 mm a v 15 rokoch s hodnotou 1,798 mm. V porovnaní s predošlými štúdiami pozorujeme, že rozdiel veľkostí priemernej predikčnej chyby neprekračuje viac ako 0,2 mm. Preto z výsledkov vyplýva, že rozšírený predikčný model je rovnako spoľahlivý ako ten pôvodný. Skonstruované rastové trajektórie ukázali, že v období 3–5 rokov je rastové tempo približné rovnaké pre obe pohlavia, ale vo veľkosti tváre je už prítomný pohlavný dimorfizmus. Najväčšie rozdiely boli zaznamenané v staršej kategórii. U dievčat vrchol rastu nastáva medzi 11. až 12. rokom a u chlapcov medzi 11. a 13. rokom, kde ich rast stále pokračuje.

Kľúčové slová

3D faciálne modely, veková progresia, priemerná predikčná chyba, rastové trajektórie, geometrická morfometria, farebné mapy

Abstract

The thesis deals with the extension and validation of an already existing prediction model of human facial development. Within the main aims I also focused on comparing the new predictor with the original one and creating growth trajectories for boys, and girls. For the implementation longitudinal data from a database of 3D facial scans belonging to the 3D Imaging and Analytical Methods Laboratory in the Department of Human Anthropology and Genetics at Prf UK were used. We evaluated 693 3D facial scans of children of the Czech population in the age ranges 3–5 years, 7–12 years and 12–15 years, where we enriched these time series with new individuals and a total number consisted of 73 boys and 87 girls. Face scanning was performed once or twice a year using Vectra and 3dMd 3D optical scanners. For the follow-up analysis we used geometric morphometry methods (CPD–DCA, PCA...) which helped us to unify the created individual 3D models of faces and to calculate the mean prediction error, which is visualized by coloured maps.

The resulting mean prediction error between predicted and real face was obtained by linear modelling of the data for children aged 3 to 5 years, 7 to 12 years, and 12 to 15 years. In the youngest group of children, the smallest mean prediction error was achieved by boys at the age of 5, which equals 1.718 mm while in the remaining two age groups we observed the smallest mean prediction error in girls at the age of 12 was 1.726 mm and at the age of 15 was 1.798 mm. Compared to the previous studies, the difference we observe does not exceed the difference in the magnitude of the mean prediction error by more than 0.2 mm. Therefore, the results suggest that the extended prediction model is as reliable as the original one. Constructed growth trajectories showed that in the 3–5 years period, the growth rate is approximately the same for both sexes, but there is already sexual dimorphism in the face size. The largest differences were noted in the older category. For girls, the peak of growth occurs between 11 and 12 years of age and for boys between 11 and 13 years, where their growth is still continuing.

Key words

3D facial models, prediction model, age progression, mean prediction error, aging trajectories, geometric morfometry, coloured maps

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Teoretický úvod.....	10
2.1.	Faciálny vývoj človeka.....	10
2.1.1.	Prenatálne obdobie.....	10
2.1.2.	Postnatálne obdobie.....	13
2.1.2.1.	Princíp a faktory ovplyvňujúce kraniofaciálny vývoj.....	14
2.2.	Anatomická stavba hlavy.....	15
2.2.1.	Kostený podklad.....	15
2.2.1.1.	Neurokranium.....	15
2.2.1.2.	Viscerocranium.....	16
2.2.2.	Mäkké tkanivo.....	17
2.2.2.1.	Mimické svaly.....	17
2.2.2.2.	Žuvacie svaly.....	17
2.2.3.	Starnutie mäkkých tkanív.....	17
2.3.	Morfológia tváre.....	20
2.3.1.	Proporčné zmeny charakteristických oblastí tváre.....	20
2.3.1.1.	Krajina očí.....	20
2.3.1.2.	Krajina nosa.....	20
2.3.1.3.	Krajina úst.....	21
2.3.1.4.	Oblasť čela.....	22
2.3.1.5.	Oblasť brady.....	22
2.3.2.	Kraniofaciálne zmeny v jednotlivých vekových obdobiach.....	23
2.3.2.1.	Obdobie od 3 do 6 rokov.....	23
2.3.2.2.	Obdobie od 6 do 12 rokov.....	24
2.3.2.3.	Obdobie od 12 do 18 rokov.....	25
2.3.3.	Pohlavný dimorfizmus.....	25
2.4.	Praktické využitie rastových štúdií tváre.....	26
2.4.1.	Forenzná prax.....	26
2.4.1.1.	Identifikácia.....	26
2.4.1.2.	Odhad a predikcia veku.....	27
2.4.2.	Biomedicínske využitie.....	29
2.4.2.1.	Normy tváre.....	29
2.4.2.2.	Normálny vs. Patologický rast.....	30
2.4.2.3.	Vzácne syndrómy.....	30
3.	Ciele práce.....	32

4.	Hypotézy.....	33
5.	Materiál.....	34
6.	Metodológia.....	35
6.1.	Zber a spracovanie dát.....	35
6.2.	Analýza dát.....	36
6.2.1.	Coherent point drift.....	36
6.2.2.	Analýza hlavných komponentov (PCA).....	38
6.2.3.	Predikčný model.....	38
6.2.4.	Trajektórie rastu.....	39
7.	Výsledky.....	40
7.1.	Hodnotenie predikčného modelu u dievčat a chlapcov v jednotlivých vekových obdobiach.....	41
7.1.1.	Predikčný model u dievčat v 3–5 rokoch.....	41
7.1.2.	Predikčný model u dievčat v 7–12 rokoch.....	42
7.1.3.	Predikčný model u dievčat v 12–15 rokoch.....	43
7.1.4.	Predikčný model u chlapcov v 3–5 rokoch.....	44
7.1.5.	Predikčný model u chlapcov v 7–12 rokoch.....	45
7.1.6.	Predikčný model u chlapcov v 12–15 rokoch.....	46
7.1.7.	Porovnanie aktuálneho predikčného modelu vo všetkých vekových kategóriách.....	47
7.2.	Porovnanie nového predikčného modelu s predchádzajúcimi štúdiami.....	48
7.2.1.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 3–5r.....	48
7.2.2.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 7–12r.....	50
7.2.3.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 12–15r.....	52
7.2.4.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 3–5r.....	54
7.2.5.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 7–12r.....	55
7.2.6.	Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 12–15r.....	57
7.3.	Trajektórie rastu.....	59
8.	Diskusia.....	61
9.	Záver.....	65
10.	Zoznam použitej literatúry.....	66

Zoznam skratiek

3D – trojrozmerný

3DFN – databáza 3D *Facial Norms*

CPD – Coherent point drift

DCA – Dense correspondence analýza

FA – *Facial aging*

PCA – analýza hlavných komponentov

1. Úvod

Ľudské tváre poskytujú bohaté informácie o identite, veku, pohlaví, etnickom pôvode, emóciách atď. Počas niekoľkých posledných desaťročí sa veľké úsilie venovalo strojovému spracovaniu obrazovej analýzy tváre, čo vyplýva najmä z jej širokého potenciálu využitia v reálnom svete rýchleho pokroku v oblasti počítačového videnia a techník strojového učenia (Yang *et al.* 2016).

Každoročne v Európe unikne systémom ochrany viac ako 250 000 detí. Úteky, únosy rodičov a detí, ktoré sa stratili v súvislosti s migráciou, tvoria až 83 % prípadov nezvestných detí v EÚ, ale informovanosť o týchto deťoch a opatrenia na ich ochranu si stále vyžadujú podporu podľa www.missingchildreneurope.eu. Tvár je obvykle jediným biometrickým údajom, ktorý je k dispozícii na vysledovanie nezvestných detí, keďže rodičia a príbuzní majú po ruke fotografie dieťaťa skôr než iné biometrické údaje ako sú odtlačky prstov či snímanie dúhovky oka (Chandaliya a Nain 2022). Biometrické vzory tváre sa používajú nielen na policajné záznamy a detektívne účely, ale aj na komerčné účely, napr. pri vyhľadávaní konkrétnych osôb v obrazových súboroch alebo na sociálnych sieťach. Základom pre tieto účely boli vždy individuálne vzory jednotlivých tvárí (Scheffler 2013).

Podľa štúdií (Kwon a Niels da Vitoria Lobo 1999; Todd a Mark 1980; Albert, Ricanek a Patterson 2007) možno postup starnutia ľudskej tváre všeobecne zhrnúť do dvoch fáz, t.j. rast dieťaťa a starnutie dospelého človeka. Rast kostry zohráva dominantnú úlohu od detstva po dospelosť, zatiaľ čo detaily textúry (napr. vrásky) odlišujú seniorov od mladých dospelých. Simulácia starnutia tváre prešla postupným prechodom z počítačovej grafiky na počítačové videnie (Yang *et al.* 2016).

Cieľom predkladanej diplomovej práce je rozšírenie a overenie predikčného modelu, ktorý je skúmaný od roku 2015. Mojou úlohou bolo rozšíriť časové rady o nových jedincov a zistiť či predikčný model funguje lepšie ako ten predchádzajúci s menším počtom jedincov. Predikčný model bol zostavený na základe lineárneho modelovania dát. Našu vzorku tvorili deti českej populácie vo vekovom rozpätí 3 až 15 rokov, ktorú sme taktiež použili na vytvorenie grafov trajektórií starnutia jednotlivých skupín.

2. Teoretický úvod

2.1. Faciálny vývoj človeka

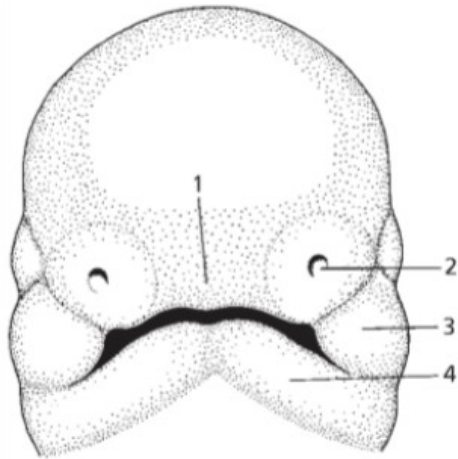
Veľa dôležitých štruktúr ľudskej hlavy sa začína formovať okolo tretieho týždňa po oplodnení. V tomto čase má embryo tri vrstvy buniek, ektoderm, mezoderm a endoderm z ktorých sa vyvinie celý organizmus okolo centrálnej osi notochordu. Bunky každej vrstvy sa diferencujú do jednotlivých tkanív a orgánov. Ektodermálna vrstva, ktorá má najbližší vzťah s vonkajším prostredím, tvorí nervový systém, viaceré zmyslové orgány (uši, nos, oči a pokožku so svojimi derivátmi (vlasy, potné žľazy..). Taktiež tvorí väčšinu kostí a svalov hlavy, zubnú sklovinu či niektoré žľazy (Lieberman 2011).

Ľudská tvár má mnoho charakteristických črt, ktoré sú hodné špeciálnej pozornosti, vytvárajú spolu funkčný celok a počas rastu sa navzájom ovplyvňujú: pokožka pokrývajúca tvár zvonku, tukové vankúšiky, ktoré dávajú formu a štruktúru, svaly dávajúce výraz tváre a aj tie, ktoré sú aktívne pri prežúvaní, podporný skelet, dutiny vo vnútri kostí a dentálne oblúky (Hellman 1932).

2.1.1. Prenatálne obdobie

Vývoj tvárových štruktúr je ovplyvnený vyklenutím frontálneho výbežku, vývojom ústnej dutiny, ale predovšetkým vývojom nosa. Už na začiatku 4. týždňa sa mohutne vyklenuje frontálny výbežok nad vchod do primitívnej ústnej jamky nazývanej stomodeum, ktorá má najprv podobu priečne prebiehajúceho záhybu vystlaného ektodermom (Slípka a Tonar 2019; Vacek 2006). Frontonazálny výbežok vzniká z mezenchýmu pod ventrálnou časťou mozgových vačkov (Sadler 2011).

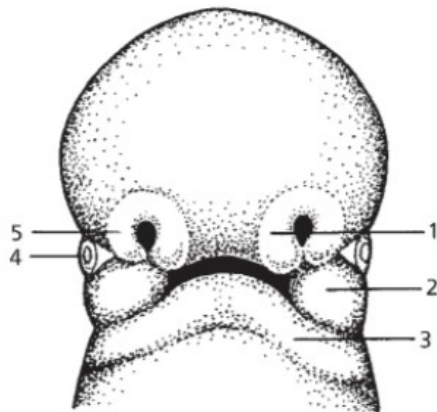
Na konci 4. týždňa sa objavujú tvárové výbežky, ktoré sú tvorené ektomezenchýmom z neurálnej lišty prvého žiabrového oblúka, vyrastajú dopredu a ohraničujú *stomodeum* z oboch strán. Horné maxilárne výbežky vznikajú laterálne od *stomodea* a dolné mandibulárne výbežky vznikajú kaudálne od *stomodea* (Sadler 2011). Dolné mandibulárne výbežky sa spoja v strednej čiare v základ dolnej čeľusti a pier. Horné, maxilárne výbežky neprerastajú až ku strednej čiare, medzi nich sa vsúva nepárový spredu vybiehajúci frontálny výbežok. Po oboch stranách frontálneho výbežku sa zhrubnutím ektodermu zakladajú čuchové platničky (plakody) (Vacek 2006) Obr. 1.



Obr. 1. Vývoj tváre, Embryo staré 28 dní (4. týždeň)

1–frontálny výbežok (*Area triangularis*); 2–čuchová plakoda, prehlbujúca sa v nosnú jamku
3–maxilárny výbežok; 4–mandibulárny výbežok; Upravené podľa (Vacek 2006)

V 5. týždni vyrastajú z frontálneho výbežku dva páry výbežkov, mediálny a laterálne nosné výbežky. Medzi nimi sa prehlbujú čuchové plakody a tvoria nosné jamky. Z laterálnych nosných výbežkov sa formujú nosné krídla. Zbytok strednej časti nosného výbežku sa rozširuje v trojuholníkovité políčko – *area triangularis* z ktorého sa neskôr vytvorí stredná časť nosa – chrbát a koreň nosa (*dorsum* a *apex nasi*) (Vacek 2006) Obr. 2.



Obr. 2. Vývoj tváre, Embryo staré 35 dní (5.týždeň)

1–mediálny nosný výbežok; 2–maxilárny výbežok
3–mandibulárny výbežok; 4–oko; 5–laterálny nosný výbežok; Upravené podľa (Vacek 2006)

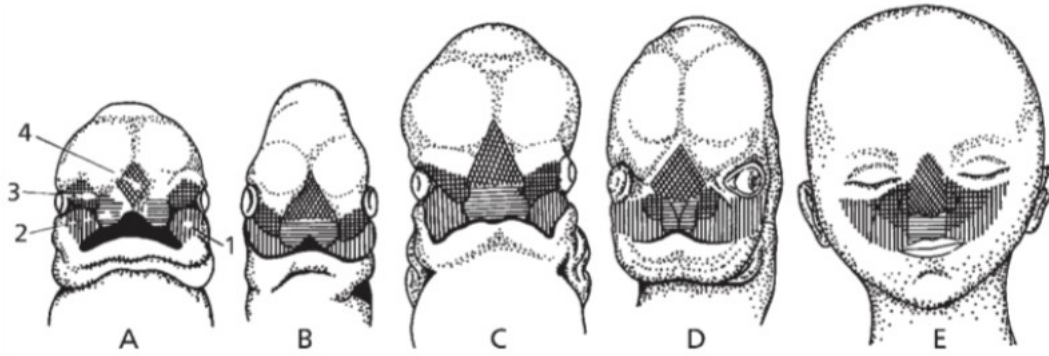
V priebehu dvoch nasledujúcich týždňov sa maxilárne výbežky zväčšujú a rastú mediálne. Tým pritlačujú mediálne nosné výbežky ku strednej čiare až spolu zrastú (Sadler 2011). Plytká brázda vystlaná ektodermom, ktorá spočiatku oddeľuje mediálne nosné

výbežky neskôr vymizne a proliferáciou mezenchýmu sa výbežky spájajú v intermaxilárny segment, ktorý laterálne zrastie s maxilárnymi výbežkami v definitívny základ hornej čeľusti a pery. Z intermaxilárneho segmentu sa vyvinie stredná časť hornej pery – *philtrum*, ďalej stredná časť hornej čeľusti v oblasti budúcich rezákov a primárneho podnebia, majúca podobu trojuholníkovitej platničky (Vacek 2006). Horná pera je teda tvorená dvoma mediálnymi nosnými výbežkami a dvoma maxilárnymi výbežkami. Dolná pera a čeľusť sú tvorené mandibulárnymi výbežkami, ktoré taktiež splývajú v stredovej čiare. Laterálne nosné výbežky sú spočiatku oddelené od maxilárnych výbežkov nazolakrimálnou ryhou vystlanou ektodermom. Ektoderm sa neskôr oddelí a spojí sa epitelový pruh, ktorý sekundárne vytvára slzný kanál, *ductus nasolacimalis* (Vacek 2006).

Zatiaľ čo primárne podnebie vzniká z intermaxilárneho segmentu, hlavná časť definitívneho podnebia vzniká z dvoch podnebných platničiek maxilárneho výbežku. Tieto podnebné platničky sa objavujú v 6. týždni vývoja a zasahujú šikmo dole k laterálnym okrajom jazyka. V priebehu 7. týždňa sa však podnebné platničky zdvíhajú do horizontálnej polohy, spájajú sa v stredovej čiare a vytvárajú sekundárne podnebie. Vpredu sa sekundárne podnebie spája s trojuholníkovitým primárnym podnebím a na ich rozhraní leží *foramen incisivum*. V rovnaký čas kedy sa tieto párové platničky spájajú, rastie nosná prepážka smerom dole a prikladá sa zhora k práve vytvorenému podnebiu (Vacek 2006; Sadler 2011; Slípka a Tonar 2019).

Po vytvorení primitívneho základu tváre z mezenchýmu frontálneho výbežku a z mezenchýmu prvého žiabrového oblúku, sa sekundárne presúva do základov tváre i mezenchým druhého žiabrového oblúka. Z neho sa diferencuje svalstvo tváre a pier. Pre ďalší vývoj tváre je charakteristický rýchly rast stredných častí tváre. Pritom sa nosné otvory, hľadiace rovno vpred, presúvajú stále viac na spodnú stranu *apexu* dvíhajúceho sa nosa. Súčasne s ohraničením ústneho otvoru a zdvíhaním chrbta nosa sa základy očí, spočiatku založené celkom laterálne, posúvajú mediálnym smerom a tým sa k sebe približujú a presúvajú na ventrálnu stranu (Vacek 2006) Obr. 3.

Ak dôjde ku sekundárnemu zániku epitelových prepážok medzi výbežkami, z ktorých vzniká tvár, alebo v prípade, že sa tieto výbežky primárne nespoja, vznikajú vývojové vady rôzneho rozsahu, známe ako rázštep pery, podnebia a iné (Vacek 2006).



Obr. 3. Schéma vývoja tváre

A–embryo dlhé 10 mm; B–embryo dlhé 12 mm; C–embryo dlhé 15 mm; D–*fetus* dlhý 18 mm; E–novorodenec; 1–maxilárny výbežok; 2–mediálny nosný výbežok; 3–laterálny nosný výbežok; 4–frontálny výbežok (*Area triangularis*); Upravené podľa (Vacek 2006)

2.1.2. Postnatálne obdobie

Pri narodení je hlava pomerne veľká, dosahuje približne jednu štvrtinu dĺžky tela dieťaťa. Je dominantnejšia než tvár, ktorá sa vyznačuje bacuľatými lícami, plnými perami a vysokým čelom, ktoré tvorí až polovicu celej tváre novorodenca (Pivoňková 2009). Profil tváre je rovný a jedine nos je trochu vyčnievajúci. V predškolskom období sa radikálne mení práve táto proporcia. Tvár tu preberá dominantné postavenie na hlave a profil tváre je ešte výraznejší (Schüler 2007). Ako človek dozrieva, tkanivá a orgány rastú s ním. Môžu tak urobiť prostredníctvom dráh, ktoré sa líšia svojím počiatkom a rýchlosťou rastu a tiež prechádzajú obdobím zrýchlenia, a spomalenia (Mellion, Behrents a Jr 2013; Lieberman 2011).

Sú dve hlavné postnatálne dráhy rastu ľudskej hlavy: neurálny (*kraniálny*) a skeletálny (*faciálny*). Mozog, súvisiace kapsuly, *neurocranium* a lebková spodina rastú pomerne rýchlo počas prvých dvoch rokov života a následne medzi šiestym a ôsmym rokom dosahujú dospelú veľkosť, na rozdiel od tváre, ktorá rastie pomalšie, paralelne i so zvyškom kostry. Rast tváre prekonáva dve obdobia rastovej akcelerácie. Rastovým spurtom tesne po narodení a počas pubertálneho obdobia dosahuje dospelú veľkosť medzi 14. a 20. rokom (Šmahel 2001; Lieberman 2011).

Rast tváre sa odohráva v troch rovinách: vertikálnej (rast do výšky), transverzálnej (rast do šírky) a anterioposteriornej (rast do hĺbky) (Hellman 1932). Všeobecne platí, že výškové parametre postnatálne rastú najviac a svoj rast ukončujú ako posledné. Naopak šírkové rozmery tváre rastú najmenej a svoj rast ukončujú ako prvé. Hĺbkové

charakteristiky tváre zaujímajú stredné postavenie (Šmahel 2001). Je dôležité analyzovať procesy rastu vo všetkých smeroch a poukázať na alometrickú proporcionalitu (Ferrario et al. 1998).

V 1. roku sa ukazuje mierny vývoj výšky tváre a dosahuje v priemere 68% veľkosti u oboch pohlaví. 5. rokom sa level vývoja zvýši na 83% z celkovej dospeljej veľkosti (Farkas, Posnick, a Hreczko 1992a). Ak 18. rok považujeme za dokončený rast, v 6. roku majú transversálne rozmery tváre dokončené väčšie percento svojej dospeljej veľkosti (a to 80% svojej veľkosti), než vertikálne rozmery pre obe pohlavia. Jedinou výnimkou je však šírka nosa u mužov, ktorá dosahuje 75% zo svojho celkového rastu (Snodell, Nanda, a Currier 1993).

Väčšina zmien v rozpätí od 25 do 45 rokov sú zmeny, ktoré sú jemnejšieho charakteru a napomáhajú pochopeniu postupného starnutia (Bishara, Treder, a Jakobsen 1994). V priebehu času bola morfológia tváre naprieč populáciami ovplyvnená rôznymi faktormi, ako napr. migráciou, výberom partnera, prežitím či klímou, ktoré prispeli do rôznorodosti fenotypov tváre (Richmond *et al.* 2018).

2.1.2.1. Princíp a faktory ovplyvňujúce kraniofaciálny vývoj

Od momentu počatia môže prostredie rodičov ovplyvniť vývoj plodu. Vývoj tváre sa objavuje veľmi skoro, v čase, kedy matka ešte nemusí vedieť o tehotenstve. Vytvárajúci sa plod môže byť vystavený nepriaznivému prostrediu doma, na pracovisku alebo životným štýlom matky (napr. fajčenie, požívanie alkoholu a drog, alergény, pesticídy, ťažké kovy, farby, čistiace prostriedky, kozmetika a iné, keďže množstvo z týchto látok môže prechádzať cez placentu). Niektoré z týchto faktorov, ako nikotín a alkohol, môžu potenciálne ovplyvniť raný neurologický vývoj (Wickström 2007). Existujú dôkazy, že vysoká úroveň expozície alkoholu v prenatálnom období, môže zapríčiniť rôzne anomálie v morfológickom vývoji tváre, napr. fetálny alkoholový syndróm (Hoyme *et al.* 2016). Taktiež aj náhodné udalosti počas života môžu mať zásadný vplyv na vývoj morfológie tváre, ako zranenia, popáleniny, infekcie, ožarovanie, chirurgické zákroky (Richmond *et al.* 2018).

