

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Antropologie a genetika člověka



Bc. Barbora Musilová

Odhad pohlaví lebky podle povrchu exokrania s využitím CT
skenů

Sex assessment of skull using exocranial meshes from CT scans.

Diplomová práce

Školitel

Doc. RNDr. Jaroslav Brůžek Ph.D.

Praha 2015

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, 4.5.2015

.....

Poděkování

Nejprve bych ráda poděkovala svému školiteli Doc. RNDr. Jaroslavu Brůžkovi Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky a vstřícný přístup. Dále velké díky patří konzultantům Mgr. Jánů Dupejovi a RNDr. Janě Velemínské Ph.D. za odbornou pomoc v oblasti 3D analýzy; a kolektivu 3D laboratoře zobrazovacích metod za ochotu a milé pracovní prostředí. V neposlední řadě pak patří poděkování mé rodině a přátelům za neustálou podporu.

Abstrakt

Diplomová práce vychází metodologicky ze studie Abdel Fatah et al. (2014), kterou rozvíjí a modifikuje. Tato metoda za použití exokraniálních a endokraniálních povrchových sítí lebek dosáhla vysoké úspěšnosti klasifikace pohlaví (97 %).

V naší studii jsme využili anonymizovaná CT objemová data lebek současné francouzské populace, ze kterých jsme segmentovali pouze exokraniální povrch. Na takto získaných virtuálních modelech jsme provedli CPD-DCA (Dupej et al., 2014). Analýza hlavních komponent byla provedena ve formě i tvaru (po odškálování velikosti). Celkem bylo analyzováno 104 lebek (51 žen a 53 mužů) ve věkovém rozpětí 18 až 92 let, s průměrným věkem 58 let u žen a 52,46 u mužů. Po využití analýzy Support vector machine (SVM) s radiálním jádrem (a s cross-validací), byla dosažena nejvyšší úspěšnost metody 87,5 % při modelování formy lebky za využití 27 hlavních komponent. Nejpřesnější klasifikace pohlaví na základě pouhého tvaru lebek byla nižší pouze o dvě procenta. V našem případě mohla být úspěšnost negativně ovlivněna vysokým věkem testovaných jedinců, protože míra pohlavního dimorfismu se se zvyšujícím věkem snižuje (Wells et al., 2007), nebo rozdílnou mírou pohlavního dimorfismu v populaci (např. Brůžek a Murail, 2006, Walker et al., 2008). Dalším, a to nejvíce pravděpodobným důvodem, proč Abdel Fatah s kolegy dosáhli vyšší úspěšnosti predikce pohlaví, je pravděpodobné odstranění endokrania. Bylo ověřeno, že právě tloušťka lebečních kostí je vysoce pohlavně dimorfní (Lynnerup et al, 2005, Ross et al., 2010, Abdel Fatah et al., 2014). Navzdory tomu, je obecně vzato námi prezentovaná metoda využitelnější, neboť není závislá pouze na velkoobjemových datech z počítačové tomografie, ale je aplikovatelná i na data snímaná dostupnějšími povrchovými skenery.

Klíčová slova

Odhad pohlaví, lebka, exokranium, biologická identifikace, 3D metoda, CT, sken, forenzní antropologie, bioarcheologie, geometrická morfometrie

Abstract

Sex estimation is a challenging problem in both forensic anthropology and bioarchaeology. Sexual dimorphism is most noticeably displayed by the pelvis; however in instances when it is not preserved, sex is estimated by skull. There is a multitude of approaches that use the skull, however, their population specificity and variable sexual dimorphism oscillation reduces their effectiveness (Bruzek and Murail, 2006). We base our contribution on the study by Abdel Fatah et al. (2014) that estimates sex based on exocranial and endocranial surfaces with a high success rate of 97%.

Our approach uses anonymized CT scans of skulls from recent french population, from which the exocranial surface was segmented. On these surfaces, CPD-DCA (Dupej et al., 2014) was performed. We analyzed both form and shape (form after size normalization) of these surfaces in 104 skulls (53 males, 51 females) aged 18 to 92 years. The mean age was 58 years in females and 52.46 years in males. Classification was performed using support vector machines (SVM) with a radial kernel. Leave-one-out crossvalidation was also applied. The highest success rate (87.5 %) was achieved with the first 27 principal components of form. Classification of shape was less accurate by only 2 %. Even though our success rate was lower than that of Abdel Fatah et al. (2014), we believe our method is useful for sex estimation. Our success rate may have been reduced by the high age of studied specimens, considering the sexually dimorphic traits diminish with age (Wells et al., 2007). Another possible reason for the lower accuracy is the absence of endocranium in our model, because vault thickness is considered as highly dimorphic trait (Lynnerup et al, 2005, Ross et al., 2010, Abdel Fatah et al., 2014). On the other hand, disregarding endocranium makes our approach applicable to surface scans, as well.