Mechanizmy, ktoré regulujú kraniofaciálny rast a vývoj sú komplexné deje a zahŕňajú interakcie medzi génmi, a environmentálnymi faktormi. Tie môžu ovplyvňovať práve konečnú morfológiu kostí a tkaniva v kraniofaciálnej oblasti (Sadeghianrizi *et al.* 2005; Richmond *et al.* 2018). Medzi rôzne environmentálne faktory, ktoré vplývajú na človeka

v priebehu života patria napr. hormóny, výživa, choroby, operácie, dentofaciálna ortopédia, faktory životossprávy ako napr. fajčenie, požívanie alkoholu, cvičenie, ale aj funkcie žuvacieho systému, dýchania a prehltania (Djordjevic *et al.* 2016). Environmentálne faktory môžu ovplyvniť epigenetické mechanizmy, ako je modifikácia DNA, modifikácia histónov, riadenie transkripčnej aktivity, ktoré môžu viesť ku aktivácii a deaktivácii génov ľudského genómu v určitých časových bodoch, a špecifických orgánoch, ku ktorým dochádza bez zmeny sekvencie DNA (Hartsfield, Morford, a Otero 2012). Vplyv životného prostredia na vývoj nemožno presne určiť z dôvodu vzájomne pôsobiacich faktorov genetického a etnického pôvodu, sociálno-ekonomickej úrovne rodičov, výživy a najmä dĺžky vystavenia subjektu vplyvom životného prostredia (Farkas 1996).

2.2. Anatomická stavba hlavy

Kostru hlavy zaradzujeme do osového skeletu tela. Lebka človeka je pevná a pružná kostená schránka pre mozog a zmyslové orgány. Lebečné kosti sú z anatomického hľadiska polymorfne a individuálne veľmi variabilné zložky skeletu. Z vývojového, anatomického a funkčného hľadiska má lebka dve časti: mozgovú časť (*Neurocranium*) a tvárovú časť (*Viscerocranium*). Veľkou skupinou svalov hlavy, ktoré zasahujú a tvoria tvárovú oblasť, sú mimické a žuvacie svaly (*musculi faciales et musculi masticatores*). Ďalšie svaly hlavy podľa funkčného hľadiska môžeme rozdeliť do niekoľkých skupín: svaly hltanu, svaly mäkkého podnebia, svaly jazyka a svaly stredného ucha, ktoré sa spájajú s činnosťami jednotlivých orgánových sústav. (Čihák a Grim 2001; Dylevský 2009).

2.2.1. Kostený podklad

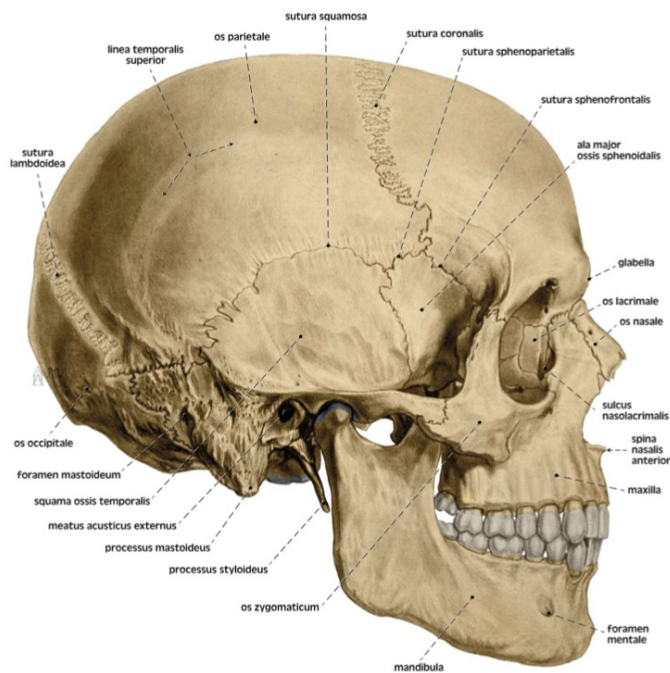
2.2.1.1. Neurocranium

Pôvodne sa zakladá ako chrupkovité púzdro mozgu, na ktorom sa podieľajú aj púzdra zmyslových orgánov (čuchové, zrakové, sluchové púzdro). Tvoria ho chondrogénne (pôvod v chupavke) aj dezmozogénne (pôvod vo väzive) typy kostí. Medzi chondrogénne patria kosti lebkovej spodiny: báza záhlavnej kosti (*basis ossis occipitalis*), enchondrálne časti spánkových kostí (*ossa temporalia*), klinová kosť (*os sphenoidale*), čuchová kosť (*os ethmoidale* a dolná nosová mušľa (*concha nasalis inferior*). Medzi dezmozogénne kosti patria: horná časť šupiny kosti záhlavnej (*squama ossis occipitalis*), temenné kosti (*ossa parietalia*), čelová kosť (*os frontale*), šupiny spánkových kostí (*squama ossis temporalis*), nosné kosti (*ossa nasalia*), slzné kosti (*ossa lacrimalia*

a čerieso (*vomer*). Anatomická hranica spodiny a klenby lebky prechádza od *protuberantia occipitalis externa* k báze *processus mastoideus* k hornému okraju vonkajšieho zvukovodu a odtiaľ k hornému okraju očnice. Strop očnice teda už nepatrí medzi lebkovú spodinu. Kostru lebkovej klenby tvoria ploché kosti vzájomne pospájané pomocou švov, ktoré dodávajú klenbe pružnosť a zvyšujú jej odolnosť voči deformácii. Lebková spodina je naopak tvorená pevnými ale nie príliš pružnými kosťami (Dylevský 2009; Čihák a Grim 2001), Obr. 4.

2.2.1.2. Viscerocranium

Kostra tváre je typická tým, že jej kosti sú slabé a málo mechanicky odolné aj napriek tomu, že sú za bežných okolností vystavené tlaku, ťahu a pohybu pri dolnej čeľusti. Táto nižšia odolnosť je sčasti kompenzovaná dobrou regeneračnou schopnosťou. Prevláda desmogénna osifikácia, ktorá tvorí: jarmové kosti (*ossa zygomatica*), podnebné kosti (*ossa palatina*) a dominanty tvárovej oblasti horná (*maxilla*) a dolná čeľusť (*mandibula*), ktoré vytvárajú vchod do ústnej dutiny. Nachádzajú sa tu však aj kosti chondrogénneho pôvodu, ktoré sú taktiež pozostatkami žiabrových oblúkov, v strednom uchu nákovka, kladivko, strmienok (*incus, malleus, stapes*), bodcovitý výbežok spánkovej kosti (*processus styloideus ossis temporalis*) a jazyčka (*os hyoideum*) (Čihák a Grim 2001; Dylevský 2009), Obr. 4.



Obr. 4. Lebka človeka – laterálny pohľad (Grim, Naňka, a Helekal 2017)

2.2.2. Mäkké tkanivo

2.2.2.1. Mimické svaly

Mimické svaly (*musculi faciei*) vznikajú z 2. žiabrového oblúka. V ranom embryologickom období sa materiál pre tieto svaly šíri z oblasti krku cez tvár až na temeno hlavy a do spánkovej oblasti. Tieto svaly ležia hlavne na povrchu a upínajú sa do kože, kde je ich úlohou ovládať tvar a pohyb tvárových štrbín. Túto úlohu dopĺňajú ďalšie pohyby, ktoré vytvárajú vrásky, ryhy, jamky orientované kolmo na priebeh svalových zväzkov. Tým môžu meniť celkový výraz tváre tj. mimiku. Prebiehajú v podkožnom väzive preto nemajú fascie. Všetky mimické svaly inervuje lícny nerv (*n. facialis* – *n. VII.*). Mimické svaly rozdeľujeme do niekoľkých skupín: svaly lebkovej klenby, ktoré sa spájajú do jedného svalu – *m. epicranius*, ktorý zahŕňa *m. occipitofrontalis* a *m. temporoparietalis*; svaly očnej štrbiny – *m. orbicularis oculi*, *m. procerus*, *m. corrugator supercilii*; svaly nosa – *m. nasalis*, *m. levator labii superioris alaeque nasi*; svaly ústnej štrbiny – *m. orbicularis oris*, *m. levator labii superioris*, *m. zygomaticus minor*, *m. zygomaticus major*, *m. levator anguli oris*, *m. risorius*, *m. depressor anguli oris*, *m. depressor labii inferioris*, *m. mentalis* v hlboknej vrstve sval, ktorý tvorí podklad líc *m. buccinator*. Medzi mimické svaly patria aj svaly ušnice (*m. auricularis anterior*, *m. temporoparietalis*, *m. auricularis superior*, *m. auricularis posterior*), no dnes sú už len rudimentárne, keďže stratili svoju funkčnosť a nemenia tvar ucha (Čihák a Grim 2001; Dylevský 2009).

2.2.2.2. Žuvacie svaly

Žuvacie svaly (*musculi masticatorii*) sú derivátom 1. žiabrového oblúka z ktorého vznikli aj časti iných svalov. Tieto svaly pohybujú čeľustným kĺbom a ich hlavnou funkciou je zatvorenie/otvorenie úst a uplatňujú sa predovšetkým pri jedení. Sú rozložené po oboch stranách čeľustného kĺbu v dvoch vrstvách aj so svalmi, ktoré majú vzťah ku krídlatému výbežku klinovej kosti, na vnútornej strane kĺbu. Všetky sú inervované treťou vetvou *n. trigeminus*. K týmto svalom zaradíme: svaly povrchové – *m. temporalis*, *m. masseter*; vo vzťahu ku krídlatému výbežku – *m. pterygoideus medialis* a *m. pterygoideus lateralis* (Čihák a Grim 2001; Dylevský 2009).

2.2.3. Starnutie mäkkých tkanív

Rast mäkkého tkaniva nie je úplne závislý od podkladového kostného tkaniva. Skôr než pokles konvexity tváre, ktorý je charakteristický pre kostený profil, a v prípade mäkkých tkanív, vrátane vonkajšieho nosa, konvexita s progresiou rastu zvyšuje. Z tohto hľadiska

neboli zmeny mäkkých tkanív analogické tým, ktoré sa prejavujú na profile kostry. (Subtelny 1959). Pochopenie zmien v mäkkých tkanivách počas rastu je taktiež dôležité pre ortodonciu. Profil tváre reaguje na zmeny na perách a môže byť kľúčom k predikcii stability po ortodontickej liečbe (Prahl-Andersen *et al.* 1995).

Starnutie tváre sa prejavuje v rôznych formách už počas dospievania, no výraznejšie štruktúrne zmeny tváre v podobe vrások a iných kožných artefaktov sa prejavujú predovšetkým v priebehu neskorších období dospelosti (Ramanathan, Chellappa, a Biswas 2009). Detailnejší popis starnutia tváre v dospelosti je zhrnutý v Tab. 1. Vzhľad mäkkých tkanív tváre môžu ovplyvňovať práve genetické a environmentálne faktory, ktoré pôsobia na každého človeka individuálne (Djordjevic *et al.* 2013)

Tab. 1. Zmeny na kostnom a mäkkom tkanive tváre u človeka v dospelosti (podľa Albert, Ricanek, a Patterson 2007)

Vekové rozpätie	Pravdepodobná zmena na kostre	Pravdepodobná zmena mäkkého tkaniva a vzhľad tváre
20–30	mierny rast kraniofaciálneho skeletu mierny nárast anteriórnej výšky dolnej časti tváre nárast dĺžky mandibuly	začínajú klesať horné očné viečka oči sa zdajú menšie začínajú sa tvoriť nazolabiálne vrásky a laterálne aj okolo očí u žien začína ustupovať horná pera
30–40	dentoalveolárny ústup postupná retrúzia <i>maxilly</i> , kt. prispieva k tvorbe nazolabiálnych záhybov nárast dĺžky mandibuly	zmenšuje sa hrúbka hornej pery začínajú sa tvoriť cirkumorálne vrásky a línie od laterálnych okrajov nosa k laterálnym okrajom úst
40–50	remodelácia kraniofaciálneho skeletu pokračuje ústup zubných alveol skraca sa dĺžka zubných oblúkov	vrásky a záhyby sa na tvári naďalej zväčšujú postavenie nosa a brady je ovplyvnené zmenšujúcou sa dĺžkou zubného oblúka sú zjavné najhlbšie morfológické zmeny hlavy, tváre a krku
50–60	pokračuje kraniofaciálna remodelácia hrúbka lebky sa nemení remodelácia alveolárnej kosti možný úbytok zubov ovplyvňujúci vertikálnu výšku tváre	vrásky a záhyby sa na tvári naďalej prehlbujú vyčnievanie nosa a uší v dôsledku väčšej kraniofaciálnej konvexity
> 60	zmenšenie kraniofaciálnej veľkosti väčšia kraniofaciálna konvexita (okrem <i>maxilly</i> a <i>mandibuly</i>) možná artritída temporomandibulárneho kĺbu a sploštenie kĺbu pokračuje remodelácia alveolárnej kosti	pokračuje vyčnievanie nosa a uší konkávny vzhľad lícných jamôk v dôsledku remodelácie alveolárnej kosti zmenšené čeľuste

2.3. Morfológia tváre

2.3.1. Proporčné zmeny charakteristických oblastí tváre

2.3.1.1. Krajina očí

Očnica (*orbita*) je kostená schránka, ktorá poskytuje oporu a mechanickú ochranu vlastnému zmyslovému orgánu, oku. Má tvar štvorbokého ihlana a obsahuje mnohé otvory, kadiaľ prechádzajú nervy, cievy a slzný kanálik (*canalis nasolacrimalis*), ktorý prechádza z očnice do nosnej dutiny prechodom cez *saccus nasolacrimalis* a *ductus nasolacrimalis*. V mäkkom tkanive je oko prekryté očnými viečkami, na ktorých sú riasy pre ochranu oka. Svaly, ktoré obkolesujú očnú guľu zabezpečujú pohyby oka (Hudák a Kachlík 2017).

Veľkosť a tvar očí sa významne upravuje v závislosti na veku, pohlaví a ich interakcii. Od detstva do staroby sa zväčšujú vzdialenosti medzi vnútornými a vonkajšími kútikmi, výška orbity, dĺžka očnej štrbiny a taktiež aj mäkké tkanivá v očnom okolí (Sforza *et al.* 2009).

Vývoj očnice a vzájomnú polohu očí môžeme skúmať a popisovať na základe vzdialeností landmarkových bodov vo vnútornom a vonkajšom kútiku oka (Leslie G. Farkas a *et al.* 1992; Krimmel *et al.* 2015). Vnútorné kútiky vykazujú stabilný lineárny rast v transversálnom smere od narodenia až po 8. rok s každoročným prírastkom 0,3 mm (Krimmel *et al.* 2015). V 1. roku dosahuje šírka vnútorných kútikov v priemere u oboch pohlaví až 84,1% a v 5. roku dosahuje tento rozmer až 93,3% zo svojej celkovej veľkosti. V vekovom rozmedzí 1–5 rokov tak nastáva najväčší prírastok v tomto rozmere (Leslie G. Farkas a *et al.* 1992). Vo vertikálnom a sagitálnom smere už však ide o dvojfázový rastový vzor (Krimmel *et al.* 2015). Šírka vonkajších kútikov dosahuje v 1. roku mierne vyšší vývoj, v priemere 85,9% a do piatich rokov stúpa len veľmi málo. Najväčšie prírastky v šírke vonkajších očných kútikov sú v období medzi 5 a 18 rokom (Leslie G. Farkas a *et al.* 1992). Od detstva do 16. až 17. roku sa šírka vonkajších kútikov u mužov zvyšuje o 1,3 mm/rok u žien o 0,9 mm/rok, kým šírka vnútorných očných kútikov sa zvyšuje o 0,5 mm/rok u mužov a o 0,3 mm/rok u žien. Výška orbity sa zvyšuje približne o 7–9 mm. Celkovo sú všetky prírastky súvisiace s vekom sú u mužov väčšie než u žien. Rozmery a poloha mäkkých tkanív orbitálnej oblasti sú pohlavne dimorfické a menia sa medzi detstvom, adolescenciou a skorou dospelosťou až do ôsmej dekády života (Sforza *et al.* 2009).

2.3.1.2. Krajina nosa

Vonkajší nos (*nasus externus*) tvorí vstup do nosnej dutiny a tým aj do dýchacej sústavy. Vyvíja sa z nepárového frontálneho laloku, na ktorom sa po stranách vytvárajú čuchové plakody, ktoré mu dávajú základ. Z pohľadu *norma lateralis* je zjavné, že nos svojím tvarom trojbokej pyramídy vyčnieva v strednej oblasti tváre. Nos má kostný a chrupkovitý podklad, a delí sa na tieto časti: koreň nosa (*radix nasi*), chrbát nosa (*dorsum nasi*), hrot nosa (*apex nasi*), nosné krídla (*alae nasi*), nosné dierky (*nares*) a nosnú prepážku (*septum nasi*) (Čihák a Grim 2001; Hudák a Kachlík 2017).

Šírka anatomického nosa a jeho mäkkého tkaniva bola signifikantne väčšia u chlapcov než u dievčat, rozdiely boli okolo 1 mm. Pomery pre oba parametre, šírku anatomického a mäkkého nosa ku šírke úst neboli rozdielne u chlapcov a dievčat v časnom dojčenskom veku. (White *et al.* 2004; Nut a Moss 2000) Taktiež Nanda, Meng, Kapila, & Goorhuis, 1990; Snodell *et al.*, 1993, potvrdzuje, že pohlavné rozdiely v nazálnej oblasti sú považované za malé v detskom až pre-pubertálnom období. Šírka nosa v prvom roku dosiahla u oboch pohlaví v priemere 79,5% a zvýšila sa na 87,1% v 5. roku (L. G. Farka a *et al.* 1992b). Konvexita mäkkého tkaniva sa trošku zvyšuje od 3 do 6 rokov a potom zostáva celkom stabilná, napriek znižujúcej sa konvexite podkladovej kosti. Chaconas & Bartroff, 1975 tvrdili, že zvyšovanie konvexity bolo z veľkej časti v dôsledku rastu nosa. Šírka nosa dosahuje svoju zrelosť u mužov v 14. rokoch a v 12. rokoch u žien (L. G. Farkas a *et al.* 1992b).

Vývojový stupeň výšky nosa v prvom roku dosiahol priemer 59% u oboch pohlaví a do 5 rokov sa zvýšil na 76,9%. Medzi 1 a 18. rokom sa výška nosa zvýšila, v priemere o 20,9 mm u oboch pohlaví, zatiaľ čo najväčší z prírastkov bol po 5. roku a to medzi 5 a 8. rokom. Výška nosa bola u mužov úplne vyvinutá v 15. rokoch u žien v 12. roku (L. G. Farkas a *et al.* 1992b).

Viditeľný je pohlavný dimorfizmus v dĺžke nosa, jeho prominencia a v dĺžke *philtru*, ktoré je väčšie u mužov než u žien. Kým všetky kosti hlavy a tela dosiahnu svoju konečnú veľkosť začiatkom dospelosti, nos a uši sú založené hlavne na chrupavke, ktorá pokračuje vo svojom raste počas celého života (Zankl *et al.* 2002).

2.3.1.3. Krajina úst

Ústa tvoria vchod do ústnej dutiny (*cavitas oris*) a začínajú tak gastrointestinálny trakt. Uzatvárajú ústnu štrbinu (*rima oris*) a sú tvorené dvoma vodorovnými riasami, perami (*labia oris*). Delíme ich na dolnú peru (*labium inferius*) a hornú peru (*labium*

superius), ktorá svojim horným okrajom prechádza vo *philtrum*, ktoré siaha až k nosnej prepážke (Čihák a Grim 2001). Dolná pera vzniká zrastom párových mandibulárnych výbežkov a horná pera zrastom dvoch maxilárnych výbežkov s nepárovým frontálnym výbežkom (Hudák a Kachlík 2017).

Oblasť pier a úst preukazujú významný pohlavný dimorfizmus, ktorý sa mení počas detstva, puberty, skorej dospelosti a dokonca aj po 80. roku života. Nájsť ho môžeme konkrétne v šírke pier a *philtru*, a v celkovej výške, ktoré sú väčšie u mužov než u žien. Pomer výšky červene pier ku šírke úst je väčší u dievčat než u chlapcov, počas adolescencie je to naopak, v dospelosti je pomer znova väčší u žien než u mužov. Všetky rozmery sa významne modifikujú v závislosti na veku, pričom šírka úst a objem pier sa s vekom zvyšujú a taktiež celková výška. Po skorej dospelosti hodnoty zostávajú stabilné a až časom sa znova táto oblasť znižuje. Celá oblasť úst a všetky objemy pier sú väčšie u mužov než u žien, hoci sa celková výška červene pier rýchlejšie znižuje u mužov než u žien, čo je viditeľné veku od 18–85 rokov (Sforza et al. 2010)

2.3.1.4. Oblasť čela

V 1. roku šírka čela vykazuje najnižšiu vývojovú úroveň 71,7% u oboch pohlaví oproti ostatným rozmerom hlavy. V 5. roku sa vývoj zvyšuje len mierne na 84%, ale stále zostáva najmenej vyvinutou oblasťou v porovnaní so svojou dospelou veľkosťou. Najväčší prírastok nastáva práve v rozmedzí 5–18 rokov (L. G. Farkas a *et al.* 1992c). Nadočnicový oblúk je situovaný na čelovej kosti nad očnicou a oddeľuje čelo od očnice (Endo 1965). U ľudí sa zvykne nachádzať nad oboma očami a tvorí tak mechanickú ochranu. Typicky sú nadočnicové oblúky viac vyčnievajúce u mužov než u žien, môže sa to líšiť aj medzi etnickými skupinami (Shearer *et al.* 2012).

2.3.1.5. Oblasť brady

Pozícia brady je študovaná najmä prostredníctvom landmarku *pogonion*, ktorý sa nachádza v strede a teda nedochádza tam ku zmenám v transversálnom smere. V sagitálnej a vertikálnej rovine ide o krivočiary rast, ktorý sa vekom znižuje (Krimmel *et al.* 2015). Brada u chlapcov sa vo veku od 5 do 10 rokov stáva o 5–7 mm vyčnievajúcejšou než u dievčat, s výnimkou obdobia 10 rokov kde bol rozdiel minimálny. Prominencia brady u dievčat sa do 8 rokov mení málo. Po tomto veku sa brada stáva viac vystupujúcou v prírastku 3–5 mm v 9–10 roku (Nute a Moss 2000).

2.3.2. Kraniofaciálne zmeny v jednotlivých vekových obdobiach

2.3.2.1. Obdobie od 3 do 6 rokov

Detská tvár má vysoké čelo bez výrazných nadočnicových oblúkov. Má výrazné líčne kosti, veľké a široko zasadené oči a plochú tvár, kde pri pohľade z profilu je najvýraznejším znakom spodná čeľusť, ktorá je ďaleko posunutá dozadu v porovnaní s tvárou nad ňou. Tvár je vertikálne krátka kvôli malej nosovej časti, stále rastúcim čeľustným kostiam a ešte nie úplne vytvorenému primárnemu či sekundárnemu chrupu. Samotná tvár pôsobí viac brachycefalická, pretože je stále pomerne široká a vertikálne krátka (Enlow, Moyers, a Merow 1982).

Vývoj tváre medzi 3 a 6. rokom života sa stáva vyrovnanejším u dievčat, pričom maximum dosahujú medzi štvrtým a piatym rokom života. U chlapcov sa najvýraznejšie prírastky vyskytujú neskôr, až po piatom roku života. U oboch pohlaví je dolná časť tváre širšia a predĺžená, do popredia sa dostávajú nadočnicové oblúky, spodná časť očnice, nos, pery a brada. V súvislosti s výraznejšími rastovými zmenami čela u chlapcov možno pozorovať hlbšie uloženie orbitálnej oblasti (Kočandrlová *et al.* 2020). Sú zjavné signifikantné rozdielnosti medzi vekovými skupinami a pohlaviami. Vzdialenosti medzi vonkajšími a vnútornými kútikmi očí sa zvyšujú každý rok a chlapci vykazujú väčšie hodnoty než dievčatá (Möller *et al.* 2012).

Medzi 3.–4. rokom sa najväčšie zmeny v raste tváre objavujú na laterálnych oblastiach spodnej časti tváre, brady a dolnom okraji tváre o nie viac ako 2 mm u oboch pohlaví. U dievčat boli najväčšie prírastky viditeľné na spodnej časti očnice, nadočnicových oblúkoch, nose, lícach a spodnej pere, zatiaľ čo u chlapcov bol prírastok viditeľný na spodnej orbitálnej oblasti, čele, na špičke nosa a spodnej pere. Hlbšie uloženie orbitálnej oblasti bolo u chlapcov pozorované so štatistickou významnosťou. Do 5. roku sú rastové zmeny viditeľné v tých istých oblastiach tváre, ale u dievčat sa prejavujú s väčšou intenzitou než u chlapcov. Počas týchto dvoch rokov sa celá oblasť nosa, pier a spodnej časti tváre stáva výraznejšou. Najväčšia oblasť so štatisticky signifikantnými zmenami rastu tváre boli nájdené u dievčat predovšetkým kvôli ich výraznému rastu v strednej oblasti tváre, vrátane líc (Kočandrlová *et al.* 2020). Ďalšie významné zmeny sa vyskytli u oboch pohlaví prevažne v oblasti stredne a dolnej časti tváre. Najväčšie prírastky boli viditeľné u chlapcov medzi 4.–5. rokmi, u dievčat zas medzi 4.–5. a 5.–6. rokom (Möller *et al.* 2012). V období do 6. roka je v kontraste s predchádzajúcimi časovými intervalmi

výraznejší nárast u chlapcov. Najväčší je rast čela, spodnej časti orbitálnej oblasti, laterálne časti tváre, horná pera a hlboko umiestnená horná orbitálna oblasť. U oboch pohlaví môžeme vidieť zmeny na špičke nosa, perách, brade, pričom najväčšie zmeny sú na dolnom okraji tváre (Kočandrlová *et al.* 2020).

2.3.2.2. Obdobie od 6 do 12 rokov

Vo veku 6. rokov sú len tri premenné, ktoré sú rozdielne medzi dievčatami a chlapcami, a to šírka lebky, tváre a hornej čeľuste. Percentuálne zmeny od 6–12 rokov ukazujú len malý rozdiel medzi horizontálnymi a vertikálnymi rozmermi, v rozmedzí 10–20% (Snodell, Nanda, a Currier 1993). Rastový vzor tváre chlapcov vo veku 6–7 rokov bol veľmi podobný tomu ako u dievčat. Chlapčenská tvár je vo všeobecnosti o 1–3 mm širšia, zväčšuje sa na 3–5 mm na spodnom okraji v oblasti mandibuly a väčšina brady je o 1–3 mm vyčnievajúcejšia u chlapcov než u dievčat (Nute a Moss 2000). Vo veku 6–8 rokov má dolná časť tváre dokončenejšiu rast než horná, od 8–18 rokov majú však obe časti približne podobné percentuálne prírastky. Pri dolnej časti tváre ako aj iných vertikálnych rozmeroch môžeme konštatovať ich veľký nárast u chlapcov vo veku od 12–18 rokov, ktorý ukazuje významný rozdiel medzi mužmi a ženami. U mužov je prírastok 33% tam, kde u žien nedosahoval ani 20%. Podstatne sa zvyšuje výška *ramus mandibularis* a silne ovplyvnila štruktúru tváre. Toto platí hlavne u chlapcov, ktorí v 12. roku dosahujú 85% z celkového rastového potenciálu *ramus mandibularis* a u mnohých mužov nebol tento rast ukončený ani v 20. rokoch (Snodell, Nanda, a Currier 1993). Čo sa týka horizontálnych rozmerov, šírka lebky dosiahne vo veku 6 rokov 94–95% svojej dospeljej veľkosti. Medzi 6. a 18. rokom sa prejavuje najvyššie percentuálne zvýšenie šírky nosa zo všetkých horizontálnych rozmerov. Zvýši sa o 25% (5,8 mm) u žien a o 33% u mužov (7,6 mm). K najväčšiemu rozšíreniu hornej čeľusti dochádza vo veku 7–11 rokov u dievčat aj chlapcov. V prípade vertikálnych rozmerov je percentuálny nárast vyšší než u horizontálnych. Do 12 rokov je prírastok veľmi podobný pri oboch pohlaviach a najväčšie zmeny nastávajú po tomto roku, počas pubertálnej rastovej periódy (Snodell, Nanda, a Currier 1993).

Taktiež rast celkového objemu tváre u chlapcov a dievčat je do 11 rokov podobný. Rastový spurt u dievčat bol evidentný vo vekovej skupine od 11 do 12 rokov. Po tomto veku sa rast spomalil. Vo výskyte počiatkovej fázy rastového spurtu adolescentov (11–12r.) sa ako štatisticky signifikantný rozdiel medzi chlapcami a dievčatami ukázal objem dolnej tretiny tváre. Porovnanie pomeru strednej a dolnej tretiny tváre u chlapcov a dievčat

bol významný len v obdobiach 11–12 a 15–16 rokov až po dospelosť. U chlapcov bol rozsah rastového spurtu širší než u dievčat (Ferrario *et al.* 1998).

2.3.2.3. Obdobie od 12 do 18 rokov

Celkovo najvýznamnejšie zmeny rastu u dievčat nastali medzi 12. a 13. rokom, pozorujeme rast celej oblasti čela, nosa a dolnej čeľusti. Po 13. roku života sa rastové zmeny spomalili (Koudelová *et al.* 2019). Zatiaľ čo u dievčat vo vekovej skupine 14–16 rokov nenastali žiadne alebo minimálne zmeny a tvár takmer dokončila svoj rast vzhľadom k dospelosti. Dievčatá majú výraznejšie oči a líca v porovnaní s chlapcami, u nich zas výraznejšiu oblasť zastupuje nos (Ferrario *et al.* 1998; Koudelová *et al.* 2019; Toma *et al.* 2008; Kau a Richmond 2008). U chlapcov nastávajú najvýraznejšie zmeny po 11. roku a pokračovali až do 14. roka života, najmä v oblasti čela a obočia, nastáva tiež zväčšenie nosa a aj brady, ktorá sa posúva smerom nadol. Okrem toho sa vo všetkých vekových kategóriách vyskytuje sploštenie líc, prehĺbenie orbitálnej oblasti a tým následné zvýraznenie nadočnicových oblúkov, ktoré sa zväčšuje s vekom. Po 14. rokoch sa rast tváre pomaly zmiernuje, ale stále pretrváva až do 17 rokov. Po 16. roku boli rastové zmeny pozorované len v menšej časti nosa a brady (Koudelová *et al.* 2019; Koudelová *et al.* 2015).

2.3.3. Pohlavný dimorfizmus

Ak by sme definovali pohlavný dimorfizmus, ide o rozdielnosť vo veľkosti, tvare, vlastnostiach a správaní medzi pohlaviami v rámci rovnakého druhu (Samal, Subramani, a Marx 2007). Pohlavný dimorfizmus je prítomný už od raného veku, postupne sa však s časom mení (Bulygina, Mitteroecker, a Aiello 2006; Möller *et al.* 2012; Schüller 2007; Tutkuvienė *et al.* 2016). U ľudí a ostatných primátov bol pohlavný dimorfizmus študovaný z dvoch rozdielnych pohľadov: ako pohlavný dimorfizmus u dospelých jedincov a ako pohlavný dimorfizmus v ontogenetických procesoch, ktoré spôsobujú dimorfizmus v dospelosti (Rosas a Bastir 2002).

Pohlavný dimorfizmus vo veľkosti je možné stanoviť už v najskoršom veku (0,5 roka). V ranných štádiách života majú chlapci viac ohnutú spodinu lebky, relatívne väčšiu čelovú kosť a menšiu tvár než dievčatá. V ďalších obdobiach sa to obracia. Vo veku 6–12 rokov majú chlapci a dievčatá najviac podobné tvary. Pred pubertou majú chlapci väčšie tváre než dievčatá v rovnakom veku, avšak sú trochu oneskorený vo vývoji tvaru tváre. Priemerný trend zmeny tvaru sa začína líšiť medzi chlapcami a dievčatami v puberte.

Vtedy sa chlapcom začína vyvíjať viac vystupujúca nadočnicová oblasť než u dievčat. Chlapci pokračujú svoj vývoj v tvári aj potom ako priemerný ženský rast prestal medzi 12. až 14. rokom. U dievčat sú najvýraznejšie oblasti líc a očí. Väčšina pohlavného dimorfizmu sa vo veľkosti tváre dosiahne práve počas predĺženého obdobia rastu u mužov. U 15 ročných chlapcov môžeme pohlavne dimorfické zmeny pozorovať najmä v oblasti *glabelly*, nadočnicových oblúkov, nosa, hornej pery a dolnej čeľuste (Bulygina, Mitteroecker, a Aiello 2006; Koudelová *et al.* 2015). Stupeň pohlavného dimorfizmu tváre sa mení v závislosti na veku (Samal, Subramani, a Marx 2007), pričom oblasti s najväčšími rozdielmi sa počas starnutia postupne znižujú (Mydlová *et al.* 2015).

2.4. Praktické využitie rastových štúdií tváre

2.4.1. Forezná prax

2.4.1.1. Identifikácia

Pri osobnej identifikácii patria medzi najviac používané črty tváre mäkkých tkanív. Poznanie ich zmien súvisiacich s vekom je nevyhnutné na budovanie súboru dát pre forezné vyšetovanie. Ďalšou aplikáciou môže byť odhad veku živých a mŕtvych osôb, použitím priamych antropometrických meraní ako aj fotografických záznamov. Rovnaké údaje môžu vstupovať do simulácií rastu tváre a starnutia, čo pomáha pri osobnej identifikácii (Sforza *et al.* 2009).

Za účelom zistenia, ktoré z fotogrametrických rozmerov sú užitočné pre policajné záznamy a techniky lekárskeho skríningu, je potrebné nájsť proporcie tváre, ktoré nezávisia, alebo len veľmi málo závisia na veku. To bude užitočné pri výbere individuálnych charakteristík a pri rozpoznávaní jednotlivých znakov bez ohľadu na vek (Scheffler 2013), keďže tvárové dimenzie, ktoré ostávajú stabilné v čase môžu napomôcť osobnej identifikácii dokonca aj roky po aktuálnom zločine (Sforza *et al.* 2009).

V Európe je každý rok nahlásených približne 250 tisíc nezvestných detí, jedno dieťa každé dve minúty. Napriek tomuto vysokému číslu, je náročné zozbierať komplexné údaje o tom, prečo detí miznú a čo sa stane ak zmiznú. (Pretože v Európe sú odlišné metódy zberu údajov). Preto spoločnosť Missing Children Europe podporila vývoj systému zameraného na vzťah so zákazníkmi a zberu údajov, ktorý bol uvedený do prevádzky v 8 európskych krajinách do roku 2020. Tento systém umožní systematický zber porovnateľných údajov, ktoré sa potom môžu použiť na výskum a lepšie pochopenie problému, plus možné riešenia problému zmiznutia detí. Missing Children Europe tiež

zbierajú údaje zo sietí európskych horúcich liniek pre nezvestné deti z 32 krajín Európy. Tieto údaje sú zbierané každoročne a sú publikované vo výročných správach, ktoré dávajú náhľad do veku, dôvodov zmiznutia, počtov detí, ktoré boli nájdené a mnoho iných súvisiacich údajov. Podľa www.missingchildreneurope.eu v prípadoch, kde je dieťa nezvestné viac rokov, je hľadanie a identifikácia oveľa náročnejšie kvôli rastovým a vývojovým zmenám vzhľadu dieťaťa (Lampinen, Miller, a Dehon 2011).

Na identifikáciu sa môže taktiež používať poloha materských znamienok na obrázkoch tváre pomocou špeciálne vyvinutého algoritmu na overenie či sa poloha materských znamienok mení s vekom a či táto metóda môže pomôcť rozpoznať tú istú osobu v priebehu času, a tiež odlíšiť danú osobu od iných osôb so znamienkami (Caplova *et al.* 2017).

2.4.1.2. Odhad a predikcia veku

Približne pred 20 rokmi sa začala pozornosť výskumníkov počítačových vied a počítačového videnia odkláňať od 2D zobrazovania obrazu práve k 3D modelovaniu. Po rokoch však znova môžeme vidieť trend návratu k prístupom založeným na 2D obrazoch (Egger, Wuhler, a Inp 2020).

Hoci jednotlivé navrhované metódy starnutia dokážu syntetizovať vierohodné sekvencie starnutia, stále tam zostáva priestor na zlepšenie v porovnaní s vyškolenými forenznými pracovníkmi, ktorí majú skúsenosti a znalosti z anatómie, a starnutia reálnej tváre. Jedným z nedostatkov môže byť aj nedostatočné zohľadnenie individuality vstupnej tváre (Suo, Chen, a Shan 2012).

Starnutie tváre (Face aging–FA) tiež známe ako veková progresia má za cieľ u daného jedinca syntetizovať tváre v rôznych vekových obdobiach. Mnohé modely vekovej progresie sa uplatňujú v odvetviach ako lekárska kozmetika, sociálne zabezpečenie, forenzných odvetviach ale aj v digitálnej zábave. V posledných rokoch bolo starnutie tváre svedkom mnohých prelomov, tým, že bolo navrhnutých mnoho metód (Fu, *et al.* 2010; Suo *et al.* 2010; Park, *et al.* 2010; Little *et al.* 2008; Tiddeman a Burt 2001; Maulin R. Gandhi 2004; Chandaliya a Nain 2022; Yang *et al.* 2016). V praxi, metódy FA vytvárajú realistické zobrazenia tvárí, ktoré pomáhajú nájsť nezvestné deti, kým iné diskriminačné metódy dosahujú vysokú mieru identifikácie tvárí osôb (Deb 2018).

Na simuláciu komplexného procesu starnutia tváre sú navrhnuté rôzne metódy, podľa Shu, *et al.* (2016), ktoré by sa dali zhruba rozdeliť do troch typov:

- 1) Prístupy založené na prototypoch (Suo *et al.* 2010; Kemelmacher-Shlizerman, Suwajanakorn, a Seitz 2014; Shu, Tang, *et al.* 2016)
- 2) Prístupy založené na fyzických modeloch (Suo *et al.* 2010; Lanitis, Taylor, a Cootes 2002; Tazoe 2012)
- 3) Prístupy založené na hlbokom učení (Zhang, Song, a Qi 2017; Yang *et al.* 2018; Wang *et al.* 2018; Li *et al.* 2018)(Wang *et al.* 2016; P. Li, Hu, *et al.* 2019; Liu *et al.* 2017)

Prototypové prístupy starnutia tváre modelujú použitím neparametrického modelu. Prenášajú rozdiel medzi dvoma prototypmi zdroja a cieľovou vekovou skupinou do vstupnej individuálnej tváre. Tieto metódy sa zameriavajú na vytvorenie vekových prototypov a nevyžadujú sekvencie tváre tej istej osoby s nepretržitým (kontinuálnym) vekom (Liu *et al.* 2021). Kemelmacher-Shlizerman, *et al.* (2014) navrhol Illimination-aware age progression (IAAP) metódu vzatím zdeformovanej priemernej tváre ako prototypu. Shu *et al.*, (2017) prispel dvoj-úrovňovým slovníkom, ktorý preberá riedke zastúpenie rovnakej starnúcej vrstvy ako prototyp. Shu *et al.* predstavil prístup starnutia riadený príbuzenstvom, ktorý využíva tok SIFT ako náhradu optického toku (Kemelmacher-Shlizerman, *et al.* 2014) na analýzu priemerne starnúcej tváre. Poznanie príbuzenstva ovplyvňuje smer starnutia deformovaním syntetizovanej tváre k tváram ich rodičov (Shu, Xie, *et al.* 2016). Tieto prístupy sú však obmedzené zdieľanými vzormi starnutia a je ťažké zachovať osobné informácie výslednej kompozitnej tváre (Liu *et al.* 2021).

Prístupy založené na fyzických modeloch zamestnávajú parametrické modely na simulovanie vzorov starnutia (Yang *et al.* 2016; N Ramanathan a Chellappa 2006). Nasledovaním antropometrie, sú tieto metódy schopné modelovať kraniofaciálny model. Ramanathan a Chellappa (2006) charakterizujú deformáciu tvaru pre mladé tváre s priemernými zmenami v landmarkových parametroch. Sú však výpočtovo drahé a vyžadujú si širokú škálu sekvencií tvárí toho istého jedinca, ktorým chýba schopnosť vytvárať sofistikované starnúce textúry tváre.

Prístupy založené na hlbokom učení (Zhang, Song, a Qi 2017; Yang *et al.* 2018; Wang *et al.* 2018; Li *et al.* 2018; Wang *et al.* 2016; Liu *et al.* 2017; P. Li, Huang, *et al.* 2019) dosiahli najlepšie výsledky v tvárovej vekovej progresii (*facial age progression*) v poslednej dekáde. Liu *et al.* (2017) navrhli kontextový GAN na reguláciu vytvorených obrázkov, ktoré spĺňajú pravidlá starnutia medzi vekmi s extra diskriminačnou sieťou.

Yang *et al.* (2018) predstavili pyramídový diskriminátor na jemnozrnný odhad vekovo špecifických záchytných bodov na vysokej úrovni. Li, Huang, *et al.* (2019) navrhli univerzálny rámec na dosiahnutie analýzy veku tváre vrátane prekladu veku, generácie a odhadu veku. Avšak pri týchto metódach, ktoré sa vzťahujú na sofistikované starnúce textúry a parametrické zmeny tvaru sa takmer nepočíta o riešení FA v mladom veku (Liu *et al.* 2021).

Progresia starnutia tváre v nízkom veku zahŕňa navyše rast kostry tváre (Yang *et al.* 2016). Najviac očividná zmena u malých detí je, keď vyrastú geometrická deformácia kontúr tváre. Od trochu bacuľatých až po jasný okraj, variácie sú podobné ale môže tam byť mnoho osobitých rozdielov.

2.4.2. Biomedicínske využitie

2.4.2.1. Normy tváre

Kraniofaciálne normy mäkkého tkaniva sú typicky zostavené zo súboru štandardných antropometrických meraní hlavy a tváre zo zdravej reprezentatívnej vzorky populácie (Weinberg 2019). Na to, aby boli kraniofaciálne normy maximálne užitočné, je potrebné aby boli vekovo, pohlavne a etnicky špecifické. Tradičná metóda používaná na zbieranie normatívnych kraniofaciálnych dát bola manuálna antropometria s použitím nástrojov ako sú kaliperu a zvinovacie meradlá. Priama aj nepriama antropometria majú svoje výhody aj nevýhody. Žiadna z nich neposkytuje instantné výsledky, každá metóda na testovanie potrebuje svoj určitý čas, ktorý závisí od počtu meraní a od techniky merania (Farkas a Deutsch 1996).

Niektoré z ďalších limitácií zahŕňajú spoliehanie sa na vzdialenosti, uhly a indexy, ktoré môžu poskytnúť len miery trojrozmernej (3D) morfológie či neschopnosť premerať subjekty alebo odvodiť ďalšie merania, ktoré neboli zozbierané v aktuálnom čase merania. Potrebný je aj rozsiahly tréning na osvojenie si správnych antropometrických techník, ide o relatívne invazívny charakter meracích metód, ktoré sú väčšinou málo tolerované malými deťmi a osobami s istými vývojovými poruchami, a je potreba mnoho času na zozbieranie vyžadovaných meraní. Navyše tradičné normatívne databázy sa obmedzili na súhrnnú štatistiku a surovú základnú individuálnu úroveň dát, ktoré nie sú vo všeobecnosti prístupné výskumnej alebo klinickej komunite. Táto skutočnosť výrazne obmedzuje užitočnosť súboru dát na účely analýzy a porovnávaní. Preto bola založená databáza 3D

Facial Norms (3DFN) v snahe prekonať mnohé z prítomných obmedzení v existujúcich kraniofaciálnych antropometrických súboroch dát (Weinberg *et al.* 2015).

Normy ktoré boli zhromaždené dekády dozadu, sa v porovnaní s tými súčasnými môžu líšiť nielen v prevedení meraní ale aj rozličnou kompozíciou tela v tej dobe, čo tiež ovplyvňuje morfológiu tváre, napr. BMI (Flegal 2005). (Gyenis 1994; Jantz a Jantz 2000; Hossain *et al.* 2011) navrhujú že sekulárne zmeny v kraniofaciálnej morfológii môžu byť oveľa jemnejšie, avšak tieto trendy nie sú potvrdené.

2.4.2.2. Normálny vs. Patologický rast

Podobne ako kefalometrické normy tak aj antropometrické normy mäkkého tkaniva sú používané ako pomôcka pri vymedzení syndrómu (Allanson, O'Hara, a Farkas 1993; Ward, Jamison, a Allanson 2000; Kolar, Salter, a Weinberg 2010), či v predoperačnom plánovaní a hodnotení výsledku chirurgického zákroku (Yamada *et al.* 2002; Brons *et al.* 2012) a pre tvorbu kvantitatívnych morfologických porovnaní (Kesterke *et al.* 2016; Weinberg *et al.* 2016). Proporcie, ktoré nezávisia na veku a ani na pohlaví, môžu byť užitočné pri zisťovaní dysmorfických (znak, ktorý je odchýlkou od normálneho stavu, rozmeru, polohy, môže súvisieť s genetickými syndrómami) znakov pri klinických skriningových vyšetreniach (Scheffler 2013). Je známe, že niekoľko genetických syndrémov napr. Downov syndróm (Farkas, Katic, a Forrest 2002; Ferrario *et al.* 2005) je charakterizovaných priestorovými anomáliami, najmä v dolných častiach tváre napr. Hallerman–Streiff syndróm (Defraia, Marinelli, a Alarashi 2003).

Na úspešnú liečbu vrodených alebo posttraumatických deformácií tváre človeka by mali chirurgovia vyžadovať prístup do kraniofaciálnych databáz na základe presných antropometrických meraní. Normatívne údaje o meraniach tváre sú preto nevyhnutné na presné určenie stupňa odchýlok od normálu. (Farkas *et al.* 2005; Čaplovičová *et al.* 2018).

2.4.2.3. Vzácnne syndrómy

Kraniofaciálne syndrómy môžu tvoriť kolektívny názov pre širokú skupinu vrodených genetických väd s množstvom anomálií s hlavnými symptómami v kraniofaciálnej oblasti. Mnohé z týchto syndrémov sú relatívne vzácne iba s malým počtom živo narodených detí ročne (Lewyllie *et al.* 2017). Odhaduje sa, že bolo popísaných viac ako 700 kraniofaciálnych syndrémov. Kraniofaciálne anomálie predstavujú približne jednu tretinu všetkých vrodených väd, čo odráža komplexnosť

vývoja hlavy a tváre. Kraniofaciálny vývoj závisí od multipotentnej, migrujúcej populácie buniek neurálnej lišty, ktoré vytvárajú väčšinu kostí a chrupaviek hlavy a tváre (Terrazas *et al.* 2017). Väčšina z nich sú morfológické, ktoré zasahujú tvar, funkciu hlavy a tváre, mnohé sa však spájajú aj s génmi receptora fibroblastového rastového faktoru, ktorý priamo riadi vývoj kostí a chrupaviek. Klinická manifestácia týchto symptómov je však ďaleko širšia než len kraniofaciálna oblasť. Preto najlepší liečebný prístup je taký, ktorý je multidisciplinárny a berie do úvahy fyzický, a mentálny vývoj človeka (Buchanan, Xue, a Hollier 2013). Niektoré z najviac študovaných kraniofaciálnych syndrémov sú tie, ktoré sú spojené so skorým uzavretím lebečných švov, napr. Pfeifferov, Apertov, Crouzonov syndrém spolu s Treacher Collins, Goldenhar syndrém, Nage a Miller syndrém a inými (Lewylye *et al.* 2017; Terrazas *et al.* 2017).

3. Ciele práce

Cieľom tejto diplomovej práce je rozšírenie a overenie súčasného algoritmu predikčného modelu tváre človeka zamerané na obdobie rastu detí vo vekových kategóriách 3–5 rokov a 7–15 rokov.

Čiastkové ciele práce sú:

1. Rozšíriť predikčný model publikovaný v štúdií Koudelová *et al.*, 2019, Kočandrlová, 2017.
2. Porovnať nový prediktor s pôvodne publikovanými (minimálna, maximálna a stredná chyba medzi predikovaným a reálnym vekom jedincov).
3. Porovnať trajektórie rastu dievčat a chlapcov.

4. Hypotézy

Na základe predchádzajúcich štúdií, boli stanovené nasledujúce hypotézy:

1. Predpoklad, že nový rozšírený predikčný model bude spoľahlivejšie predikovať vek v porovnaní so skôr publikovanými štúdiami.
2. Predpoklad, že nový prediktor bude presnejšie predikovať vývoj tváre u dievčat.
3. Predpoklad, že sa trajektórie rastu nebudú líšiť od skôr publikovaných.