Key words

Sex estimation, skull, exocranium, biological identification, 3D method, CT, scan, forensic anthropology, bioarcheology, geometric morphometry

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	TEORETICKÁ ČÁST	2
2.1	Biologický profil - určení parametrů velké čtyřky	2
2.1.1	Odhad věku	2
2.1.2	Populační specifita	4
2.1.3	Tělesná výška.....	5
2.2	Pohlavní dimorfismus	6
2.2.1	Pohlavní dimorfismus pánve a postkraniálního skeletu	6
2.2.2	Pohlavní dimorfismus krania	8
2.3	Metody odhadu pohlaví na lebce	13
2.3.1	Odhad pohlaví.....	13
2.3.1.1	Odhad pohlaví u nedospělého jedince	13
2.3.2	Využitelnost metody	13
2.3.3	Morfoskopické metody odhadu pohlaví lebky	14
2.3.4	Morfometrické metody odhadu pohlaví lebky.....	16
2.3.4.1	FORDISC	17
2.3.5	3D zobrazovací metody odhadu pohlaví lebky.....	18
3	CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY	23
4	PRAKTICKÁ ČÁST	24
4.1	Materiál.....	24
4.2	Metody	25
4.2.1	Úprava dat.....	25
4.2.2	Geometrická morfometrie.....	28
4.2.2.1	Coherent Point Drift/Dense Correspondence Analýza (CPD/DCA).....	29
4.2.2.2	Analýza hlavních komponent (PCA).....	30
4.2.2.3	Klasifikátor Support vector machine (SVM) s radiálním jádrem	30
4.2.2.4	Crossvalidace dat.....	31
5	VÝSLEDKY	32
5.1	Analýza hlavních komponent (PCA).....	32
5.1.1	Hodnocení analýzy tvaru	33
5.1.1.1	Vizualizace prvních čtyř hlavních komponent	43
5.1.2	Hodnocení analýzy formy.....	45
5.1.2.1	Vizualizace prvních čtyř hlavních komponent	54
5.2	Hodnocení pohlavního dimorfismu	56
5.2.1	Hodnocení pohlavního dimorfismu tvaru	56
5.2.2	Hodnocení pohlavního dimorfismu formy	59
5.3	Úspěšnost predikce pohlaví podle povrchu exokrania	63
6	DISKUSE.....	65
7	ZÁVĚR	68
8	POUŽITÁ LITERATURA	70

1 ÚVOD

Při nálezů kosterního materiálu je z hlediska forenzní antropologie i bioarcheologie nezbytná jeho identifikace. K tomu slouží takzvaná biologická velká čtyřka. Ke zkoumaným parametrům patří odhad pohlaví, věku, výšky a populační specifity. Znalost pohlaví jedince je považována za nejdůležitější bod celkové identifikace. Až po stanovení pohlaví je možné pokračovat v určení věku, etnicity a tělesné výšky, protože tyto parametry jsou vázány na pohlaví (Jantz, 2013). Pohlaví se primárně odhaduje podle pánve, která vykazuje nejvyšší míru pohlavního dimorfismu, ovšem pokud není zachována, pohlaví se odhaduje podle lebky. Existuje řada metod a postupů, které využívají lebku. Tyto metody můžeme rozdělit podle typu informace, se kterou pracují na morfoskopické (Ferembach et al., 1979, Buikstra a Ubelaker, 1994, Walrath et al., 2004), morfometrické (např. Ogawa et al., 2013, Ramsthaler et al., 2007, Walker, 2008) a v posledních letech jsou velmi na vzestupu právě 3D metody (např. Bookstein et al., 1999, Kimmerle et al., 2008, Franklin et al., 2013). Současná geometrická morfometrie dosahuje vysoké úspěšnosti v klasifikaci mužských a ženských lebek (např. Abdel Fatah et al., 2014) a představuje zatím nejkomplexnější přístup ve výzkumu pohlavního dimorfismu.

Tato diplomová práce nabízí shrnutí biologického profilování jedince, rozbor projevů pohlavního dimorfismu u člověka a náhled do metodologie odhadu pohlaví podle lebky. V praktické části poté představuje zjednodušený přístup pro predikci pohlaví. Na rozdíl od Abdela Fataha a kolegů (2014) prezentovaná metoda pracuje pouze s exokraniem, tedy s povrchovými sítěmi lebek. Tento způsob umožňuje z praktického hlediska využít povrchové skenery a nahradit tak počítačovou tomografií. Metoda nastínila perspektivní cestu výzkumu, založenou pouze na 3D exokraniálních modelech lebky.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Biologický profil - určení parametrů velké čtyřky

Biologický profil je základní analýza, která se vypracuje při studiu kosterních pozůstatků. Do tohoto profilu spadá odhad pohlaví, kostního věku, etnické příslušnosti a tělesné výšky - tzv. velká čtyřka. Tyto parametry jsou nezbytné k identifikaci jedince ve forenzní antropologii a k správnému zpracování dat v bioarcheologii (Krogman a Iscan, 1986, Spradley et al., 2008). Pořadí jednotlivých parametrů není pevně ustanovené. Pro vytvoření biologického profilu ve forenzní antropologii je kladen největší důraz na původ jedince (tzv. americká škola), kdežto evropská biologická či forenzní antropologie upřednostňuje nejprve odhad pohlaví (Guyomarc'h a Brůžek, 2011). Pohlaví je sice populačně specifické, nicméně odhad původu kosterních pozůstatků je značně limitovaný (Brůžek a Murail, 2006). Kulturní či politicky definované skupiny se totiž nemusí vždy shodovat s biologickými parametry (např. Ousley a Jantz, 1996). Navzdory rozdílným cílům forenzní antropologie a bioarcheologie je pro oba tyto vědecké obory nutná vysoká spolehlivost metod, které slouží k vytvoření biologického profilu. Ty se ovšem potýkají s biologickými i metodologickými omezeními, jakými je například míra oscilace pohlavního dimorfismu mezi jednotlivými populacemi (Brůžek a Murail, 2006).

V následujících kapitolách budou stručně představeny tři části biologického profilování. Odhadu pohlaví je poté věnována kapitola 2.3.1.

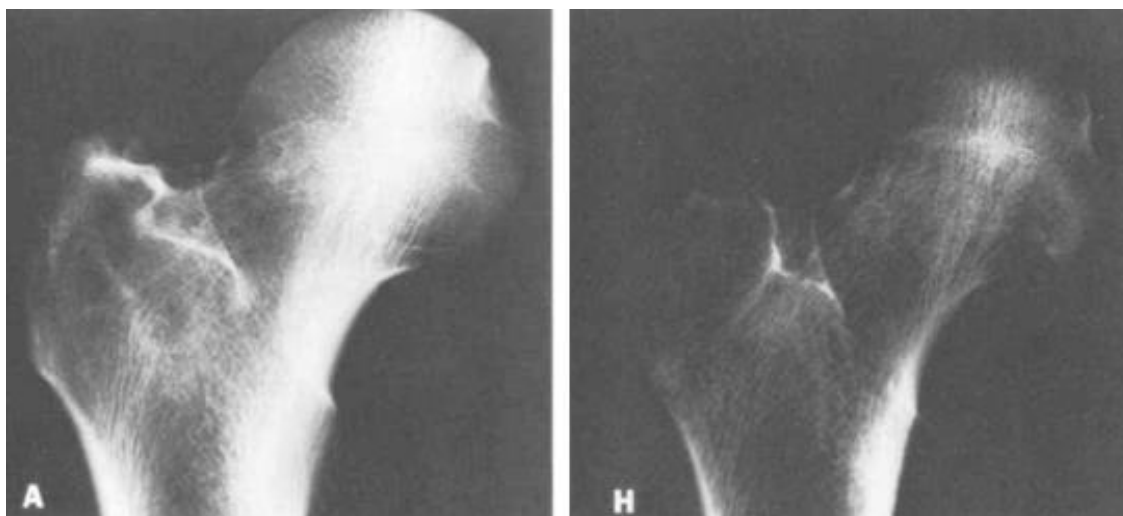
2.1.1 Odhad věku

Za nejdůležitější bod identifikace jedince je považován odhad pohlaví, a to proto, že další parametry velké čtyřky jsou na pohlaví vázané (Jantz, 2013). Zejména metody pro odhad věku jsou velké části spjaté s pohlavím. Do období dospělosti se totiž vývoj mezi pohlavími liší a je třeba rozdílnou růstovou rychlost zohlednit při vytváření metodologie (např. Demirjian et al., 1973, Willems et al., 2001).