5. Materiál

Na Katedre antropologie a genetiky člověka Přírodovědecké fakulty Karlovy Univerzity byla založena databáze 3D faciálních modelů v Laboratoriu 3D zobrazovacích a analytických metod v roce 2009. Tato databáze se nadále rozšiřuje a disponuje velkým množstvím longitudinálních, aj transverzálních dat o jedincích v různých věkových kategoriích či už samotné faciálně 3D skeny alebo aj dáta o telesnom zložení daných jedincov.

V tejto práci som využívala 3D faciálne modely detí českej národnosti s normálnym rastom bez viditeľných patológií tváre. Na predikčný model sme použili aj pôvodný súbor jedincov, ktorý zahŕňal deti zo ZŠ Pošepného (Pošepného námestie 2022/3, 14800, Praha 4) a Gymnázia Kladno (Nám. Edvarda Beneše 1573, 27201, Kladno), ktoré boli skenované v rokoch 2009–2015. Súbor taktiež zahŕňal aj deti z materských škôl, MŠ na Výšinách (Na Výšinách 1075/3, 17000, Praha 7) a MŠ Hrabákova (Hrabákova 2000/15, 14800, Praha 4). Spomínané skenovanie prebiehalo od roku 2013 do roku 2016. K pôvodnému súboru jedincov patrilo 105 detí, ich výsledné predikčné modely môžeme vidieť v predchádzajúcich štúdiách.

K pôvodnému súboru sme pridali nových jedincov v počte 55, ktorí boli skenovaní v rokoch 2016 až 2020. U každého dieťaťa boli podpísané aj informované súhlasy a GDPR ich zákonným zástupcom. Vekové skupiny sme rozdelili na predškolský vek 3,00–5,99 roka, mladší školský vek 7,00–12,99 roka a starší školský vek 12,00–15,99 roka. Skenovanie zvyčajne prebiehalo dvakrát počas školského roka v MŠ Hrabákova a ZŠ Pošepného s výnimkou predminulého roka vzhľadom na okolnosti a opatrenia spojené s COVID-19, kedy prebehlo skenovanie jedenkrát v decembri 2020. Z predchádzajúcich skúseností sme sa rozhodli vynechať šesťročné deti, pretože by nám podstatne zmenšili vzorku, kvôli tomu, že je to vek, kedy už deti zvyknú nastupovať na základné školy alebo naopak ešte zostávajú v MŠ a je to nepredvídateľné. Celkový počet jedincov vid' Tab. 2., ktorých som použila v mojej práci bolo 160 z toho 73 chlapcov a 87 dievčat. 3D faciálnych skenov bolo v tejto práci použitých 693.

Tab. 2. Počet skenovaných jedincov v troch vekových kategóriách

vek	3–5r.		7–12r.		12–15r.	
spolu	40		60		60	
pôvodní/noví	21	19	38	22	46	14
chlapci/dievčatá	18	22	26	34	29	31

6. Metodológia

6.1. Zber a spracovanie dát

Skenovanie 3D faciálnych skenov prebiehalo pomocou viac kamerového skenera Vectra 3D (Canfield Scientific, Inc.) a v súčasnosti od roku 2018 skenerom 3dMDface™ System (3dMD Limited, Brentford, London, UK). 3D skenovanie je bezpečná, neinvazívna metóda. Skenovanie je veľmi rýchle (2 ms). Počas skenovania boli jedinci posadení a skenovaní spredu čelom ku skeneru. Dôležité je, aby zaujali neutrálny výraz, hlava v prirodzenej polohe a vlasy boli prípadne zachytené čelenkou.

Jednotlivé snímky boli automaticky zložené do 3D faciálneho modelu aj s textúrou, pomocou programu Mirror Photo Tools Software (Canfield Scientific, Inc, Fairfield, NJ). Tento 3D model je tvorený polygónovou sieťou s rôznym počtom trojuholníkov a vertexov (vrcholov). Následne bol exportovaný a upravovaný v programe Rapidform XOS 2006 (Inus technology, Inc., Seoul, Južná Kórea). Zbytky vlasov, oblasť krku a uší boli odstránené a drobné chyby a otvory boli opravené, (Obr. 5.). Nakoniec bol počet trojuholníkov, ktoré vytvára 3D model, zredukovaný (zdecimovaný) na 26 000.



Obr. 5. Neorezaný 3D model tváre (vľavo), orezaný a zdecimovaný 3D model tváre (vpravo) v programe Rapidform

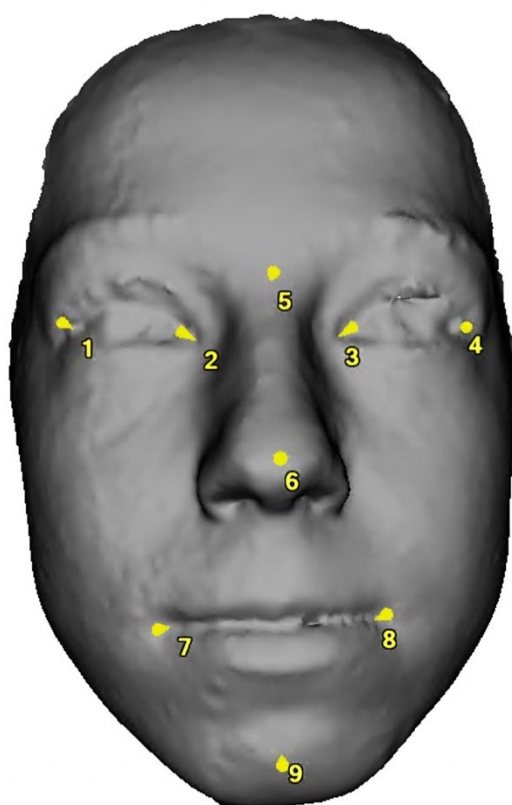
6.2. Analýza dát

K analýze dát bol použitý software Morphome3cs II, ktorý je vyvíjaný Matematicko-fyzikálnou fakultou v spolupráci s Katedrou antropologie a genetiky človeka Přírodovědeckej fakulty Karlovej Univerzity. Program je založený na princípoch metód geometrickej morfometrie. Umožňuje vyhotovenie landmarkových a krivkových dát, spracováva povrchové, a objemové dáta, a umožňuje ich následné štatistické hodnotenie, a prezentovanie výsledkov (Krajíček *et al.* 2012).

6.2.1. Coherent point drift

Coherent point drift - Dense correspondence analýza (CPD-DCA), je upravená a vylepšená DCA metóda (Dupej *et al.* 2014), ktorá slúži k automatickej nerigidnej registrácii dát (Myronenko a Song 2010). Pomáha nám zjednotiť vlastnosti všetkých 3D modelov, (teda vynútiť homológiu) tak aby boli vzájomne homologické a odpovedali si rovnakým počtom trojuholníkov, a vrcholov. Prebieha pred vlastnou analýzou dát a postupuje sa v nasledovných krokoch.

Na začiatku je potrebné každému 3D modelu na povrch umiestniť 9 referenčných landmarkov podľa (Hutton, Buxton, a Hammond 2001). Ich poradie musí byť na každom 3D modeli rovnaké. Landmarky nanášame manuálne v programe Morfome3cs II (Vid' Obr. 6 a popis Tab. 3.). Tieto landmarky boli použité na predbežné zarovnanie povrchov tváre (3D modelov) pomocou generalizovanej prokrustovskej analýzy (GPA), prebehla rigidná registrácia a vzdialenosť medzi jednotlivými homologickými landmarkami bola nastavená na minimálnu. Tým sa súbor landmarkov zarovnal do rovnakého (priemerného) tvaru. Od tohto bodu sa už landmarky ďalej nevyužívajú. V ďalšej fáze bol zvolený ľubovoľný 3D model použitý ako vzor topológie tzv. *base mesh*, ktorý slúžil ako predloha pre ostatné 3D modely tzv. *floating meshes*, ktoré si však zachovali svoj tvar (Dupej *et al.* 2014). Prebehla nerigidná registrácia použitím metódy CPD (Myronenko a Song 2010), ktorá zdeformovala všetky povrchy 3D modelov (*floating meshes*) na *base mesh*. Metóda CPD-DCA je presnejšia ako pôvodná metóda DCA, ktorá závisela iba od zvolených homologických landmarkov.



1. exocanthion dx
2. endocanthion dx
3. exocanthion sin
4. endocanthion sin
5. nasion
6. pronasale
7. chelion dx
8. chelion sin
9. pogonion

Obr. 6. Zobrazenie základných landmarkov na tvári (podľa Hutton, Buxton, a Hammond 2001)

Tab. 3. Popis jednotlivých landmarkov (Ferrario *et al.* 2003)

Názov landmarku	Definícia landmarku
exocanthion (dx/sin)	bod na vonkajšom kútiku oka, pravý a ľavý
endocanthion (dx/sin)	bod na vnútornom kútiku oka, pravý a ľavý
nasion	bod na hranici nasofronálneho švu v mediálnej rovine
pronasale	najanteriórnejší bod na špičke nosa
chelion (dx/sin)	bod na vonkajšom kútiku úst, kde sa stretáva červeň hornej a dolnej pery, pravý a ľavý
pogonion	bod v mediálnej rovine <i>protuberantia mentalis</i> najviac anteriórne

6.2.2. Analýza hlavných komponentov (PCA)

Po vymazaní nechcených súčastí sa vykoná vysokodimenzionálna analýza hlavných komponentov (Dupej *et al.* 2014). PCA je metódou lineárnej transformácie pôvodných znakov na nové, nekorelované premenné, nazývané hlavné komponenty. Každý hlavný komponent predstavuje lineárnu kombináciu pôvodných znakov. Základnou charakteristikou každej PC je miera ich variability, teda rozptyl. Hlavné komponenty sú zoradené podľa dôležitosti od najväčšieho príspevku k najmenšiemu. Väčšina informácií o variabilite pôvodných dát je sústredená do prvého komponentu a najmenej do posledného.

Štandardným využitím PCA je zníženie dimenzie, teda redukcia počtu znakov bez veľkej straty informácie a to použitím práve iba niekoľko prvých PC. Toto zníženie dimenzie sa netýka počtu pôvodných znakov. Je to výhodné predovšetkým pre možnosť zobrazenia viacrozmerných dát (Meloun a Militký 2004). Hodnoty hlavných komponentov sa označujú ako skóre a podľa potreby je možné ďalej v závislosti na hypotéze testovať jednorozmernými aj viacrozmernými štatistickými testami (Urbanová a Kralik 2009).

6.2.3. Predikčný model

Predikčný model sme vytvorili pre tri vekové kategórie, pre dievčatá a chlapcov osobitne. Skupina najmladších detí je v intervale 3 až 5 rokov, deti mladšieho školského veku od 7 do 12 rokov a posledná skupina sú staršie deti vo veku 12 až 15 rokov. Na vykonanie predikcie tvaru tváre je potrebné najprv nastaviť model. Vzhľadom na vysokú dimenzionalitu vrcholových údajov sme ako nezávislú premennú použili všetky skóre hlavných komponentov získané predchádzajúcou PCA (Koudelova *et al.* 2015). Predikcia je vypočítaná na základe lineárneho modelovania dát. Veľkosť priemernej predikčnej chyby sme merali porovnaním našich predikovaných tvárí s pôvodnými skutočnými tvármi. V každej vekovej skupine sme vzali najmladší výskyt každej vzorky a simulovali sme ich na najstarší známy výskyt. Túto predpoveď sme porovnali so skutočnou (známou) tvárou, výpočtom vzdialeností medzi príslušnými vrcholmi, čo nám uľahčila homológia vrcholov. Tieto chyby predikcie sa spriemerovali zo všetkých vzoriek v jednotlivých skupinách a vykreslili sa ako farebná mapa. Tento model sa dá použiť na predpovedanie nielen do budúcnosti ale aj spätne (Koudelová *et al.* 2019).

Predikčná chyba je vizualizovaná pomocou farebných máp, kde na farebnej stupnici je 9 odtieňov po 0,38 mm, od 0 mm po 3,5 mm veľkosti predikčnej chyby. Najtmavšia modrá predstavuje nulovú chybu predikcie, červená farba zas najväčšiu chybu.

6.2.4. Trajektórie rastu

Skonštruovali sme samostatné trajektórie starnutia pre každé pohlavie. Naše dáta pozostávali z troch longitudinálnych súborov a to deti od 3–5 rokov, 7–12 rokov a 12–15 rokov. Rastová trajektória bola vytvorená modelovaním PCA skóre. Model starnutia bol zjednodušený na lineárny v každom longitudinálnom súbore. Pre každé pohlavie sme zostrojili graf, ktorý vizualizoval globálnu zloženú rastovú trajektóriu pozostávajúcu z priemerných trajektórií pre jednotlivé kategórie, kubickej interpolácie (Koudelová *et al.* 2019) a jednotlivé čiastkové nezjednodušené trajektórie. Keďže sme obdobie 7–12 a 12–15 rokov dali do spoločného grafu, koniec jednej skupiny so začiatkom druhej skupiny by tak nenadväzoval, preto sme trajektórie pre tieto dve obdobia spojili pomocou kubickej krivky.

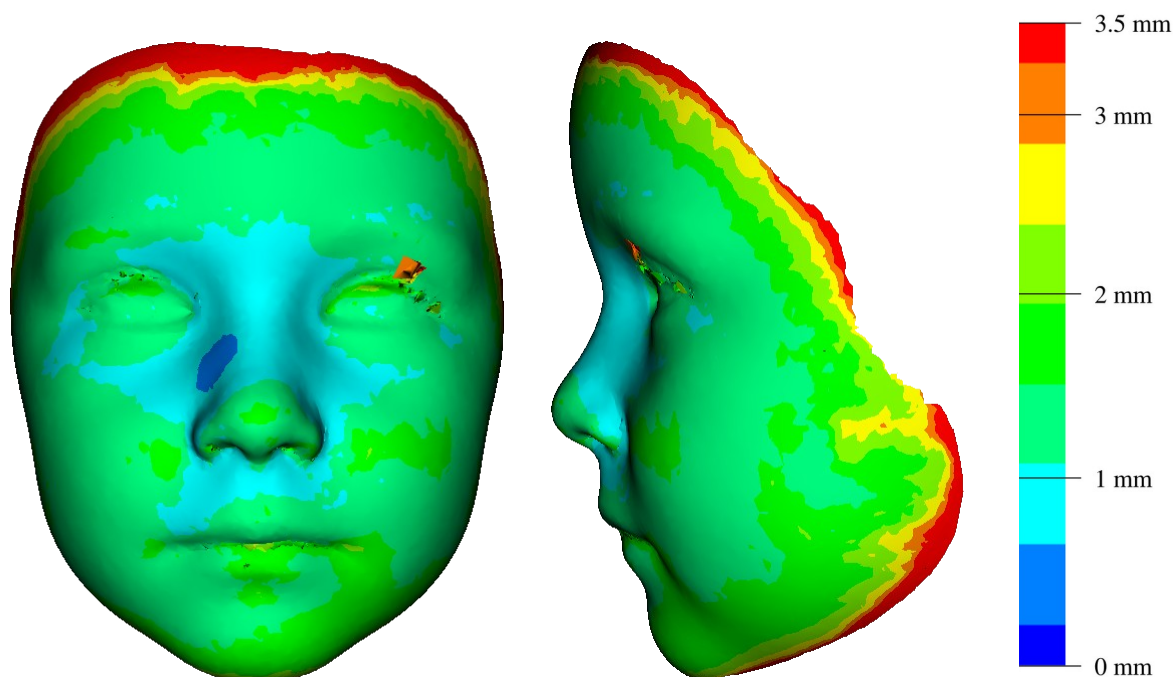
7. Výsledky

V nasledujúcej kapitole sú reprezentované výsledky rozdelené do jednotlivých podkapitol, ktoré sa venujú predikčnému modelu, ktorý bol vytvorený pre dievčatá a chlapcov osobitne v každej vekovej kategórii. Graficky sú znázornené na farebných mapách zobrazujúce jednotlivé priemerné chyby predikcie. Farebná stupnica obsahuje 9 odtieňov farieb a každý odtieň predstavuje zmenu o 0,38 mm. Najtmavšia modrá farba predstavuje oblasti s najmenšou, nulovou, priemernou predikčnou chybou, zatiaľ čo červená popisuje oblasti s najväčšou priemernou predikčnou chybou.

Nasleduje porovnanie rozšíreného predikčného modelu s predchádzajúcim modelom, ktorý obsahoval menší počet jedincov. Kategóriu malých detí vo veku 3 až 5 rokov sme porovnali s jedinou predchádzajúcou faciálnou predikciou v tomto veku, ktorej sa venovala Mgr. Kočandrlová vo svojej diplomovej práci na Katedre antropologie a genetiky človeka na PřF v roku 2017 (Kočandrlová 2017), počet jedincov sme tu zdvojnásobili. Kategóriu detí mladšieho školského veku 7 až 12 rokov sme porovnali s publikáciou (Koudelová *et al.* 2019), pôvodnú skupinu sme obohatili o 22 nových jedincov. Záverečnou skupinou sú deti vo veku 12 až 15 rokov, kde sme pridali najmenší počet, a to 14 jedincov k pôvodnej skupine skenovaných detí v štúdiu (Koudelová *et al.* 2015). Na záver grafické zobrazenie jednotlivých trajektórií starnutia v PCA priestore pre dievčatá a chlapcov spoločne vo všetkých vekových kategóriách spomínaných vyššie.

7.1. Hodnotenie predikčného modelu u dievčat a chlapcov v jednotlivých vekových obdobiach

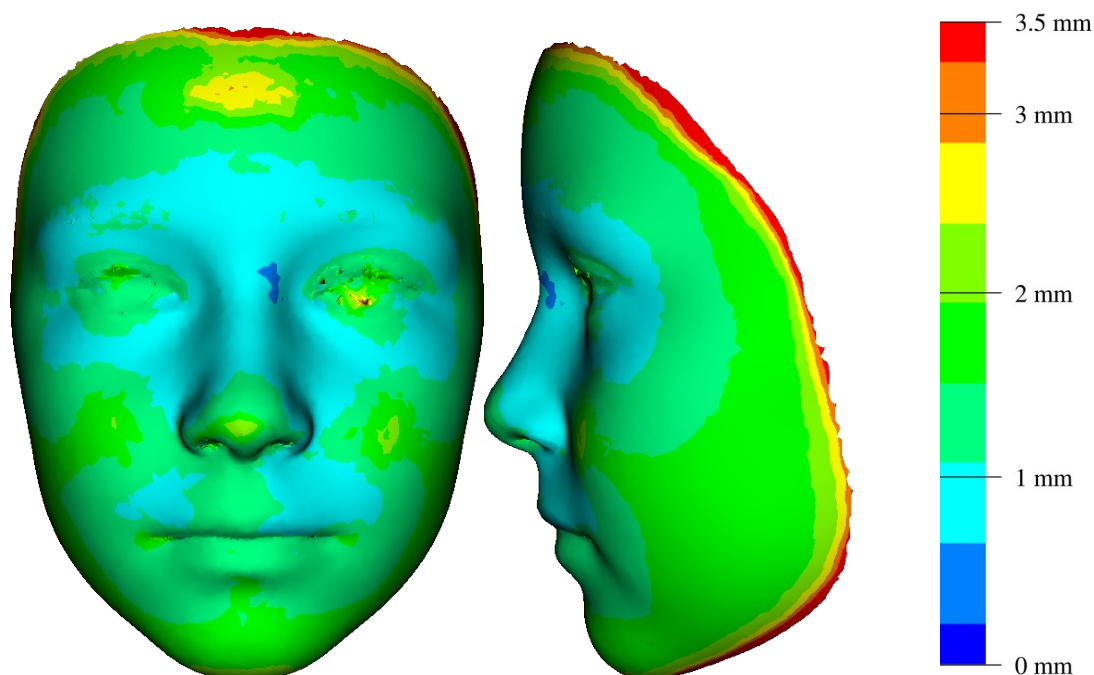
7.1.1. Predikčný model u dievčat v 3–5 rokoch



Obr. 7. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u dievčat v 5 rokoch

Priemerná predikčná chyba je vizualizovaná na farebnej mape na Obr. 7. Veľkosť priemernej predikčnej chyby je 1,922 mm a medián 1,379 mm. Najmenšia predikčná chyba je 0–0,5 mm (modrá farba) na pravej laterálnej strane nosa. Svetlotyrkysová farba nám zobrazuje predikčnú chybu o veľkosti 0,5–1 mm. Zasahuje centrálnu časť tváre, koreň, chrbát a bočné strany nosa, ktoré zasahujú pod oči. Taktiež vnútorné kútiky očí a lokálne aj vonkajšie kútiky očí s časťou horného viečka, *philtrum* pod nosom zasahujú oblasť hornej pery. Odtiene svetlozelenej farby sú viditeľné takmer na celej ploche čela a obočia, v oblasti očí, a pod spodnými viečkami očí, na špičke nosa, skoro celej oblasti líc, červené pier, kútikoch úst, a v oblasti brady. Veľkosť chyby v tejto oblasti je 1–2,5 mm. Veľkosť predikčnej chyby 2,5–3,5 mm červenej až žltej farby zahŕňa oblasti po obvode celej tváre, ktorá mierne zasahuje aj spodnú časť líc.

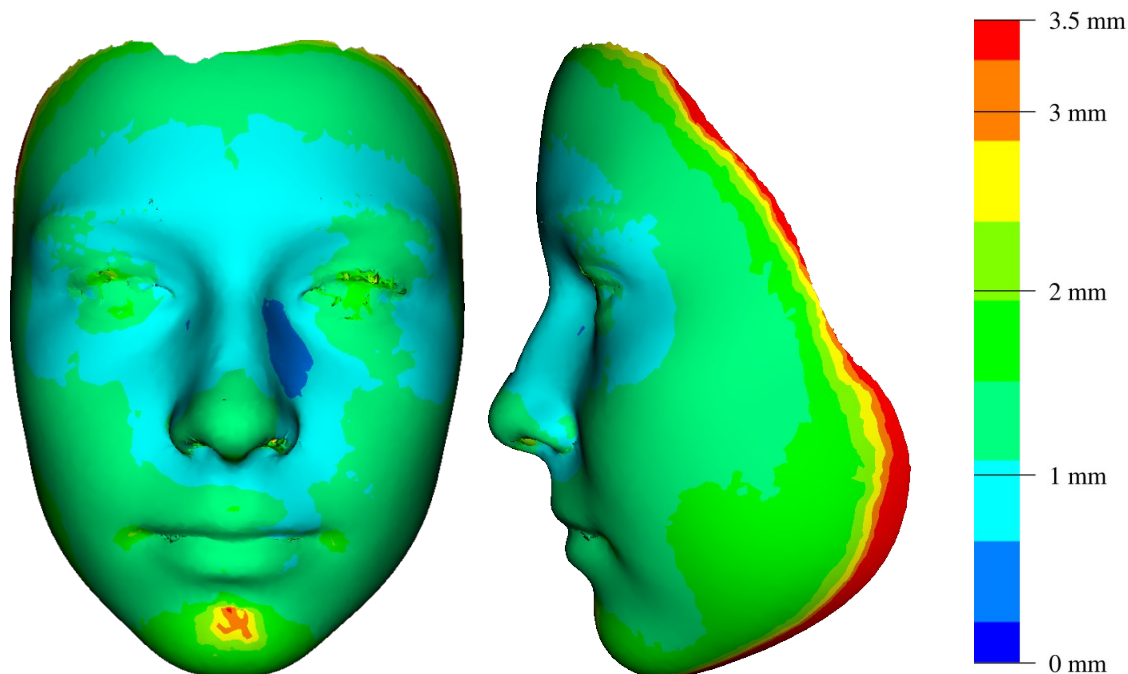
7.1.2. Predikčný model u dievčat v 7–12 rokoch



Obr. 8. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u dievčat v 12 rokoch

Priemerná predikčná chyba v tomto vekovom období u dievčat je 1,726 mm a medián 1,283 mm, vidíme na Obr. 8. Najmenšia predikčná chyba 0–0,5 mm modrej farby je viditeľná na laterálnom okraji koreňa nosa. V strednej časti tváre je predikčná chyba o veľkosti 0,5–1 mm, znázornená svetlotyrkysovou farbou. Patrí tam spodná tretina čela, obočie, okolie orbitálnych oblastí, väčšina nosa a oblasť nad hornou perou okrem *philtra*. Zvyšné oblasti tváre, ako zvyšok čela, očné, spánky, špička nosa, *philtrum*, líca, spodná pera a brada sa nachádzajú v odtieňoch svetlozelenej farby, ktorá ukazuje hodnotu predikčnej chyby 1–2,5 mm. Najväčšia predikčná chyba siaha až po hodnotu 3,5 mm a nachádza sa jemne po celom obvode tváre.