Vývoj jedince je silně ovlivňován jak genetickými predispozicemi, tak i vlivem prostředí. Z těchto důvodů musíme mít při odhadu věku na paměti, že dokážeme stanovit pouze takzvaný věk kosterní. Nadměrnou či nepřiměřenou zátěží pohybového aparátu nebo naopak zpomaleným růstem může dojít ke značným odchylkám mezi kalendářním a kosterním věkem (Uhl, 2013). Na kostře se fyziologicky projevují znaky vývojové, které se s postupujícím věkem vytrácí a posléze znaky degenerativní, které po dosažení dospělosti začínají převažovat jako odraz stárnoucích procesů. Věk se proto logicky odhaduje rozdílně u nedospělých a dospělých jedinců.

Věk u nedospělých jedinců se odhaduje nejčastěji podle mineralizace chrupu (Moorrees et al., 1963, Ubelaker 1978, Demirjian et al., 1973, Willems et al., 2001) a podle stupně osifikace jednotlivých kostí (Sheuer et al., 2000). U dospělých jedinců dochází k odhadu věku hodnocením degenerativních změn, které se s přibývajícím věkem projevují výrazněji. Zejména podle morfologie symfýz (Klepinger et al., 1992, Buckberry a Chamberlain, 2002), sternálního konce žeber (Iscan et al., 1984), úbytku spongiózy dlouhých kostí (Obr.1) (Walker a Lovejoy, 1985), obliterace sutur (Meindl a Lovejoy, 1985) a opotřebení chrupu (Kilián, 1981, Vystrčilová a Novotný, 2000).

Věk lze také stanovit podle jiných než morfologických metod, například metricky s využitím rozměrů kostí (Dkhar, 2014, Merritt, 2014), pomocí histologie zkoumáním struktury kostní tkáně (Kerley, 1965, Lee et al., 2014), biochemickou analýzou racemizace aminokyselin (Ritz et al., 1993, Ohtani, 1995) či pomocí molekulárních postupů sledujících zkracování telomer (Tsuiji et al, 2002, Meissner a Ritz-Timme, 2010, Korabečná, 2014).

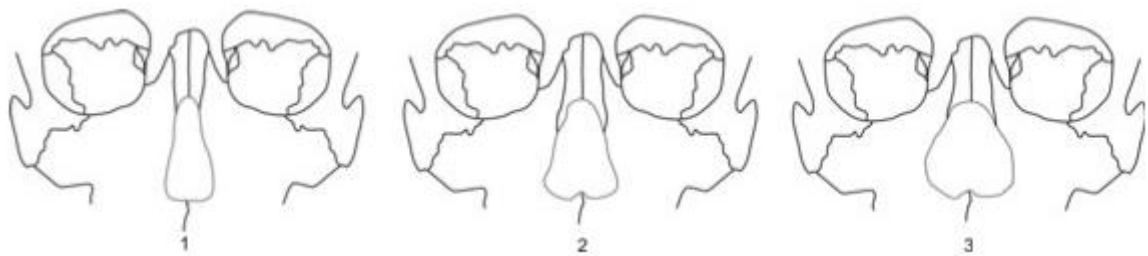


Obr. 1. Úbytek spongiózy femorální hlavice v závislosti na věku. Vlevo stadium A - spongióza vyplňuje většinu hlavice stehenní kosti, věk 18-24 let; vpravo stadium H – trabekuly jsou z velké části resorbovány, věk 60 a více let (upraveno z Walker a Lovejoy, 1985).