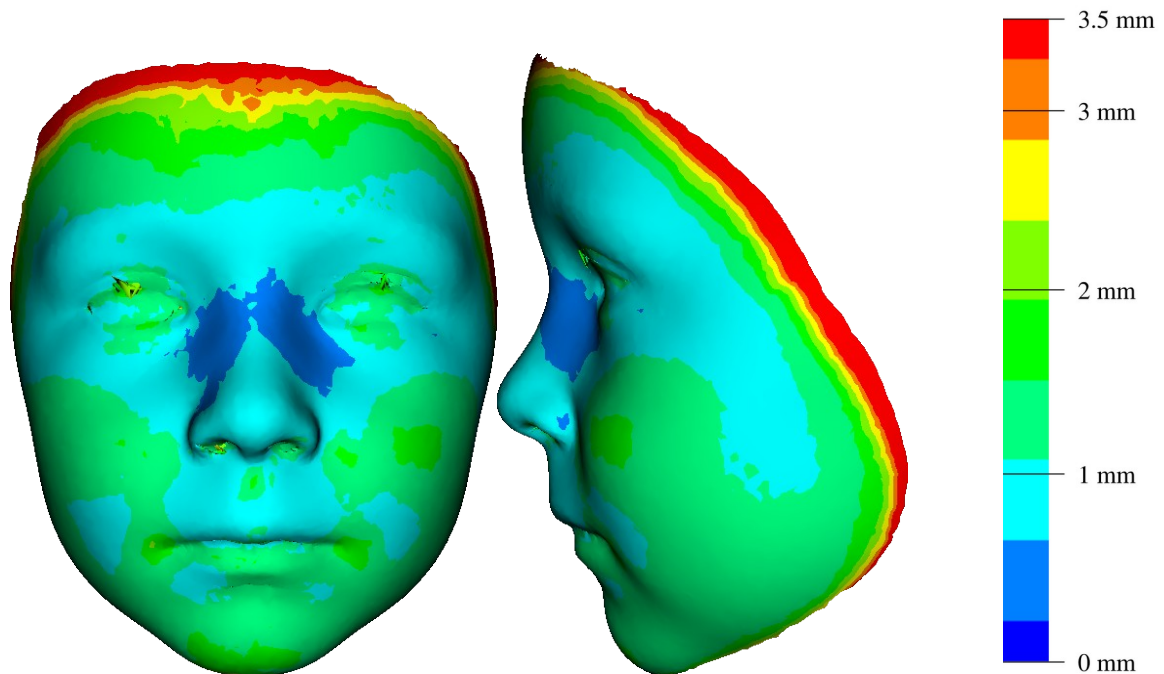
7.1.3. Predikčný model u dievčat v 12–15 rokoch



Obr. 9. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u dievčat v 15 rokoch

Priemerná predikčná chyba u dievčat je 1,798 mm, medián 1,094 mm. Vizualizovaná na farebnej mape na Obr. 9. Najmenšia predikčná chyba modrej farby je viditeľná na laterálnej strane koreňi a chrbta nosa, predstavuje hodnotu 0–0,5 mm. Nasleduje oblasť strednej tváre, ktorá je vizualizovaná svetlotyrkysovou farbou a jej hodnota je v rozpätí približne 0,5–1 mm. Patrí sem spodná polovica čela, *glabella*, koreň a chrbát nosa, vnútorne a vonkajšie kútiky očí, časť zygomatickej oblasti a mierne aj pod nosom. Zvyšok tváre tvoria odtiene svetlozelenej farby, ktorá obkolesuje vyššie zmienené oblasti a taktiež zasahuje očnice, špičku nosa, väčšiu časť *philtru*, líca, pery, a bradu. Najväčšia predikčná chyba (3,5 mm) červenej farby je viditeľná po celom obvode tváre, nasledovaná oranžovou farbou s veľkosťou okolo 3 mm, lokálne sa nachádza na najviac dopredu vystupujúcej časti brady. Obkružená žltou farbou, ktorá taktiež lemuje obvod tváre.

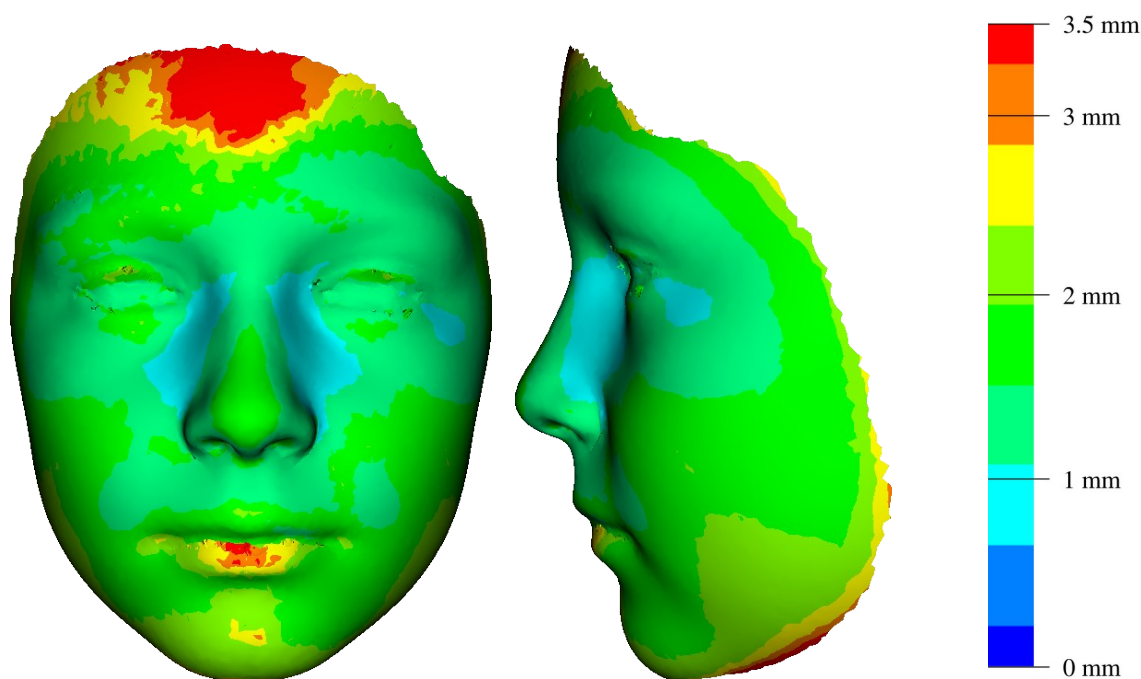
7.1.4. Predikčný model u chlapcov v 3–5 rokoch



Obr. 10. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u chlapcov v 5 rokoch

Priemerná predikčná chyba u chlapcov v tomto vekovom období je 1,718 mm, medián 1,0786 mm. Najmenšia predikčná chyba modrej farby je dobre viditeľná v strednej oblasti tváre na koreni nosa, zasahujúc na chrbát a laterálne oblasti nosa vrátane vnútorných kútikov očí, a ojedinele nosné krídla. Predikčná chyba vo veľkosti 0,5–1 mm svetlotyrkysovej farby je zrejماً v dolnej oblasti čela plynulo cez nadočnicové oblúky ku hranici horného očného viečka, *glabelly*, vonkajších kútikov očí, taktiež pokračuje cez spánkovú oblasť až pod dolné očné viečka, kde zaberá hornú tretinu líc. Ďalej zasahuje spodnú polovicu a krídla nosa, oblasť *philtra*, hornej pery, a na spodnom okraji červene dolnej pery, lokálne aj v oblasti za kútikmi úst, a v oblasti mentolabiálnej ryhy. Svetlozelené oblasti majú hodnotu predikčnej chyby 1–2,5 mm, patrí tu väčšina čela, oblasť očných štrbín, líca a brada. Najväčšia chyba 3,5 mm, červenej farby sa nachádza rovnomerne po celom obvode tváre. Oranžová a žltá farba, taktiež pokračujú po celom obvode tváre v jemnej vrstve. Farebná vizualizácia je na Obr. 10.

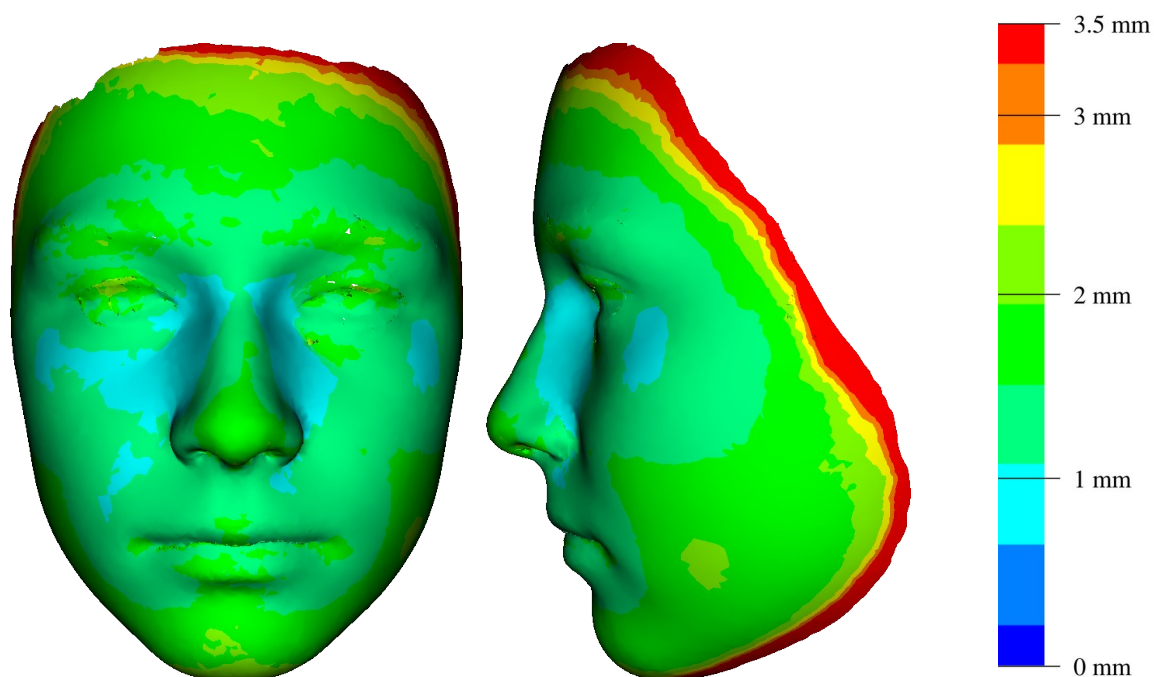
7.1.5. Predikčný model u chlapcov v 7–12 rokoch



Obr. 11. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u chlapcov vo veku 12 rokov

Priemerná predikčná chyba je 1,794 mm a medián je 1,506 mm. Najmenšia viditeľná predikčná chyba na tomto modeli je svetlotyrkysovej farby a nachádza sa po stranách chrbta nosa, vnútorných kútikov očí a na laterálnej strane vonkajšieho kútika oka, má hodnotu 0,5–1 mm. Predikčná chyba o veľkosti 1–2,5 mm v odtieňoch svetlozelenej farby je najrozsiahljšie zastúpená na farebnej mape. Vidíme na Obr. 11. Prechádzajú od spodnej polovice čela cez obočie, oblasť očí, spánkov, líc, koreň, chrbát a špičku nosa cez *philtrum* až na červeň hornej pery pokračujúc na bradu okrem spodnej pery. Najväčšia chyba (3,5 mm) červenej farby sa nachádza v hornej tretine čela v centrálnej oblasti, v strede červene spodnej pery a po dolnom okraji líc a brady. Tieto oblasti sú obkolesené oranžovou a žltou farbou.

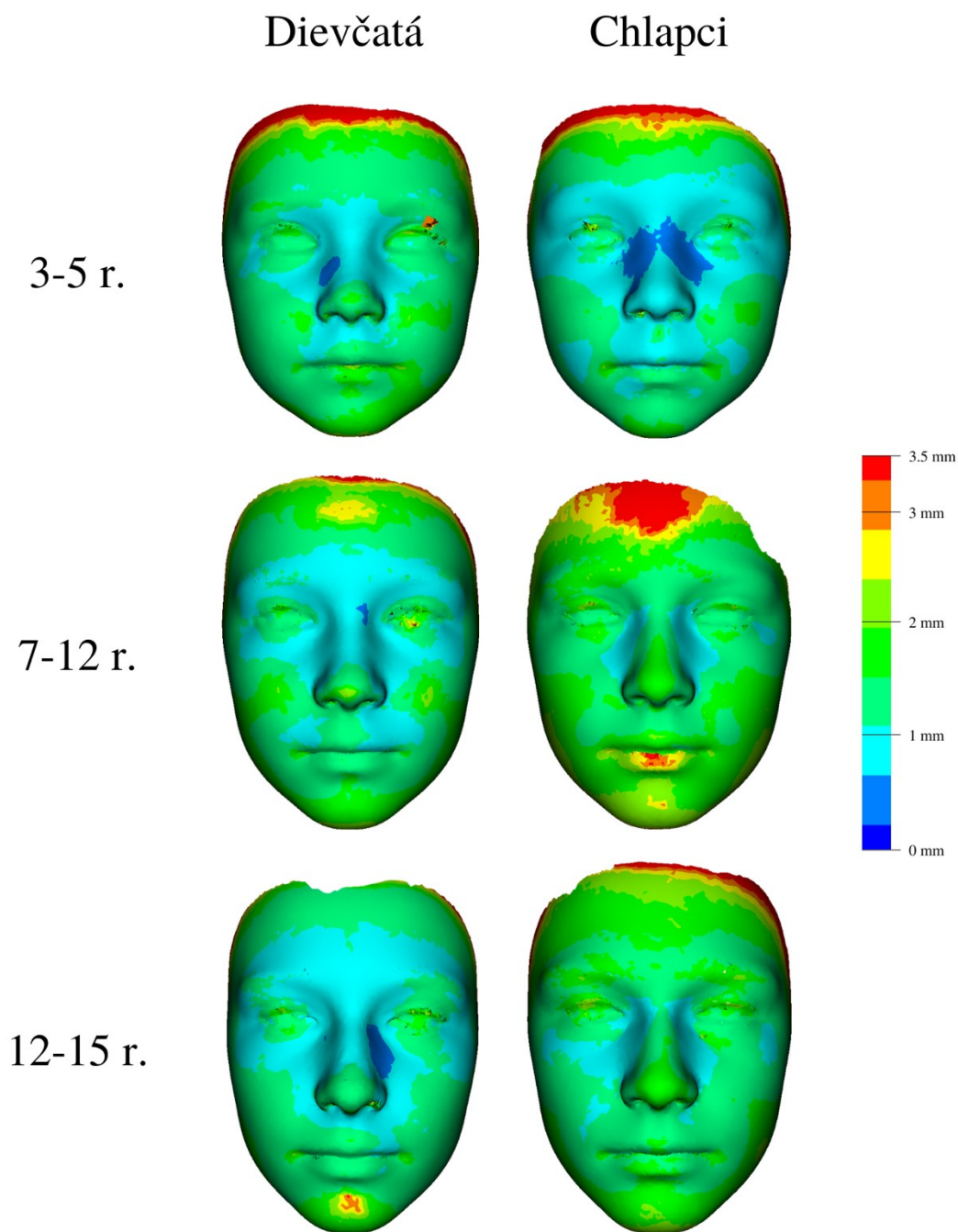
7.1.6. Predikčný model u chlapcov v 12–15 rokoch



Obr. 12. Farebná mapa zobrazujúca priemernú chybu predikcie u chlapcov v 15 rokoch

Priemerná predikčná chyba je 2,024 mm a medián 1,515 mm. Najmenšia predikčná chyba na tomto modeli je zobrazená svetlotyrkysovou farbou o veľkosti 0,5–1 mm dobre je viditeľná po laterálnych stranách koreňa a chrbta nosa, vnútorných kútikoch očí zasahujúcej aj oblasť pod očnicami a jarmové oblasti, lokálne aj vonkajšie kútiky očí či oblasti pod nosom. Zvyšok tváre sa nachádza prevažne v odtieňoch svetlozelenej farby, takmer celé čelo cez obočie, spánkovú oblasť, očnice okrem vnútorných kútikov očí. Oblasť pod spodnými viečkami očí, chrbát, špička a krídla nosa, okolie pod nosom, *philtrum*, oblasť pier, líc a brady. Hodnoty predikčnej chyby sú tu v rozpätí 1–2,5 mm. Najväčšia chyba (3,5 mm) červenej farby je zreteľná a rovnomerne rozložená po celom obvode tváre. Táto línia je jemne nasledovaná odtieňmi oranžovej a žltej farby. Vidíme na Obr. 12.

7.1.7. Porovnanie aktuálneho predikčného modelu vo všetkých vekových kategóriách



Obr. 13. Súhrnný prehľad farebných máp znázorňujúcich priemernú chybu predikcie vo všetkých vekových kategóriách

Grafické znázornenie jednotlivých priemerných predikčných chýb môžeme vidieť na Obr. 13., kde môžeme farebné mapy navzájom porovnať medzi dievčatami a chlapcami,

a zároveň jednotlivými vekovými kategóriami. Farebné mapy predstavujú rozdiely medzi predikovanou a skutočnou tvárou v piatich, dvanástich a pätnástich rokoch. Zaujímá nás hlavne stredná oblasť tváre, ktorá aj vykazuje najmenšiu priemernú chybu predikcie, najviac sa prejavuje v modeloch dievčenských tvarí s výnimkou obdobia 3–5 rokov, kde menšiu priemernú predikčnú chybu nájdeme u chlapčenského modelu tváre. Najväčšia priemerná predikčná chyba sa spravidla nachádza po obvode tváre vo všetkých modeloch. Prehľad jednotlivých hodnôt priemerných predikčných chýb a mediánov sú uvedené v Tabuľke 4.

Tab. 4. Hodnoty jednotlivých priemerných predikčných chýb a mediánu

	Dievčatá		Chlapci	
	veľkosť priemernej predikčnej chyby	medián	veľkosť priemernej predikčnej chyby	medián
3–5 rokov	1,922 mm	1,379 mm	1,718 mm	1,0786 mm
7–12 rokov	1,726 mm	1,283 mm	1,794 mm	1,506 mm
12–15 rokov	1,798 mm	1,094 mm	2,024 mm	1,515 mm

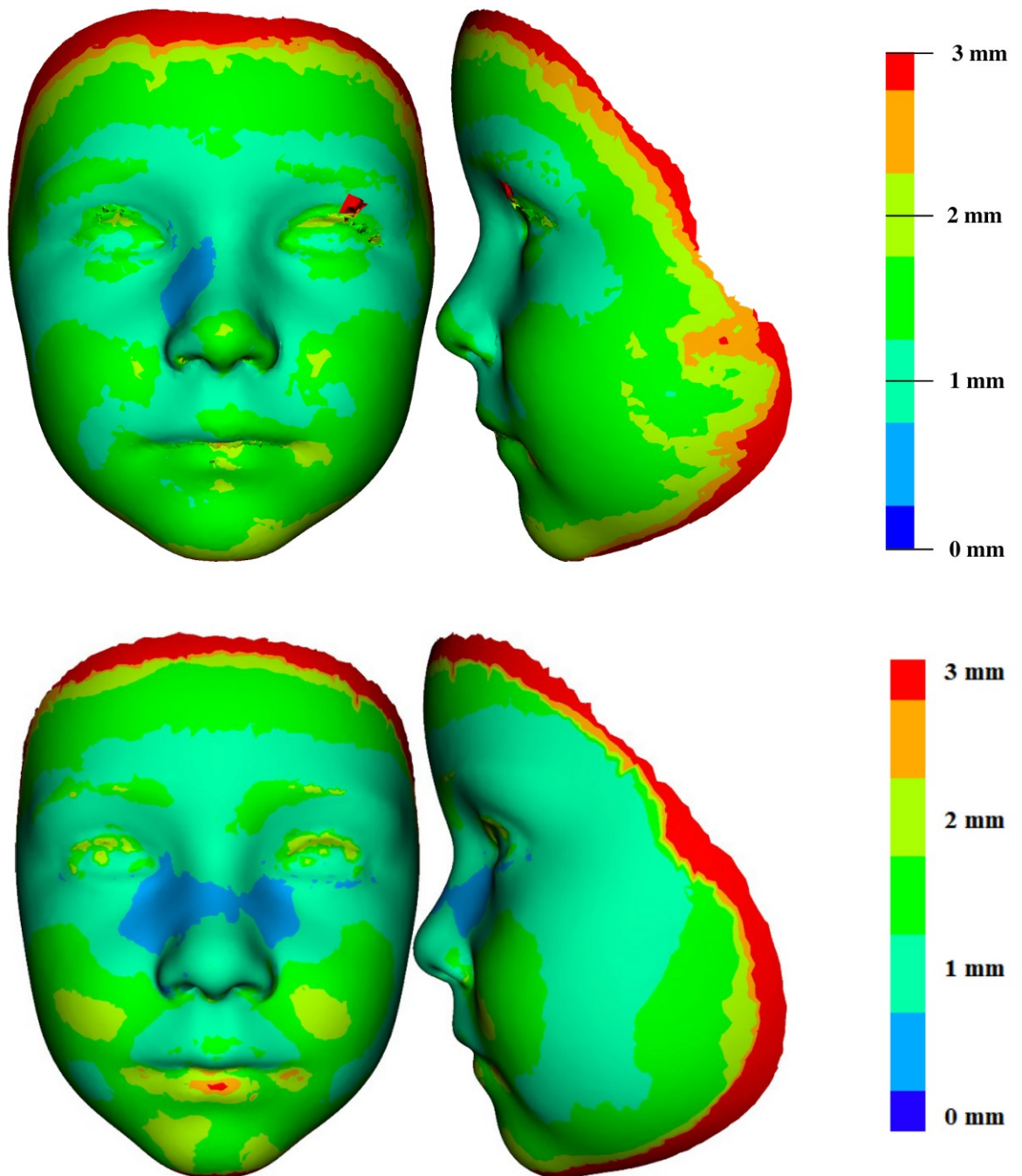
7.2. Porovnanie nového predikčného modelu s predchádzajúcimi štúdiami

Porovnali sme aktuálny rozšírený predikčný model s pôvodným predikčným modelom, ktorý bol publikovaný v predchádzajúcich štúdiách. Rozdielnosti môžeme pozorovať na výsledných farebných mapách jednotlivých modelov, kde je vizualizovaná priemerná predikčná chyba. Farebné škály a stupnice farebných máp sme prispôbili jednotlivým pôvodným modelom, aby bolo možné jednoduchšie a jednoznačné porovnanie aj na základe vizuálneho pozorovania.

7.2.1. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 3–5r.

V porovnaní aktuálneho predikčného modelu s hodnotou priemernej predikčnej chyby 1,922 mm s predchádzajúcim predikčným modelom (Kočandrová 2017) s polovičným počtom jedincov, kde bola predikčná chyba 1,711 mm, nové výsledky vyšli približne asi o 0,2 mm lepšie. Pri porovnávaní výsledných farebných máp (Obr. 14.) sa oblasť najmenšej predikčnej chyby (modrá farba) manifestuje v oblasti nosa, rozsiahlejšie v pôvodnom modeli, kde zasahuje aj chrbát nosa, vnútorne kútiky očí a v náznakoch aj dolný okraj očných viečok. Oproti aktuálnemu modelu vidíme, že aj najväčšia predikčná chyba (červená farba) sa v pôvodnom modeli, nachádza okrem obvodu celej tváre, aj

lokálne na spodnej pere. Zvyšok tváre naplňajú stredné hodnoty priemernej predikčnej chyby. Je zjavné, že obidva modely sú podobné, avšak trochu lepšie vychádza pôvodný model s prislúchajúcou hodnotou priemernej predikčnej chyby.



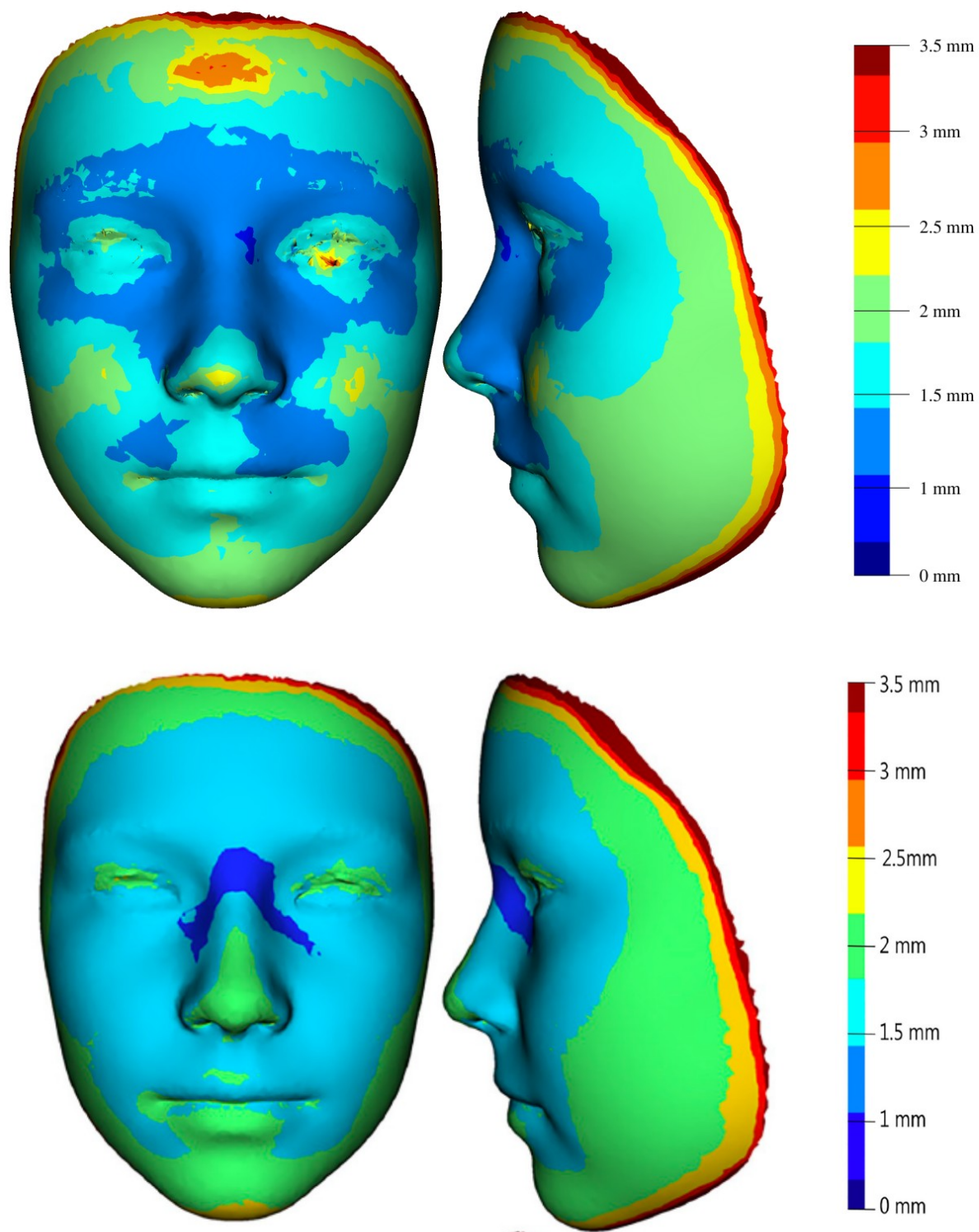
Obr. 14. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) s pôvodným modelom (Kočandrlová 2017) (spodný rad) u dievčat vo veku 5 rokov

7.2.2. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 7–12r.

V aktuálnom modeli má priemerná predikčná chyba hodnotu 1,726 mm, čo vychádza o 0,084 mm lepšie ako v pôvodnom modeli (Koudelová *et al.* 2019) (Obr. 15.), kde priemerná predikčná chyba predstavovala hodnotu 1,81 mm. Najmenšia predikčná chyba (modrá farba) zaberá výrazne väčšiu oblasť v aktuálnom modeli, kde pokrýva strednú oblasť tváre (podrobnejší popis v Tab. 5). V pôvodnom modeli je najmenšia chyba jasne definovaná na *glabelle* až koreni nosa a jeho laterálnych stranách. Oblasť najväčšej priemernej predikčnej chyby sa u oboch modelov nachádza po celom obvode tváre. Z farebných máp je zjavné, že aktuálny model vychádza lepšie síce iba o necelých 0,01 mm, však rozdiel je dobre viditeľný.

Tab. 5. Popis rozdielov v jednotlivých predikčných modeloch u dievčat vo veku 7–12r.

Veľkosť priemernej predikčnej chyby	Najmenšia predikčná chyba 0–1,5 mm	Stredná predikčná chyba 1,5–2,5 mm	Najväčšia predikčná chyba 2,5 mm ≤
aktuálny model 1,726 mm	oblasť strednej časti tváre, väčšina nosa, <i>glabella</i> , nadočnicové oblúky, spodná tretina čela, oblasť okolo očí, lokálne oblasť pod nosom	stredná časť čela, oblasť spánkov, obidve očné, špička nosa, líca, <i>philtrum</i> , časť hornej pery a spodná pery, brada	jemne po celom obvode tváre
pôvodný predikčný model (Koudelová <i>et al.</i> 2019) 1,81 mm	oblasť <i>glabellu</i> , koreňa nosa a jeho laterálne strany	celý zvyšok tváre	jemne po celom obvode tváre



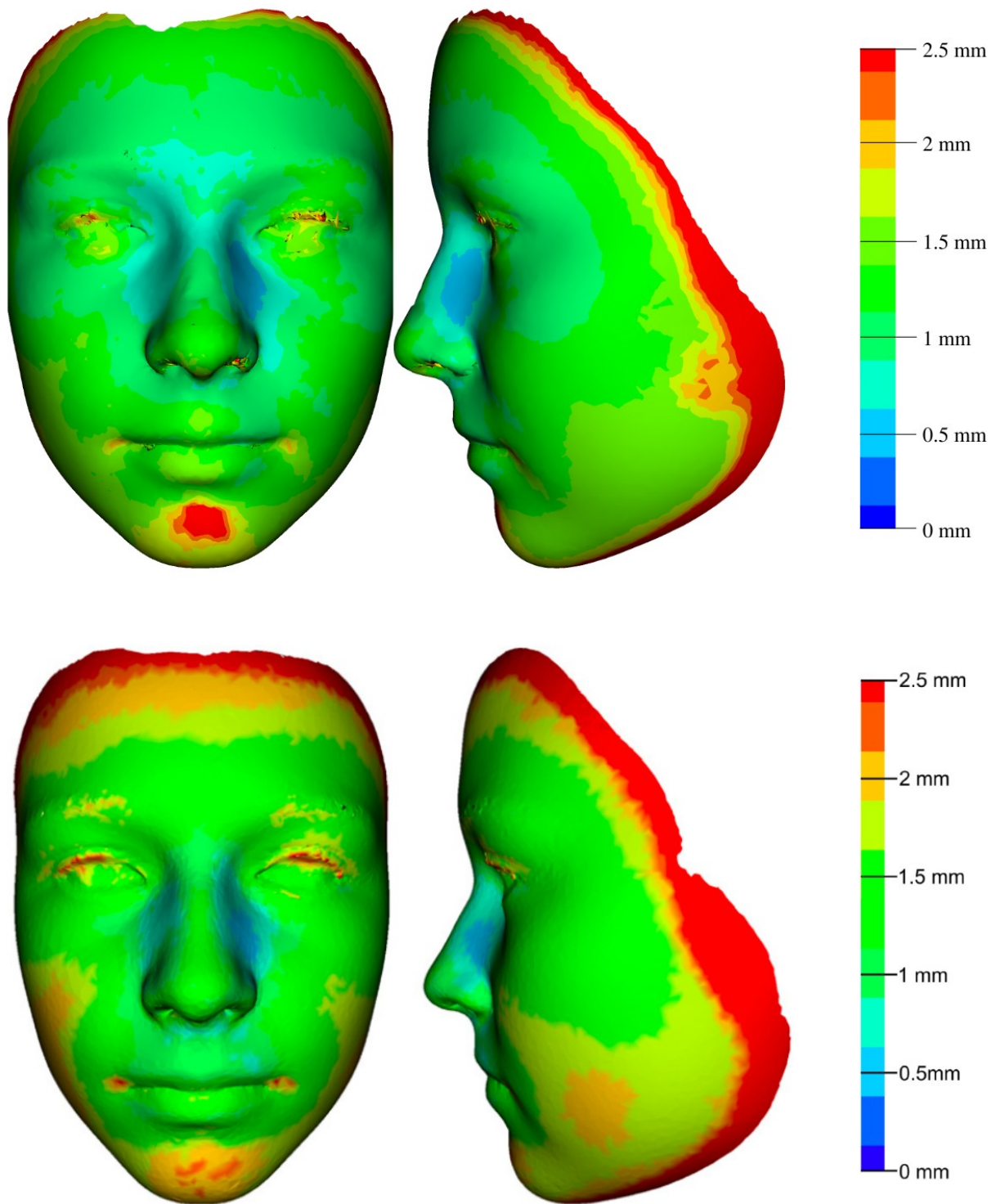
Obr. 15. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) s pôvodným modelom (Koudelová *et al.* 2019) (spodný rad) u dievčat vo veku 12 rokov

7.2.3. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u dievčat vo veku 12–15r.

V aktuálnom modeli má priemerná predikčná chyba hodnotu 1,798 mm v porovnaní s pôvodným modelom podľa (Koudelova *et al.* 2015), kde priemerná predikčná chyba dosiahla hodnotu 1,92 mm. Preto v našom prípade bol predikčný model v tomto veku lepší o 0,122 mm. Oblasť najmenšej priemernej predikčnej chyby sa u oboch modelov nachádza na laterálnej strane nosa. Strednú oblasť tváre nám tvoria prostredné hodnoty priemernej predikčnej chyby. Medzi oblasti s najväčšou chybou patrí celý obvod tváre a lokálne na brade a kútikoch úst, na oboch modeloch s menšími rozdielnosťami, ktoré sú podrobnejšie popísané v Tab 6. Keď sa pozrieme na Obr. 16. môžeme jasne povedať, že obidve farebné mapy týchto predikčných modelov sa podobajú, pričom aktuálny model vychádza o niečo lepšie ako naznačuje aj hodnota priemernej predikčnej chyby. Tu najmenšia a stredná hodnota predikčnej chyby zaberá väčšiu plochu ako v pôvodnom modeli.

Tab. 6. Popis rozdielov v jednotlivých predikčných modeloch u dievčat vo veku 12–15r.

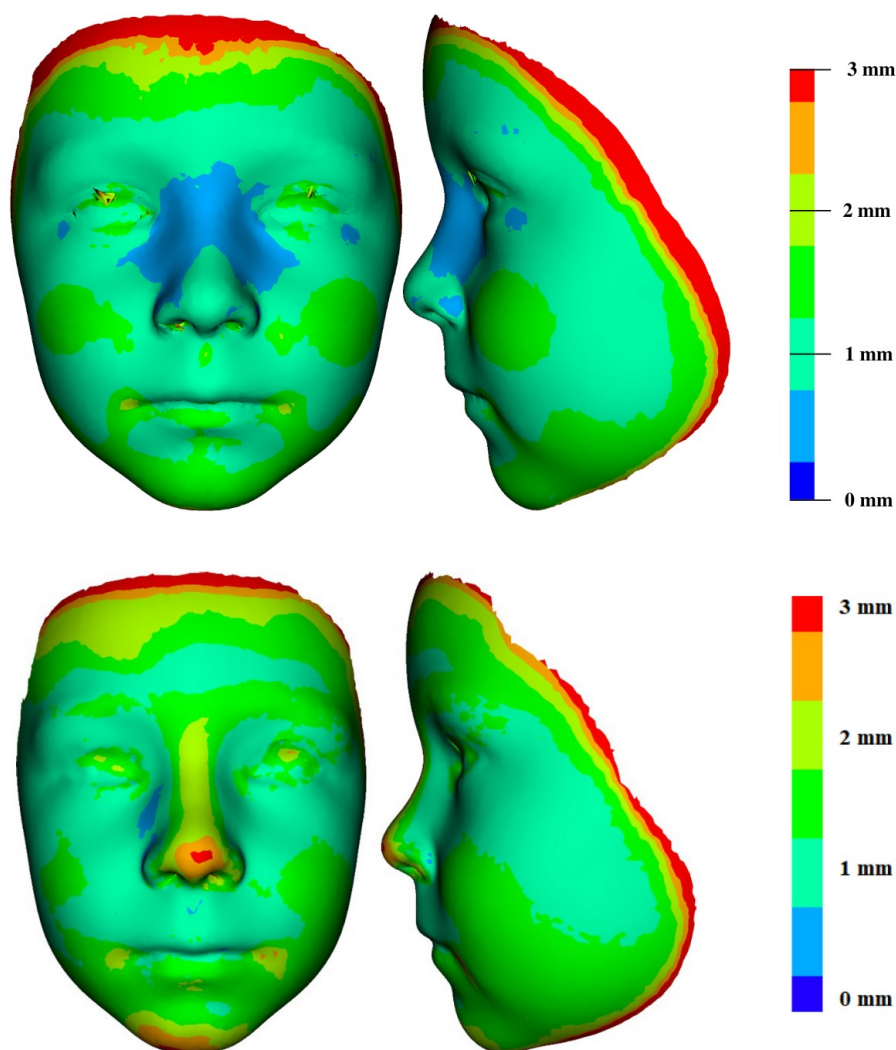
Veľkosť priemernej predikčnej chyby	Najmenšia predikčná chyba 0–1,5 mm	Stredná predikčná chyba 1,5–2,5 mm	Najväčšia predikčná chyba 2,5 mm ≤
aktuálny model 1,798 mm	laterálna oblasť koreňa a chrbta nosa	väčšina plochy tváre okrem centrálnej oblasti brady a obvodu tváre	po celom obvode tváre, v centrálnej oblasti brady, kútiky úst a jemne na horných viečkach očí
pôvodný predikčný model (Koudelova <i>et al.</i> 2015) 1,92 mm	Laterálna oblasť chrbta nosa	dolná polovica čela, oblasť <i>glabelly</i> , spánkov, koreň, chrbát, špička a krídla nosa, oblasť očí okrem horných viečok, zygomatická oblasť, <i>philtrum</i> , pery okrem kútikov úst	po celom obvode tváre vo väčšej miere ako model vyššie, lokálne na horných viečkach očí, kútiky úst, centrálna oblasť brady, spodná oblasť líc



Obr. 16. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) s pôvodným modelom (Koudelova *et al.* 2015) (spodný rad) u dievčat vo veku 15 rokov

7.2.4. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 3–5r.

V aktuálnom predikčnom modeli vyšla priemerná predikčná chyba 1,716 mm, v porovnaní s predchádzajúcim predikčným modelom podľa (Kočandrlová 2017), ktorý vyšiel o 0,117 mm lepšie a to s hodnotou priemernej predikčnej chyby 1,599 mm. Pri porovnaní farebných máp oboch meraní (Obr. 17.), tak paradoxne v aktuálnom predikčnom modeli vidíme výrazne lepšiu centrálna oblasť tváre a tým zároveň aj oblasť najmenej predikčnej chyby znázornenej modrou farbou, zaberá väčšiu plochu a vyskytuje sa v oblasti vnútorných kútikov očí, laterálnych strán nosa, na koreni a chrbte nosa. Kde na pôvodnom predikčnom modeli, najmenšiu predikčnú chybu vidíme iba na jednej strane nosa. Najväčšia predikčná chyba sa v oboch prípadoch nachádza po celom obvode tváre s jednou výnimkou a to na hrote nosa u pôvodného modelu. Zvyšok tváre u obidvoch modelov patrí stredným hodnotám predikčnej chyby.



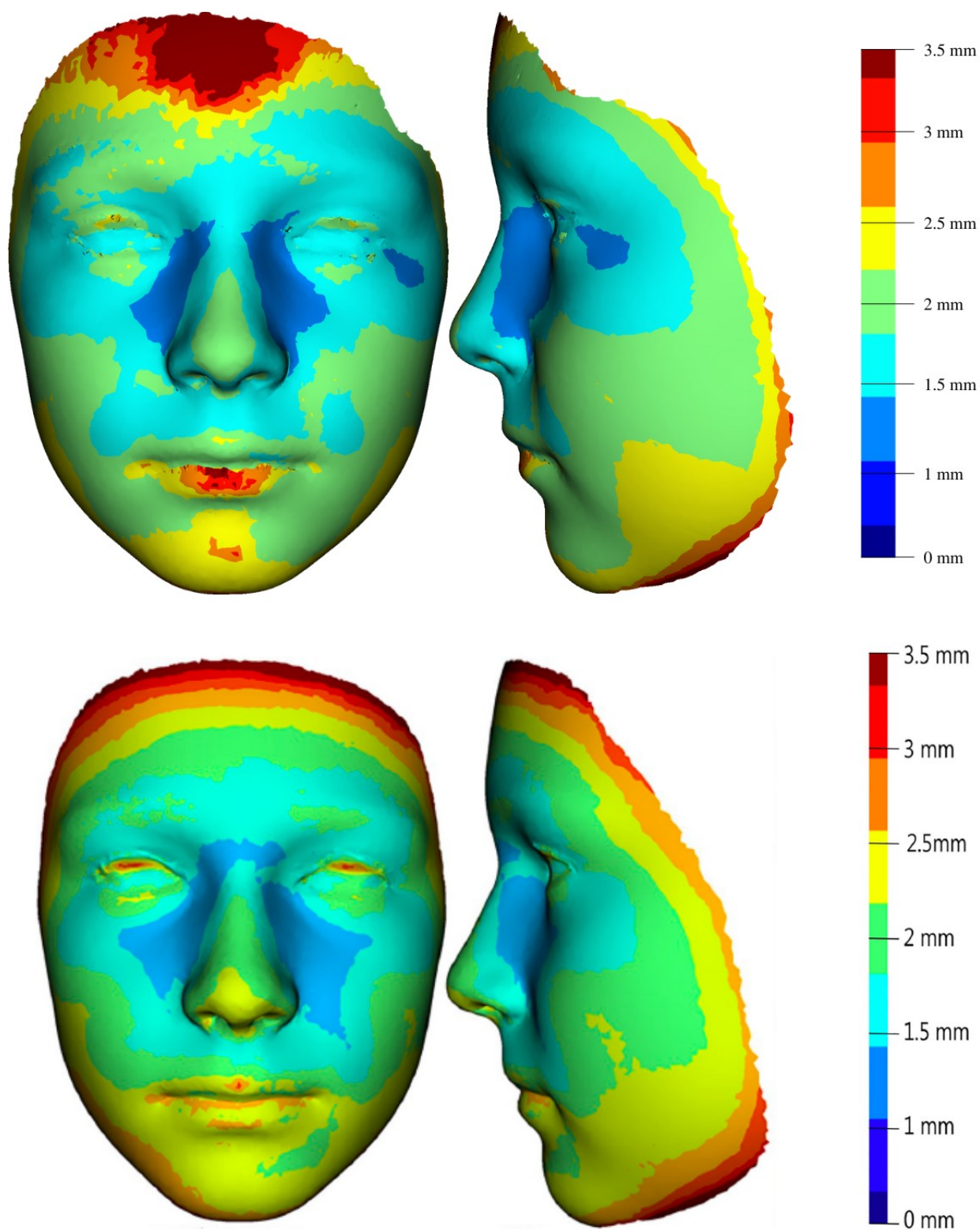
Obr. 17. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) u chlapcov s pôvodným modelom (Kočandrlová 2017) (spodný rad) vo veku 5 rokov

7.2.5. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 7–12r.

V aktuálnom modeli veľkosť priemernej predikčnej chyby dosiahla hodnotu 1,794 mm, čo vychádza o 0,206 mm lepšie ako v pôvodnom predikčnom modeli (Koudelová *et al.* 2019), ktorá má hodnotu 2 mm. Na farebných mapách (Obr. 18.) môžeme pozorovať jednotlivé rozdielnosti, ktoré sú ďalej podrobnejšie popísané v Tab. 7. Obidva modely majú veľmi podobné farebné rozloženie. Oblasť s najmenšou predikčnou chybou je u oboch modelov veľmi podobne umiestnená po bokoch nosa, zasahujúc vnútorné kútiky očí až líca. Oblasť najväčšej predikčnej chyby je mierne výraznejšia v aktuálnom modeli, pretože viac zasahuje do čela a lokálne sa nachádza aj na spodnej pere.

Tab. 7. Popis rozdielov v jednotlivých predikčných modeloch u chlapcov vo veku 7–12r.

Veľkosť priemernej predikčnej chyby	Najmenšia predikčná chyba 0–1,5 mm	Stredná predikčná chyba 1,5–2,5 mm	Najväčšia predikčná chyba 2,5 mm ≤
aktuálny model 1,794 mm	laterálne časti koreňa a chrbta nosa, vnútorné kútiky očí a lokálne aj na vonkajšom kútiku oka	Od dolnej polovice čela cez obočie, oblasť očí, spánkov, líc, nosa až po špičku, <i>philtrum</i> , červeň hornej pery pokračujúc na bradu okrem spodnej pery a centrálnej oblasti brady	centrálna oblasť až horná tretina čela, v strede červene spodnej pery a dolný okraj líc a brady
pôvodný predikčný model (Koudelová <i>et al.</i> 2019) 2 mm	oblasť <i>glabell</i> y, laterálne časti a koreň nosa, zygomatická oblasť	v centrálnej oblasti tváre okrem horných očných viečok a špičky nosa	marginálne oblasti celej tváre, špička nosa, spodná pera a brada



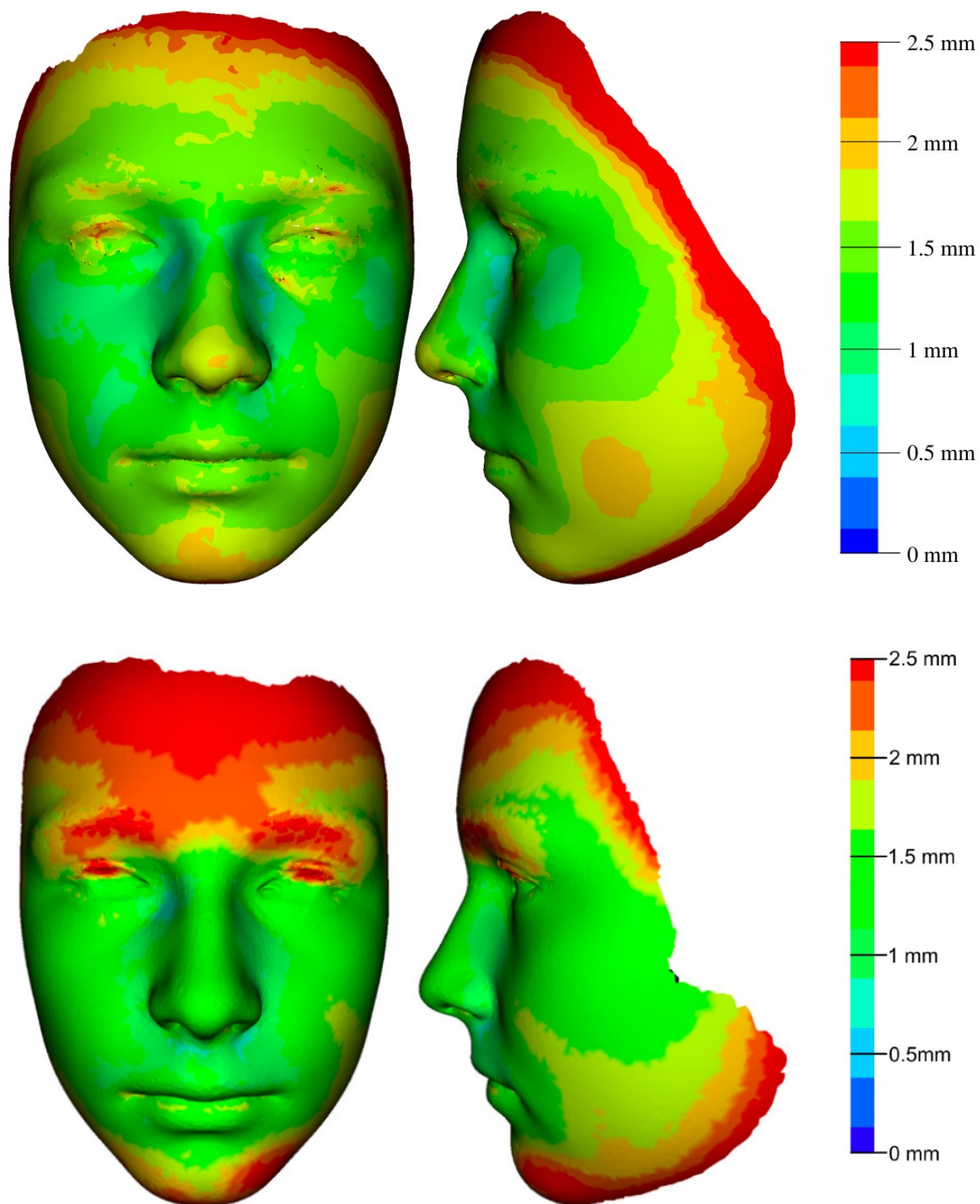
Obr. 18. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) s pôvodným modelom (Koudelová *et al.* 2019) (spodný rad) u chlapcov vo veku 12 rokov

7.2.6. Porovnanie rozšíreného a pôvodného modelu u chlapcov vo veku 12–15r.

V aktuálnom modeli má priemerná predikčná chyba hodnotu 2,024 mm v porovnaní s pôvodným modelom podľa (Koudelova *et al.* 2015), ktorej hodnota vychádza 1,86 mm a tým je lepšia o 0,164 mm. Paradoxne pri pohľade na farebné mapy (Obr. 19.) by sme jednoznačne povedali, že aktuálny predikčný model vyšiel lepšie. Najmenšia predikčná chyba sa nachádza u oboch modelov vo veľmi malej miere na laterálnych stranách nosa. Oblasť najväčšej chyby sa u oboch modelov nachádza po celom obvode tváre, kde však v pôvodnom predikčnom modeli zasahuje oblasť čela, obočia a horných očných viečok. Podrobnejší popis jednotlivých rozdielov je popísaný v Tab. 8.