2.1.2 Populační specifita

Takzvaná populační specifita či původ jedince, může být chápána jako poněkud kontroverzní oblast výzkumu, nicméně pro forenzní antropology je to jeden z nejdůležitějších ukazatelů a důležitý bod biologické identifikace (DiGangi a Hefner, 2013). Jedná se o informaci o původu jedince a jeho zařazení k populační skupině, charakterizované geografii a kulturou (Konigsberg et al., 2009). Ve forenzní praxi se populační afinita často odhaduje jako první z tzv. velké čtyřky, protože například pohlavní dimorfismus je velmi populačně specifický (Brůžek a Murail, 2006). V praxi by to znamenalo, že kvůli mezipopulační rozdílné velikosti a tvaru by lebka patřící například muži hispánského původu byla chybně určena jako ženská lebka bělošského původu (Spradley et al., 2008). Navíc, znát původ ostatků významně zužuje pátrání v databázi pohřešovaných osob a urychluje úspěšnou identifikaci jedince (Ross et al., 2010). Odhad původu se tedy stává nezbytným, byť náročným úkolem obzvláště při současné míře globalizace (Brůžek a Murail, 2006).

Původ jedince můžeme odhadovat pomocí metrických nebo morfoskopických metod. Nejvyžívanějším metrickým programem je Fordisc 3.0, který pracuje na základě diskriminační analýzy měření lebky (Jantz a Ousley, 2005). Nicméně spolehlivého výsledku se dočkáme pouze tehdy, je-li nález víceméně kompletní a v dobrém stavu zachovalosti, a pokud se jedná o jednu z populací obsaženou v databázi programu (Elliott a Collard, 2009). Morfoskopické metody se zaměřují například na tvar a velikost kostí, tvar nosní apertury (Obr. 2), konkavity a konvexity kostí či tvary sutur (Hefner, 2009, Spradley et al., 2008, LAbbé et al., 2011).



Obr. 2. Populačně specifický tvar nosní apertury. 1) úzká, nejčastěji se objevuje u evropské populace, 2) střední se nejčastěji objevuje u jedinců asijského původu, 3) široká, nejvyšší výskyt u africké populace (Hefner, 2009).

2.1.3 Tělesná výška

Důležitým parametrem pro biologickou identifikaci je odhad tělesné výšky. Ta může následně pomoci při odhadu zdravotního stavu, kondice a tělesných rozměrů jedince. Tělesná výška je charakterizována jako relativní poměr genetické složky a vlivu prostředí (Lettre, 2009). Nejvyšší korelaci s výškou vykazují dlouhé kosti dolní a horní končetiny (Trotter a Glesser, 1952). Podle studie Mall a kolegů mají dlouhé kosti ruky spolehlivě vypovídající hodnotu téměř v 95 % případů - jednotlivě hlavice humeru 90,41 %, délka vřetení kosti 89,13 % (Mall et al., 2001). Dále s výškou může podle studií pozitivně korelovat třeba otisk chodidla (Babladi et al., 2014), délka chodidla (Pandey et al., 2014) nebo měření v kraniofaciální oblasti (Krishan, 2008). Pro výpočty výšky jsou nejčastěji využívány regresní rovnice, kde po dosazení naměřených parametrů kosti a regresních koeficientů dojde k vypočtení intervalu tělesné výšky jedince v závislosti na populační specifitě (např. Breitinger a Bach, 1937, Trotter a Glesser, 1952). K odhadu tělesné výšky je možné využít i progresivnějších 3D metod -

odhad z postmortem CT snímků pánve signifikantně koreluje s výškou (Torimitsu et al., 2014).

Všechny tyto složky biologického profilu zpřesňují a zjednodušují identifikaci kosterních pozůstatků ve forenzní praxi. Následující kapitoly budou věnovány rozboru pohlavního dimorfismu, jehož existence je předpokladem pro vznik jakýchkoli metod pro odhad pohlaví.