Tab. 8. Popis rozdielov v jednotlivých predikčných modeloch u chlapcov vo veku 12–15r.

Veľkosť priemernej predikčnej chyby	Najmenšia predikčná chyba 0–1,5 mm	Stredná predikčná chyba 1,5–2,5 mm	Najväčšia predikčná chyba 2,5 mm ≤
aktuálny model 2,024 mm	laterálna oblasť koreňa a chrbta nosa, v náznakoch aj vnútorne kútiky očí	väčšina plochy tváre okrem horných viečok očí, špičky nosa a brady	rovnomerne po celom obvode tváre, jemne horné viečka očí, špička nosa a brada
pôvodný predikčný model (Koudelova <i>et al.</i> 2015) 1,86 mm	lokálne laterálny okraj koreňa nosa a tesne pod nosom	Oblasť spánkov, celý nos, väčšia časť ocníc, zygomatická oblasť, líca, <i>philtrum</i> , pery a horná časť brady	po celom obvode tváre, takmer celé čelo, nadočnicové oblúky zasahujúce horné očné viečka a spodná časť brady

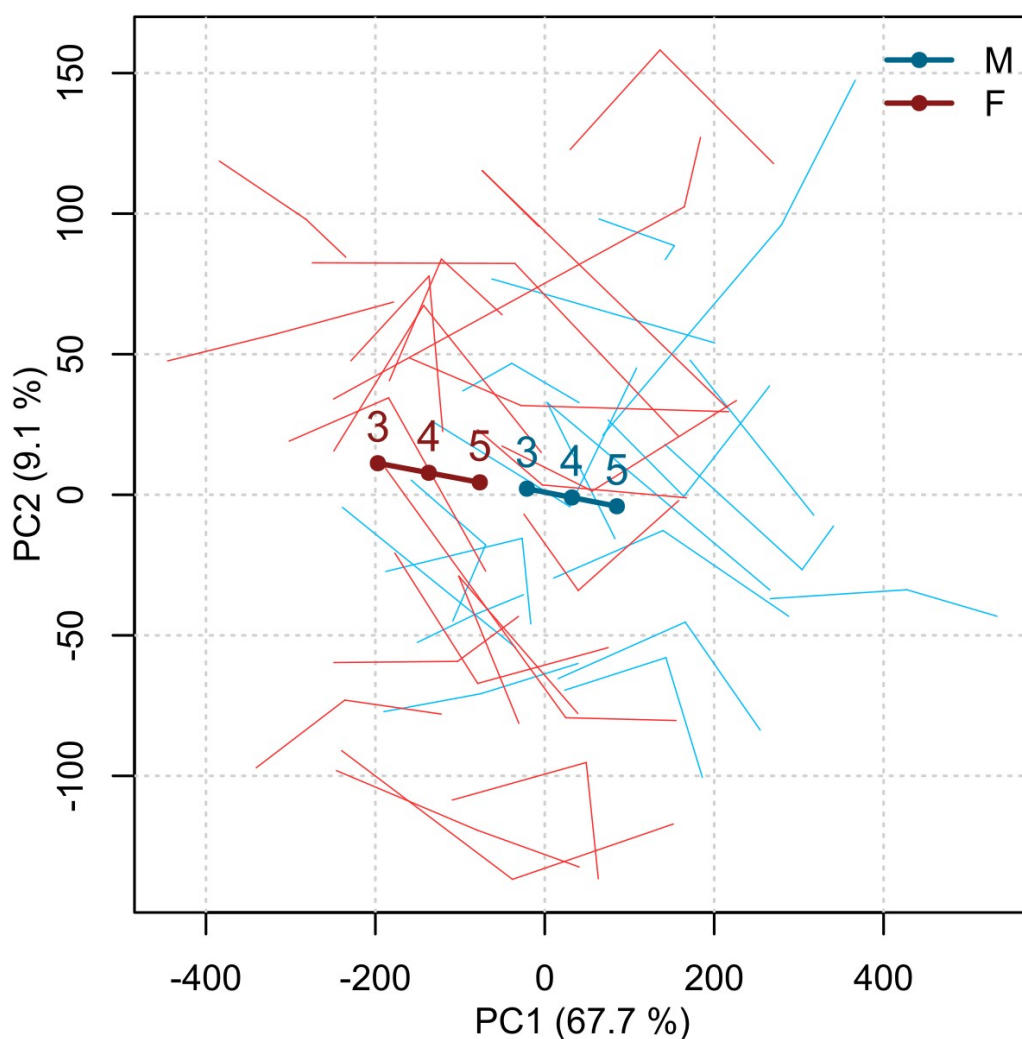


Obr. 19. Porovnanie farebných máp aktuálneho predikčného modelu (horný rad) s pôvodným modelom (Koudelova *et al.* 2015) (spodný rad) u chlapcov vo veku 15 rokov

7.3. Trajektórie rastu

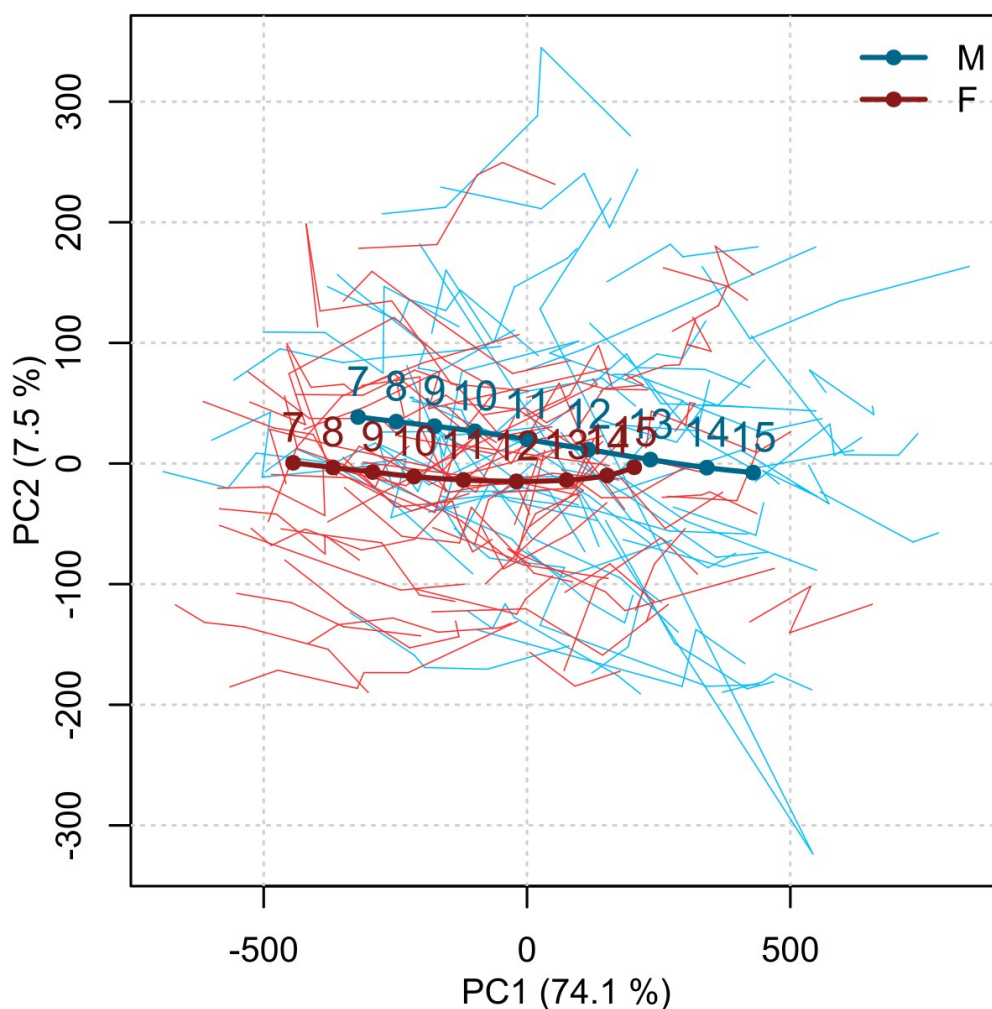
Rastové trajektórie boli skonštruované pre dievčatá a chlapcov v priestore hlavných komponentov (PC 1, PC 2). Pozorujeme trend starnutia medzi vo veku od 3 do 5 rokov a od 7 do 15 rokov. PCA graf rozptylu nájdeme na Obr. 20 a 21.

V mladšej skupine detí od 3 do 5 rokov, prvé dva hlavné komponenty predstavujú viac ako 76,8 % variability vzorky. Prvý hlavný komponent (PC1) vysvetľuje 67,7 % z celkovej variability a predstavuje proces starnutia tváre. V smere ku kladným hodnotám PC1 sa vek zvyšuje a vždy súvisí s veľkosťou tváre, čiže so zvyšujúcim sa vekom rastie aj tvár. Veľmi dobre je viditeľné, že u skupiny chlapcov sú tváre väčšie v porovnaní s dievčenskými Obr. 20. Druhý hlavný komponent (PC2) vysvetľuje 9,1 % z celkovej variability a súvisí so zmenami tvaru tváre konvexita/konkávnosť. Globálna rastová trajektória naznačuje stabilné ročné zmeny od 3 do 5 rokov.



Obr. 20. PCA graf rozptylu (*scatter plot*) čiastkových nezjednodušených rastových trajektórií (tenké čiary) a globálnych rastových trajektórií (hrubé čiary) dievčat a chlapcov od 3 do 5 rokov v priestore hlavných komponentov (PC1, PC2)

V staršej skupine od 7 do 15 rokov, prvé dva hlavné komponenty predstavujú viac ako 81,6% variability vzorky. Prvý hlavný komponent (PC1) vysvetľuje 74,1 % z celkovej variability a predstavuje proces starnutia tváre. V smere ku kladným hodnotám PC1 sa vek zvyšuje. Druhý hlavný komponent (PC2) vysvetľuje 7,5 % z celkovej variability a súvisí so zmenami tvaru tváre konvexita/konkávnosť. Globálna rastová trajektória naznačuje stabilné ročné zmeny od 7 do 10 rokov u dievčat aj u chlapcov. Najvýraznejší nárast u oboch skupín je viditeľný vo veku od 10 do 14 rokov. U dievčat vrchol rastu nastáva medzi 11. a 12. rokov a výraznejší pokles rastu po 14. roku života, kde už tvár tak nerastie, pretože priemerne v 15 rokoch ukončujú svoj celkový rast. U chlapcov sa vrchol rastu prejavuje v období medzi 11. a 13. rokom, po 14. roku sa rast mierne znižoval, ale neukončil, pretože ten pokračuje aj po skúmanom vekovom období.



Obr. 21. PCA graf rozptylu (*scatter plot*) čiastkových nezjednodušených rastových trajektórií (tenké čiary) a globálnych rastových trajektórií (hrubé čiary) dievčat a chlapcov od 7 do 15 rokov v priestore hlavných komponentov (PC1, PC2)

8. Diskusia

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo rozšíriť a overiť predikčný model faciálneho vývoja človeka, ktorý nadväzuje na predchádzajúce longitudinálne štúdie faciálneho vývoja človeka na Katedre antropológie a genetiky človeka, Prírodovedeckej fakulty Karlovej Univerzity. Zaoberala sa ním najmä Jana Koudelová (Koudelová *et al.* 2019; Koudelová *et al.* 2015) u detí českej populácie vo vekovom rozpätí od 7 do 17 rokov, ale aj diplomová práca Karolíny Kočandrlovej (Kočandrlová 2017), ktorá zas obohatila vzorku o kategóriu mladších detí vo veku od 3 do 6 rokov.

Priamo som nadviazala na tieto štúdie, kde bola pôvodná vzorka rozšírená o nových jedincov v troch vekových kategóriách od 3 do 5 rokov, od 7 do 12 rokov a záverečná skupina bola od 12 do 15 rokov. Výnimku tvorilo obdobie 6 rokov a nad 15 rokov, kde sme nemali dostatočný počet jedincov v časových radách, aby sme mohli tento vek zaradiť do analýzy, a to predovšetkým 6 ročné deti sa nachádzajú na hranici predškolského a školského veku, kde niektoré deti už odchádzajú do škôl. Naše dáta pozostávali z 3D skenov tváre dievčat a chlapcov, z ktorých sa vytvorili 3D modely a upravené sa použili na vlastné analýzy v programe Morfome3cs pomocou metód geometrickej morfometrie. Tieto metódy umožňujú analýzu viacrozmerných dát a následnú vizualizáciu výsledkov, v tomto prípade veľkosť priemernej predikčnej chyby do Farebných máp (Krajíček *et al.* 2012; Dupej *et al.* 2014), ktoré vznikli porovnaním predikovaných tvárí s tými reálnymi.

Existuje mnoho verejne prístupných databáz tvárí, ktoré častokrát na výskum a pre potreby forezných umelcov a výskumníkov nepostačujú. Pretože sú zozbierané najmä od mladších osôb v úzkom vekovom rozpätí (Kyllonen a Monson 2020), čo aj ukazuje práve na veľkú výhodu longitudinálnych dát, ktoré my využívame a bežne nie sú dostupné pre svoju časovú a finančnú náročnosť (Hedeker a Gibbons 2006). Pri zhromažďovaní nášho súboru dát prebiehalo fyzické skenovanie tvárí za pomoci optického skenera (Vectra 3D, 3dMD face system), kde ide o úplne neinvazívnu metódu, ktorá nám v rádoch sekúnd vyhotoví 3D obraz skenovanej tváre.

Predikčný model bol vytvorený pre dievčatá a chlapcov zvlášť v každej vekovej kategórii. Vo veku 5 rokov bola veľkosť priemernej predikčnej chyby u dievčat 1,922 mm

a u chlapcov to vyšlo o čosi lepšie s hodnotou 1,718 mm. V nasledujúcom období vo veku 12 rokov dievčatá dosiahli veľkosť priemernej predikčnej chyby 1,726 mm a chlapci 1,794 mm. V najstaršej vekovej kategórii (15 rokov) rovnako môžeme vidieť nižšiu priemernú predikčnú chybu u dievčat s hodnotou 1,798 mm a u chlapcov 2,024 mm. Vo všetkých modeloch sa najväčšia pozorovaná chyba nachádza hlavne po obvode celej tváre, z dôvodu úpravy a orezu modelu. Najmenšia predikčná chyba je v centrálnej oblasti tváre (zahŕňajúc nos a čelo) (Tome *et al.* 2013), ktorá sa z forezného hľadiska, pri rozpoznávaní tváří považuje za najdôležitejšiu oblasť. Je rozsiahlejšia u dievčat než u chlapcov s výnimkou obdobia 3 až 5 rokov. Z toho nám vyplýva, že predikčný model bol úspešnejší u dievčat až na kategóriu najmladších detí.

Medzi ďalšími stanovenými cieľmi bolo porovnanie nového prediktoru s pôvodne publikovaným. Navzájom sa porovnávali veľkosti priemernej predikčnej chyby a ich vizualizácia na farebných mapách. V najmladšej skupine detí vo veku 5 rokov nám v oboch skupinách u dievčat aj chlapcov vyšiel nový prediktor o trochu slabší ako je ten pôvodný. Môže to byť spôsobené inou skladbou jedincov či väčšou chybou merania. Dievčatá s priemernou predikčnou chybou horšou o približne 0,2 mm (1,922 mm aktuálny model, 1,711 mm pôvodný model) (Kočandrlová 2017) porovnanie farebných máp potvrdzuje tento výsledok. U chlapcov bol rozdiel menší, kde priemerná predikčná chyba bola horšia o 1,117 mm (1,716 mm aktuálny model, 1,599 mm pôvodný model), však pri porovnaní farebných máp môžeme vidieť, že aktuálny model má výrazne lepšiu oblasť stredovej časti tváre, ktorá sa vyznačuje najmenšou predikčnou chybou.

U detí vo veku 12 rokov sa nový prediktor v oboch skupinách preukázal ako úspešnejší než v predošlej štúdií (Koudelová *et al.* 2019). U dievčat bola hodnota priemernej predikčnej chyby lepšia o 0,084 mm (1,726 mm aktuálny model, 1,81 mm pôvodný model). Taktiež to mierne môžeme pozorovať aj na farebných mapách. U chlapcov bola hodnota priemernej predikčnej chyby lepšia o 0,206 mm (1,794 mm aktuálny 2 mm pôvodný model). Farebné mapy v tomto prípade majú veľmi podobné farebné rozloženie, ktoré potvrdzuje naše výsledky.

V poslednej skupine detí vo veku 15 rokov sa nový prediktor ukázal ako lepší na dievčenskom modeli a u chlapcov zas ten pôvodný (Koudelova *et al.* 2015). Dievčatá dosiahli o 0,122 mm lepšiu hodnotu priemernej predikčnej chyby (1,798 mm aktuálny model, 1,92 mm pôvodný model). Na farebných mapách zreteľne vidieť rozdiel, že

v aktuálnom modeli je plocha najmenej predikčnej chyby rozsiahlejšia. U chlapcov naopak bola hodnota priemernej predikčnej chyby horšia o 0,164 mm (2,024 mm aktuálny model, 1, 86 mm pôvodný model). Pri pohľade na farebné mapy nám paradoxne ku výsledkom ukazujú, že farebná mapa aktuálneho modelu vyšla lepšie a oblasti najmenej a strednej predikčnej chyby sú rozsiahlejšie než v pôvodnom modeli.

Po celkovom zhodnotení výsledkov, jednotlivé rozdiely priemerných predikčných chýb aktuálneho modelu s tým pôvodným neprekročili viac ako 0,2 mm. Čo môžeme označiť za zanedbateľný rozdiel, keďže sa najväčšie predikčné chyby vo všetkých modeloch objavovali hlavne v marginálnych častiach tváre a ojedinele o oblastiach špičky nosa, spodnej pery či brady. Najmenšie predikčné chyby sú sústredené do stredných oblastí tváre, ktoré sú pre nás dôležité. Našu prvú hypotézu, že nový predikčný model, bude spoľahlivejšie predikovať vek ako ten pôvodný, nemôžem potvrdiť, pretože iba polovica výsledkov bola lepšia. Nejde však o výrazne lepší či horší výsledok, teda môžeme povedať, že nový predikčný model predikuje vek s rovnakou spoľahlivosťou ako ten pôvodný. Predpoklad, že nový prediktor bude presnejšie predikovať vývoj u tváre dievčat sa čiastočne potvrdil, z troch porovnaní práve bol lepší v dvoch, v 12. rokoch o 0,084 mm a v 15. rokoch o 0,122 mm.

Priemerná chyba nášeho predikčného modelu bez ohľadu na vekovú kategóriu nepresiahla 2,1 mm. Podobne to vyšlo aj v prierezovej štúdií Matthews, *et al.* (2018), kde synteticky vytvorili 3D snímky tvárí a porovnali ich so skutočnými longitudinálnymi snímkami tých istých prípadov. Správne bolo predpovedaných 85 % tvárí s presnosťou na tri milimetre.

Tretím cieľom, ktorý sme si stanovili bolo porovnanie rastových trajektórií u dievčat a chlapcov. V mladšej skupine detí vo vekovom úseku od 3 do 5 rokov prebiehali globálne trajektórie pre dievčatá aj chlapcov rovnakým smerom, ale už tam je zjavný pohlavný dimorfizmus vo veľkosti tváre, čo potvrdzuje aj Matthews *et al.* (2018), ktorí naznačujú, že pohlavný dimorfizmus existuje už dlho pred pubertou. V staršej skupine sme u oboch pohlaví pozorovali podobné tempo rastu v období medzi 7. až 10. rokmi. U dievčat rastový vrchol zaznamenaný medzi 11. a 12. rokom a u chlapcov medzi 11. a 13. rokom, čo je v súlade s výsledkami (Koudelová *et al.* 2019). A tým prijímame aj tretiu hypotézu, ktorú sme si stanovili, že rastové trajektórie sa nebudú líšiť od skôr

publikovaných štúdií. Podobne aj Matthews *et al.* (2018) zaznamenali rozdielne vrcholy rastu u dievčat a chlapcov, kde u dievčat k vrcholu rastu dochádzalo od 11 rokov a u chlapcov približne od 12 rokov. Bulygina, *et al.* (2006) dodávajú, že rastové trajektórie dievčat a chlapcov nie sú vždy paralelné, ale prechádzajú určitým stupňom divergencie približne po 12. roku života. Tento odklon sa týka najmä zmeny tvaru tváre než zmenu veľkosti. Mierne v kontraste sú výsledky štúdie Primozic *et al.* (2016), ktorí tvrdia, že množstvo a rýchlosť rastu tváre sa zdá byť podobná počas obdobia 6–12 rokov bez ohľadu na prítomnosť pubertálneho rastového spurtu.

Rozšírenie súboru o nových jedincov, nám overilo a potvrdilo úspešnosť algoritmu predikčného modelu tváre, ktorý môže byť prospešným nástrojom pri používaní vo forenznej, biomedicínskej a iných oblastiach, a taktiež aj základom pre ďalší vývoj metód vekovej progresie založenej na logitudinálnych 3D údajoch. Netreba však zabúdať, že žiadny algoritmus starnutia, bez ohľadu na to, aké parametre zohľadňuje, nemôže predpovedať skutočný vzhľad subjektu s absolútnou presnosťou. Preto všetky predpovede treba považovať za predbežné.

9. Záver

Diplomová práca sa zaoberala overením a rozšírením pôvodného predikčného modelu tváre u ľudí, pri ktorom sme využili už existujúcu databázu 3D faciálnych modelov. Cieľom práce bolo rozšírenie predikčného modelu publikovaného v štúdiu (Koudelová *et al.* 2019), rozšírenie o vekové obdobie 3–5 rokov, ktorým sa zaoberala (Kočandrlová 2017) vo svojej diplomovej práci a porovnať nový prediktor s predchádzajúcimi publikovanými. Ďalším cieľom bolo porovnať rast medzi chlapcami a dievčatami pomocou rastových trajektórií.