2.2 Pohlavní dimorfismus

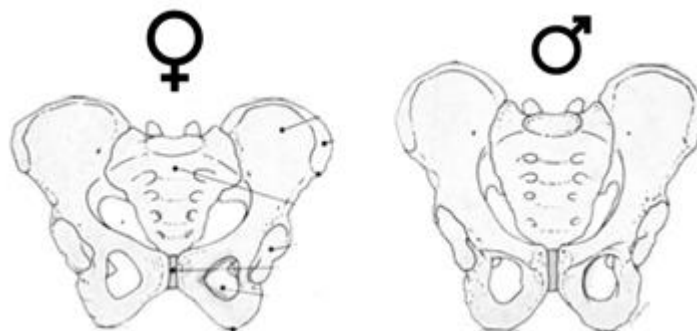
Pohlavním dimorfismem rozumíme veškeré rozdíly mezi samci a samicemi biologického druhu jak ve velikosti těla, tělesných tvarech, rozdílné růstové a vývojové rychlosti a chování. Pohlavní dimorfismus je výsledkem kombinace genetických faktorů a vlivu prostředí (Moore, 2013). Napříč zvířecí říší jsou pohlavní rozdíly velmi běžné a existuje několik příčin, proč tomu tak je. Jedním z nejvýraznějších důvodů je pohlavní výběr a dále pak působí také ekologické faktory (Emlen a Oring, 1977, Slatkin, 1984). Součástí pohlavního výběru je takzvaná samičí volba, která vyprofilovala jisté fenotypové znaky u mužů/samců, a to zejména v oblasti obličeje (Rhodes et al., 2000), těla (Pawlowski a Jasienska, 2005) či hlasu (O'Connor et al., 2014). Samotná existence pohlavního dimorfismu kostry je tedy předpokladem k návrhu jakýchkoli metod pro odhad pohlaví.

2.2.1 Pohlavní dimorfismus pánve a postkraniálního skeletu

U člověka všeobecně platí, že muži jsou vyšší postavy než ženy, mají robustnější kraniální a faciální rozměry, větší objem svalové hmoty, což je spojeno s větší silou a rychlostí. Nicméně jedná se o tvrzení, která mohou být ovlivněna mnoha faktory a v žádném případě je nelze samostatně využít v problematice odhadu pohlaví (Frayer a Wolpoff, 1985). Na kostře se s nejvýraznějšími mezipohlavními rozdíly setkáváme na pánvi (např. Phenice, 1969, Brůžek a Murail, 2006) a lebce (např. Garvin et al., 2014, Spredley a Jantz, 2011). A mnoho dalších prací se zabývá pohlavním dimorfismem postkraniálního skeletu, zmínit můžeme například pohlavní rozdíly pozorované na čéšce (Introna et al., 1998, Bidmos et al., 2005, Mahfouz, 2007), pažní

kosti (Iscan, 1998), stehenní kosti (Mahfouz et al., 2007), hlezenní kosti (Bidmos a Dayal, 2003), holenní kosti (Iscan a Miller-Shaivitz, 1984, Brzobohatá et al., 2015) atp.

Oblast s nejvyšším stupněm pohlavního dimorfismu kostry je pánev. V anatomii pánve se totiž odráží bipedie, která nás odlišuje od ostatních savců (Lovejoy, 1988) a u žen ještě schopnost porodit novorozence s relativně velkou hlavičkou (Tague a Lovejoy, 1986). Mužská pánev je tedy lépe anatomicky přizpůsobena pro lokomoci, kdežto ženská pánev vykazuje adaptační kompromis mezi bipední lokomocí a požadavky porodu (Walrath, 2003). Všeobecně by se dalo říci, že mužská pánev je užší a relativně vyšší oproti ženské pánvi, *incisura ischiadica major* je u mužů uzavřenější a úhel pod pubickou symfýzou je ostřejší (Obr. 3) (Čihák a Grim, 2001). Jedná se tedy o místa se silným pohlavním dimorfismem, která jsou vhodná k vytvoření metody pro odhad pohlaví (např. Novotný, 1986, Brůžek a Murail, 2006).



Obr. 3. Typický příklad pohlavního dimorfismu na pánvi. Vlevo širší a nižší ženská pánev, vpravo vyšší a užší mužská (upraveno z Ferembach et al., 1979).

Jako jednu z velmi využívaných metod můžeme zmínit metodu Evropských doporučení. Ta hodnotí 11 znaků na celé pánvi, kterým je přiřkládán stupeň sexualizace od -2 (hyperfemininní) do +2 (hypermaskulinní). Znaky mají také rozdílnou váhu, která se v celkovém hodnocení bere v potaz a výsledkem je sexualizační index pánve, jehož hodnota vypovídá o odhadu pohlaví (Ferembach et al., 1979).

Další z metod pro odhad pohlaví s relativně vysokou úspěšností je morfoskopická analýza stydké kosti podle Phenice (1969). Tato metoda dichotomicky hodnotí tři znaky. Konkrétně se hodnotí přítomnost ventrálního oblouku, subpubické konkavity a mediálního hřebínku (Phenice, 1969, Lovell, 1989). Přítomnost znaků je

typická pro ženy, naopak u mužů spíše chybí. Metoda byla nezávisle testovaná a úspěšnost odpovídala 94,5 %, byla tedy označena za spolehlivou a vhodnou pro odhad pohlaví (Klales et al., 2012). Ovšem další studie, která se zabývala ověřováním spolehlivosti metody podle Phenice na souboru známého pohlaví, dosáhla úspěšnosti klasifikace pouze 59 % (MacLaughlin a Bruce, 1990).

Tyto předložené metody jsou všeobecně uznávané, nicméně jejich spolehlivost nebyla testována mnohokrát. Studie, Tyto metody mohou být také často ovlivněny zkušenostmi pozorovatele a mohou být značně subjektivní (Brůžek, 2002).

Jednou z metod, která se snaží eliminovat subjektivitu hodnocení je metoda vypracovaná Brůžkem. Ta nabízí variantu trojího skórování a hodnotí ve třech krocích pět kategorií znaků relativně na sobě nezávislých. Bylo zkoumáno 408 dospělých jedinců známého pohlaví z dvou evropských sbírek. Pro metodu bylo zvoleno pět oblastí, které reflektují funkční morfologii – preaurikulární oblast, *incisura ischiadica major*, arch composé, *margo inferior ossis coxae*, poměr délek ischia a pubis. Každý znak je definován jednou až třemi podmínkami a je hodnoceno, je-li ženský „F“, mužský „M“ či nerozlišený „0“. Na základě těchto hodnocení těchto podznaků se podle převahy F/M pozorovatel rozhodne pro ženské/mužské pohlaví. Pokud je množství ženských a mužských forem znaků shodné, pohlaví se určí jako nedeterminovatelné. Úspěšnost metody se při využití celé pánve pohybovala okolo 98 %, a tedy splňuje kritéria pro úspěšnou metodu ve forenzní praxi, kde je vyžadována úspěšnost alespoň 95 % (Brůžek, 2002).

Se stejnou problematikou se setkáváme i u metod odhadu pohlaví, které pracují s lebkou. Metody jsou často limitované zkušenostmi pozorovatele či rozdílnou mírou pohlavního dimorfismu v jednotlivých populacích.

2.2.2 Pohlavní dimorfismus krania

Řada událostí v evoluci člověka – přechod k obligátní bipedii, encefalizace, specifická strava, rozvoj řeči a schopnost rozeznávat obličej - způsobila sérii specifických změn v morfologii lebky. Morfologické variace lidského krania jsou tedy pravděpodobně adaptací na veškeré tyto události (Aiello a Dean, 1990, Lieberman et al., 2001, Martínez-Abadías et al., 2011). Zatímco pohlavní dimorfismus je pro

mnoho morfologických struktur postkraniálního skeletu (výška, váha atp.) prostudován poměrně detailně, studií zabývajících se touto problematikou v kraniofaciální oblasti je podstatně méně (Lestrel et al., 2005).

Anatomicky můžeme lebku rozdělit na splanchnokranium a neurokranium. Splanchnokranium – tzv. obličejová část lebky je oblast velmi zatížená pohlavním výběrem. Vedle znaků jako je robusticita a maskulinita postavy, tón kůže, velikost extremít, stupeň ochlupení atp., je velký důraz při výběru partnera kladen právě na obličej a výraz. Lidské sekundární pohlavní znaky mohou být náповědou pro hormonální stav či kvalitu genové výbavy. Atraktivita obličeje může tedy být indikátorem zdraví a plodnosti (Thornhill a Gangestad, 1993, Barber, 1995). Co se týká velikosti mozkové části lebky tzv. neurokrania, ta odpovídá relativní velikosti mozku. I ve velikosti mozku můžeme pozorovat mezipohlavní rozdíly - mužský mozek je v průměru o 8-10% větší než ženský (Filipek et al., 1994).