V úvode práce sme si stanovili nasledujúce hypotézy:

1. Nový rozšírený predikčný model bude spoľahlivejšie predikovať vek v porovnaní so skôr publikovanými štúdiami.

- Aktuálny predikčný model predikuje tváre približne rovnako dobre ako pôvodný model. V niektorých prípadoch lepšie, u dievčat vo veku 12 rokov a 15 rokov a u chlapcov vo veku 12 rokov. Horšie výsledky ako v pôvodnom modeli vyšli v 5 rokoch u oboch pohlaví a u chlapcov vo veku 15 rokov.
- Jednotlivé hodnoty rozdielov medzi novým a pôvodným predikčným modelom však neprekročili 0,2 mm, čo môžeme považovať za minimálny rozdiel
- Tým pádom, môžeme povedať, že nový predikčný model je rovnako spoľahlivý ako pôvodný.
- Túto hypotézu zamietame.

2. Predpoklad, že nový prediktor bude presnejšie predikovať vývoj tváre u dievčat.

- Ak porovnáme výsledky aktuálneho rozšíreného predikčného modelu vidíme, že u dievčat, je v dvoch prípadoch z troch lepším prediktor než u chlapcov, v 12. a 15. roku.
- Netreba však zabúdať, že sú tam len veľmi malé hodnoty rozdielu medzi dievčatami a chlapcami.
- Táto hypotéza sa potvrdila u skupiny dievčat vo veku 7–12 a 12–15 rokov, nepotvrdila sa vo vekovej kategórii 3–5 rokov, kde vyšiel chlapčenský model lepšie.

3. Predpoklad, že trajektórie rastu sa nebudú líšiť od skôr publikovaných.

- Táto hypotézu sa potvrdila.

10. Zoznam použitej literatúry

Albert, A. Midori, Karl Ricanek, a Eric Patterson (2007). A review of the literature on the aging adult skull and face: Implications for forensic science research and applications. *Forensic Science International*, 172(1): 1–9.

Allanson, J E, O’Hara, a L G Farkas (1993). Anthropometric Craniofacial Pattern Profiles in Down Syndrome. *American Journal of Medical Genetics*, 752: 748–752.

Bishara, Samir, Jean Treder, a Jane Jakobsen (1994). Facial and dental changes in adulthood. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(2): 175–186.

Brons, Sander, Machteld E. van Beusichem, Ewald M. Bronkhorst, et al. (2012). Methods to quantify soft-tissue based facial growth and treatment outcomes in children: A systematic review. *PLoS ONE*, 7(8): 1–10.

Buchanan, Edward P., Amy S. Xue, a Larry H. Hollier (2013). Craniofacial Syndromes. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 134(1).

Bulygina, E., P. Mitteroecker, a L. Aiello (2006). Ontogeny of facial dimorphism and patterns of individual development within one human population. *American Journal of Physical Anthropology*, 131(3): 432–443.

Caplova, Zuzana, Valentina Compassi, Silvio Giancola, et al. (2017). Recognition of children on age-different images: Facial morphology and age-stable features. *Science and Justice*, 57(4): 250–256.

Čaplovičová, Martina, Veronika Moslerová, Ján Dupej, et al. (2018). Modeling age-specific facial development in Williams – Beuren- , Noonan- , and 22q11 . 2 deletion syndromes in cohorts of Czech patients aged 3 – 18 years: A cross-sectional

three-dimensional geometric morphometry analysis of their facial gestalt. *American Journal of Medical Genetics*, Part A(May): 1–10.

Chaconas, S. J., a J. D. Bartroff (1975). Prediction of normal soft tissue facial changes. *Angle Orthodontist*, 45(1): 12–25.

Chandaliya, Praveen Kumar, a Neeta Nain (2022). ChildGAN : Face aging and rejuvenation to find missing children. *Pattern Recognition*, 129, 1–15.

Čihák, Radomír, a Miloš Grim (2001). *Anatomie 1. 2., uprav.* Praha: Grada Publishing.

Deb, Debayan (2018). Longitudinal Study of Child Face Recognition. *2018 International Conference on Biometrics (ICB)*, IEEE: 225–232.

Defraia, E., A. Marinelli, a M. Alarashi (2003). Case report: Orofacial characteristics of Hallermann-Streiff Syndrome. *European Journal of Paediatric Dentistry*, 4(3): 155–158.

Djordjevic, J., M. Jadallah, A. I. Zhurov, A. M. Toma, a S. Richmond (2013). Three-dimensional analysis of facial shape and symmetry in twins using laser surface scanning. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 16(3): 146–160.

Djordjevic, Jelena, Alexei I Zhurov, Stephen Richmond, a Visigen Consortium (2016). Genetic and Environmental Contributions to Facial Morphological Variation : A 3D Population-Based Twin Study. *PLoS ONE*, 1–20.

Dupej, Jan, Václav Krajíček, Jana Velemínská, a Josef Pelikan (2014). Statistical Mesh Shape Analysis with Nonlandmark Nonrigid Registration. *12th Symposium on Geometry Processing*, S. 2–3.

Dylevský, Ivan (2009). *Funkční anatomie. 1. vyd.*, Praha: Grada.

Egger, Bernhard, Stefanie Wuhler, a Grenoble Inp (2020). 3D Morphable Face Models—Past, Present, and Future. *ACM Transactions on Graphics*, 39(5).

Endo, Banri (1965). Distribution of stress and strain produced by the masticatory force. *The Journal of the Anthropological Society of Tokyo*, 73: 123–136.

Enlow, Donald H, Robert E Moyers, a William W Merow (1982). *Handbook of facial growth. 2nd ed.*, Philadelphia: Saunders.

Farkas, L. G. (1996). Accuracy of anthropometric measurements: Past, present, and future. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 33(1): 10–18.

Farkas, L. G., a C. K. Deutsch (1996). Anthropometric determination of craniofacial morphology. *American journal of medical genetics*, 65(1): 1–4.

Farkas, L. G., M. Katic, a Ch. R. Forrest (2002). Age-Related Changes in Anthropometric Measurements in the Craniofacial Regions and in Height in Down's Syndrome. *Journal of Craniofacial Surgery*, 13(5).

Farkas, L. G., M. J. Katic, Ch. R. Forrest, et al. (2005). International anthropometric study of facial morphology in various ethnic groups/races. *Journal of Craniofacial Surgery*, 16(4): 615–646.

Farkas, L. G., J. C. Posnick, a T. M. Hreczko (1992a). Growth Patterns of the Face: A morphometric Study. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 29(4).

(1992b). Growth Patterns in the Orbital Region: A Morphometric Study. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*.

(1992c). Antropometric Growth Study of the Head. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*. 29(4).

Farkas, L. G., J. C. Posnick, T. M. Hreczko, a et al. (1992). Growth patterns of the nasolabial region: A morphometric study. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*.

Ferrario, V, C Sforza, C E Poggio, a J H Schmitz (1998). Facial volume changes during normal human growth and development. *The Anatomical record*, 250(4): 480–487.

Ferrario, VF, C Dellavia, G Serrao, a Ch Sforza (2005). Soft tissue facial angles in Down's syndrome subjects: A three-dimensional non-invasive study. *European Journal of Orthodontics*, 27(4): 355–362.

Ferrario, Virgilio F., Chiarella Sforza, Graziano Serrao, Veronica Ciusa, a Claudia Dellavia (2003). Growth and aging of facial soft tissues: A computerized three-dimensional mesh diagram analysis. *Clinical Anatomy*, 16(5): 420–433.

Flegal, Katherine M. (2005). Epidemiologic aspects of overweight and obesity in the United States B. *Physiology and Behavior*, 86: 599–602.

Fu, Yun, Guodong Guo, a Thomas S. Huang (2010). Age synthesis and estimation via faces: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(11). IEEE: 1955–1976.

Grim, Miloš, Ondřej Naňka, a Ivan Helekal (2017). *Atlas anatomie člověka. 1. vydání*. Praha: Grada.

Gyenis, G. (1994). Rapid Change of Head and Face Measurements in University Students in Hungary. *Anthropologischer Anzeiger; Bericht Uber Die Biologisch-Anthropologische Literatur*, 52(2). Germany: 149–158.

Hartsfield, James, Lorri Ann Morford, a Liliana M Otero (2012). Genetic Factors Affecting Facial Growth. *Orthodontics - Basic Aspects and Clinical Considerations*, 125–152.

Hedeker, Donald, a Robert D Gibbons (2006). *Longitudinal Data Analysis*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Hellman, Milo (1932). An introduction to growth of the human face from infancy to adulthood. *International Journal of Orthodontia, Oral Surgery and Radiography*, 18(8): 777–798.

Hossain, M. G., A. Saw, F. Ohtsuki, P. E. Lestrel, a T. Kamarul (2011). Change in Facial Shape in Two Cohorts of Japanese Adult Female Students Twenty Years Apart. *Singapore Medical Journal*, 52(11). Singapore: 818–823.

Hoyme, H. Eugene, Wendy O. Kalberg, Amy J. Elliott, a Jason Blankenship (2016). Updated Clinical Guidelines for Diagnosing Fetal Alcohol Spectrum Disorders. *Pediatrics*, 138(2).

Hudák, Radovan, a David Kachlík (2017). *Memorix anatomie. 4. vydání*. Praha: Triton.

Hutton, Tim J., Bernard F. Buxton, a Peter Hammond (2001). Dense surface point distribution models of the human face. *Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*. MMBIA. IEEE Workshop:,153–160.

Jantz, R. L., a L. M. Jantz (2000). Secular Change in Craniofacial Morphology. *American Journal of Human Biology*, 338: 327–338.

Kau, Chung How, a Stephen Richmond (2008). Three-dimensional analysis of facial morphology surface changes in untreated children from 12 to 14 years of age. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 134(6). American Association of Orthodontists, 751–760.

Kemelmacher-Shlizerman, I., S. Suwajanakorn, a S. Seitz (2014). Illumination-Aware Age Progression. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 3334–3341.

Kesterke, Matthew J, Zachary D Raffensperger, Carrie L Heike, et al. (2016). Using the 3D Facial Norms Database to investigate craniofacial sexual dimorphism in

healthy children, adolescents, and adults. *Biology of Sex Differences*, 1–14.

Kočandrlová, Karolina (2017). Odhad věku dítěte na základě morfologického vývoje obličeje: matematické modelování časových řad 3D faciálních modelů. Praha.

Kočandrlová, Karolina, Ján Dupej, Eva Hoffmannová, a Jana Velemínská (2020). Three-Dimensional Mixed Longitudinal Study of Facial Growth Changes and Variability of Facial Form in Preschool Children Using Stereophotogrammetry. *Orthodontics & Craniofacial Research*, England: 511–519.

Kolar, John C, Elizabeth M Salter, a Seth M Weinberg (2010). Preoperative Craniofacial Dymorphology in Isolated Sagittal Synostosis: A Comprehensive Anthropometric Evaluation. *The Journal of Craniofacial Surgery*, 21(5): 1404–1410.

Koudelová, J., J. Brůžek, V. Cagáňová, V. Krajíček, a J. Velemínská (2015). Development of facial sexual dimorphism in children aged between 12 and 15 years: A three-dimensional longitudinal study. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 18(3): 175–184.

Koudelova, J., J. Dupej, J. Brůžek, a et al. (2015). Modelling of facial growth in Czech children based on longitudinal data: Age progression from 12 to 15 years using 3D surface models. *Forensic Science International*, 248: 33–40.

Koudelová, J., E. Hoffmannová, J. Dupej, a J. Velemínská (2019). Simulation of facial growth based on longitudinal data: Age progression and age regression between 7 and 17 years of age using 3D surface data. *PLoS ONE*, 14(2): 1–16.

Krajíček, V., J. Dupej, J. Velemínská, a J. Pelikán 2(012). Morphometric analysis of mesh asymmetry. *Journal of WSCG*, 20(1): 65–72.

Krimmel, Michael, Martin Breidt, Margit Bacher, et al. (2015). Three-dimensional

normal facial growth from birth to the age of 7 Years. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 136(4): 490e-501e.

Kwon, Young Ho, a Niels da Vitoria Lobo (1999). Age classification from Facial Images. *Computer Vision and Image Understanding*, 74(1): 1–21.

Kyllonen, Kelsey M, a Keith L Monson (2020). Depiction of ethnic facial aging by forensic artists and preliminary assessment of the applicability of facial averages. *Forensic Science International*, 313. Elsevier Ireland Ltd: 110353.

Lampinen, James Michael, Justin T. Miller, a Hedwige Dehon (2011). Depicting the Missing: Prospective and Retrospective Person Memory for Age Progressed Images. *Applied Cognitive Psychology*, 26(2): 167–173.

Lanitis, Andreas, Chris J. Taylor, a Timothy F. Cootes (2002). Toward automatic Simulation of Aging Effects on Face Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(4): 442–455.

Lewyllie, Arianne, Maria Cadenas De Llano-pérula, Anna Verdonck, a Guy Willems (2017). Three-dimensional imaging of soft and hard facial tissues in patients with craniofacial syndromes: a systematic review of methodological quality. *Dentomaxillofac Radiol*, 46: 1–14.

Li, P., Y. Hu, R. He, a Z. Sun (2019). Global and Local Consistent Wavelet-domain Age. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, (c). IEEE: 1–14.

Li, P., Y. Hu, Q. Li, R. He, a Z. Sun (2018). Global and Local Consistent Age Generative Adversarial Networks. *24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, S. 1073–1078.

Li, P., H. Huang, Y. Hu, et al. (2019). UVA: A Universal Variational Framework for Continuous Age Analysis. *Computer Vision and Pattern Recognition*.

Lieberman, Daniel E. (2011). *The Evolution of the Human Head*. Cambridge, Massachusetts; London, England: The Belknap Press Of Harvard University Press.

Little, Anthony C., Benedict C. Jones, Corri Waitt, et al. (2008). Symmetry is related to sexual dimorphism in faces: Data across culture and species. *PLoS ONE*, 3(5): 1–8.

Liu, Lu, Haibo Yu, Shenghui Wang, Lili Wan, a Shanshan Han (2021). Learning shape and texture progression for young child face aging. *Signal Processing: Image Communication*, Elsevier Ltd: 116127.

Liu, S., Y. Sun, D. Zhu, et al. (2017). Face aging with contextual generative adversarial nets. MM 2017 - Proceedings of the 2017 ACM Multimedia Conference, S. 82–90.

Matthews, H., A. Penington, J. Clement, et al. (2018). Estimating age and synthesising growth in children and adolescents using 3D facial prototypes. *Forensic Science International*, 286. Elsevier Ireland Ltd: 61–69.

Matthews, H., A. Penington, R. Hardiman, et al. (2018). Modelling 3D craniofacial growth trajectories for population comparison and classification illustrated using sex-differences. *Scientific Reports*, 8(1): 1–11.

Maulin R. Gandhi (2004). A Method for Automatic Synthesis of Aged Human Facial Images. McGill University.

Mellion, Z. J., R. G. Behrents, a L. Johnston Jr (2013). The pattern of facial skeletal growth and its relationship to various common indexes of maturation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 143(6). American Association of Orthodontists: 845–854.

Meloun, Milan, a Jiří Militký (2004). *Statistická analýza experimentálních dat. Vyd. 2., upr. a rozš.* Praha: Academia.

Möller, M., E. Schaupp, C. Zeyher, A. Godt, a M. Berneburg (2012). Reference values for three-dimensional surface cephalometry in children aged 3–6 years. *Orthodontics & Craniofacial Research*, (1): 103–116.

Mydlová, M., J. Dupej, J. Koudelová, a J. Velemínská (2015). Sexual dimorphism of facial appearance in ageing human adults: A cross-sectional study. *Forensic Science International*, 257: 1–9.

Myronenko, Andriy, a Xubo Song (2010). Point set registration: Coherent point drifts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(12): 2262–2275.

Nanda, R. S., H. Meng, S. Kapila, a J. Goorhuis (1990). Growth changes in the soft tissue facial profile. *the Angle Orthodontist*.

Nute, Spencer J., a James P. Moss (2000). Three-dimensional facial growth studied by optical surface scanning. *Journal of Orthodontics*, 27(1): 31–38.

Park, Unsang, Yiyong Tong, a Anil K. Jain (2010). Age-invariant face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32(5): 947–954.

Pivoňková (2009). *Změny tváře během ontogeneze. Lidský obličej. Vyd. 1., S. 68–69. Praha: Karolinum.*

Prahl-Andersen, B., A. S.W.M.R. Ligthelm-Bakker, E. Wattel, a R. Nanda (1995). Adolescent growth changes in soft tissue profile. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 107(5): 476–483.

Primožic, J., G. Perinetti, L. Contardo, a M. Ovsenik (2016). Facial soft tissue changes during the pre-pubertal and pubertal growth phase: A mixed longitudinal laser-scanning study. *European Journal of Orthodontics*, 39(1): 52–60.

Ramanathan, N, a R Chellappa (2006). Modeling Age Progression in Young Faces. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.

Ramanathan, Narayanan, Rama Chellappa, a Soma Biswas 2(009). Age progression in Human Faces: A Survey. *JVLC*, 1–11.

Richmond, Stephen, Laurence J Howe, Sarah Lewis, Evie Stergiakouli, a Alexei Zhurov (2018). Facial Genetics: A Brief Overview. *Frontiers in Genetics*, 9 (1–21).

Rosas, A., a M. Bastir (2002). Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology*, 117(3): 236–245.

Sadeghianrizi, Akbar, Carl-magnus Forsberg, Claude Marcus, a Göran Dahllöf (2005). Craniofacial development in obese adolescents. *European Journal of Orthodontics*, 27: 550–555.

Sadler, T. W. (2011). *Langmanova lékařská embryologie. 1. české v. Praha: Grada*.

Samal, Ashok, Vanitha Subramani, a David Marx (2007). Analysis of sexual dimorphism in human face. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(6): 453–463.

Scheffler, Christiane (2013). Variable and invariable proportions in the ontogenesis of the human face. *The Journal of Craniofacial Surgery*, 24(1): 237–241.

Schüler, Grit (2007). Head proportion and shape of the head of children between 2 and 7 years - Results of a longitudinal study. *Anthropologischer Anzeiger*, 2: 203–212.

Sforza, Ch., G. Grandi, F. Catti, et al. (2009). Age- and sex-related changes in the soft tissues of the orbital region. *Forensic Science International*, 185(1–3): 115.e1-115.e8.

Sforza, Chi., G. Grandi, M. Binelli, et al. (2010). Age- and sex-related changes in three-dimensional lip morphology. *Forensic Science International*, 200(1–3). Elsevier Ireland Ltd: 182.e1-182.e7.

Shearer, B. M., S. B. Sholts, H. M. Garvin, a S. Wärmländer (2012). Sexual dimorphism in human browridge volume measured from 3D models of dry crania: A new digital morphometrics approach. *Forensic Science International*, 222(1–3): 400.e1-400.e5.

Shu, Xiangbo, Jinhui Tang, Hanjiang Lai, Zhiheng Niu, a Shuicheng Yan (2016). Kinship-Guided Age Progression. *Pattern Recognition*, 59. Elsevier: 156–167.

Shu, Xiangbo, Jinhui Tang, Senior Member, et al. (2017). Personalized Age Progression with Bi-level Aging Dictionary Learning. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8828: 1–14.

Shu, Xiangbo, Guo Sen Xie, Zechao Li, a Jinhui Tang (2016). Age progression: Current technologies and applications. *Neurocomputing*, 208: 249–261.

Slípka, Jaroslav, a Zbyněk Tonar (2019). *Základy embryologie. 2., uprave*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum.

Šmahel, Zbyněk (2001). *Principy, teorie a metody auxologie. 1. vyd.* Praha: Karolinum.

Snodell, S. F., R. S. Nanda, a G. Currier (1993). A longitudinal cephalometric study of transverse and vertical craniofacial growth. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 104(5): 471–483.

Subtelny, J.D. (1959). A logitudinal study of soft tissue facial structures and their profile characteristics, defined in relation to underlying skeletal structures. *American Journal of Orthodontics*, 45(7): 481–507.

Suo, J., X. Chen, a Sh. Shan (2012). A Concatenational Graph Evolution Aging Model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(11): 2083–2096.

Suo, J., S. Zhu, Sh. Shan, a X. Chen (2010). A Compositional and Dynamic Model for Face Aging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(3): 385–401.

Tazoe, Y., H. Gohara, a et al. (2012). Facial aging simulator considering geometry and patch-tiled texture.

Terrazas, K., J. Dixon, P. Trainor, a M. Dixon (2017). Rare syndromes of the head and face: mandibulofacial and acrofacial dysostoses. *WIREs Developmental Biology*, 6(3): 1–16.

Tiddeman, Bernard, a Michael Burt (2001). Prototyping and Transforming Facial Textures for Perception Research. *IEEE Computer and Graphics Applications*, 21(5): 42–50.

Todd, James T., a Leonard S. Mark (1980). The Perception of Human Growth. *Scientific American*, 242(2): 132–144.

Toma, AM, A Zhurov, R Playle, a S Richmond (2008). A three-dimensional look for facial differences between males and females in a British-Caucasian sample aged 15½ years old. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 11(3): 180–185.

Tome, Pedro, Julian Fierrez, Ruben Vera-Rodriguez, a Daniel Ramos (2013). Identification using face regions: Application and assessment in forensic scenarios. *Forensic Science International*, 233(1–3). Elsevier Ireland Ltd: 75–83.

Tutkuvienė, J., C. Cattaneo, Z. Obertová, et al. (2016). Age- and sex-related growth patterns of the craniofacial complex in European children aged 3–6 years. *Annals of*

Human Biology, 43(6): 510–519.

Urbanová, Petra, a Miroslav Kralik (2009). *Appendix. Kvantitativní popis tvaru pomocí metod geometrické morfometrie. V Čas lovců: Aktualizované dějiny paleolitu.* S. 277–290. Nadace Universitas - Akademické nakladatelství CERM.

Vacek, Zdeněk (2006). *Embryologie. I. vyd.* Praha: Grada.

www.missingchildreneurope.eu

Wang, Wei, Zhen Cui, Yan Yan, et al. (2016). Recurrent Face Aging. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 2378–2386.

Wang, Z., X. Tang, W. Luo, a S. Gao (2018). Face Aging with Identity–Preserved Conditional Generative Adversarial Networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 7939–7947.

Ward, R. E., P. L. Jamison, a J. E. Allanson (2000). Quantitative Approach to Identifying Abnormal Variation in the Human Face Exemplified by a Study of 278 Individuals With Five Craniofacial Syndromes. *American Journal of Medical Genetics*, 17: 8–17.

Weinberg, Seth M., E. J. Leslie, J. T. Hecht, a G. L. Wehby (2016). Hypertelorism and Orofacial Clefting Revisited: An Anthropometric Investigation. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*.

Weinberg, Seth M., Z. D. Raffensperger, M. J. Kesterke, C. L. Heike, a M. L. Cunningham (2015). The 3D Facial Norms Database: Part 1 . A Web-Based Craniofacial Anthropometric and Image Repository for the Clinical and Research Community. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*.

Weinberg, Seth M. (2019). 3D stereophotogrammetry versus traditional craniofacial

anthropometry: Comparing measurements from the 3D facial norms database to Farkas's North American norms. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 155(5). American Association of Orthodontists, 693–701.

White, J. E., A. F. Ayoub, et al. (2004). Three-dimensional facial characteristics of caucasian infants without cleft and correlation with body measurements. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 41(6): 593–602.

Wickström, R. (2007). Effects of Nicotine During Pregnancy: Human and Experimental Evidence. *Current Neuropharmacology*, 213–222.

Yamada, T., Y. Mori, K. Minami, K. Mishima, and Y. Tsukamoto (2002). Three-dimensional analysis of facial morphology in normal Japanese children as control data for cleft surgery. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 39(5): 517–526.

Yang, H., D. Huang, Y. Wang, H. Wang, and Y. Tang (2016). Face Aging Effect Simulation Using Hidden Factor Analysis Joint Sparse Representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(6): 2493–2507.

Yang, Hongyu, Di Huang, Yunhong Wang, and Anil K. Jain (2018). Learning Face Age Progression: A Pyramid Architecture of GANs. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 31–39.

Zankl, A., L. Eberle, L. Molinari, and A. Schinzel (2002). Growth charts for nose length, nasal protrusion, and philtrum length from birth to 97 years. *American Journal of Medical Genetics*, 111(4): 388–391.

Zhang, Z., Y. Song, and H. Qi (2017). Age Progression/Regression by Conditional Adversarial Autoencoder. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 5810–5818.