Vývoj mozku a formování lebky jsou dva úzce spjaté procesy zahrnující sérii morfogenetických procesů. To, jak moc je lebka závislá na růstu mozku nejlépe dokládají vrozené vývojové vady mozku. Konkrétně při anencefalii, kdy mozek chybí, se kosti kalvy nezaloží a dojde k takzvané akranii. Opakem je pak hydrocefalie, kdy vlivem velkého množství mozkomíšni tekutiny dojde k extrémnímu růstu kalvy (Richtsmeier et al., 2006). Obličej, baze lební a neurokranium se tedy v průběhu ontogenetického vývoje nechovají jako zcela nezávislé funkční jednotky, ale jejich vývoj je prokazatelně spojen (Martínez-Abadías et al., 2011). Tento princip odpovídá teorii funkční matrix – růst lebky je pasivní proces závislý na růstu mozku, mozkových plen, množství mozkomíšního moku atp (Moss, 1968). V problematice pohlavního dimorfismu tedy není třeba lebku anatomicky dělit, naopak je záhodno pracovat s ní jako s celkem.

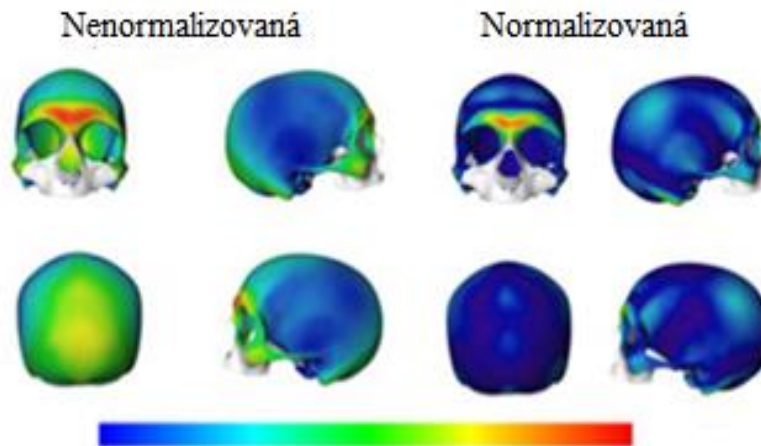
Pohlavní dimorfismus v kraniofaciální oblasti se objevuje poměrně záhy v postnatálním vývoji a odlišný vývoj provází muže a ženy celý život, zejména kvůli hormonálním rozdílům (Bulygina et al., 2006). Nicméně znaky, které napomáhají k identifikaci nedospělého jedince či jeho pohlaví na kostře, se ve větší míře vyvíjejí až po pubertě, kdy dochází ke značnému zvýšení hladiny hormonů. Poté začíná být pohlavní dimorfismus znatelný především na pánvi a na lebce - například ve střední oblasti obličeje nebo prominencí nadočnicových oblouků (Lewis, 2007).

Ovšem to, co nejvíce ovlivňuje mezipohlavní rozdíly napříč celou živočišnou říší, je pohlavní výběr. Ten můžeme rozdělit na intersexuální, kdy se morfologie přizpůsobila k zastrašení rivala nebo na intrasexuální, kdy morfologie udává míru atraktivity pro opačné pohlaví (Darwin, 1871, Shine, 1989). Mechanismus rozpoznávání atraktivity sekundárních pohlavních znaků partnera, je evolučně velmi stará záležitost. Podobné projevy chování můžeme pozorovat mezi lovecko-sběračskými kulturami i mezi ostatními hominidy (Cosmides a Tooby, 1994, OHiggins a Dryden 2002, Thornhill a Gangestad, 2013).

Cunningham ve své práci rozděluje obličejové znaky do tří kategorií – dětské, dospělé a výrazné. Za dětské jsou považovány velké oči, malý nos a malá brada, za dospělé prominující lící kosti a za výrazné vysoké obočí, velké zorničky a široký úsměv. Dětské znaky hrají větší roli v atraktivitě u žen, kdežto dospělé znaky zvyšují atraktivitu u mužů - pohlavní výběr se tedy chová naprosto opačně u mužů a žen (například ve velikosti a prominenci brady). Velká brada a prominující lící kosti u mužů vypovídají o sociální dominanci a velké oči spolu s širokým úsměvem působí přátelsky a společensky. U žen jsou výrazné lící kosti a úzké tváře známkou pohlavní vyspělosti; malý nos a brada, spolu s plnými rty značí vysokou reprodukční hodnotu; a stejně jako u mužů – velké oči a úsměv značí společenskost. Obličejová atraktivita tedy hraje výraznou roli v mezilidských vztazích (Cunningham, 1986). Zdá se, že spolehlivě koreluje s indikátory značícími fitness jedince a že jisté epigamní znaky tváře mohou odrážet selekci kvalitních genů, rezistenci k patogenům (Barber, 1995, Skrinda et al., 2014) či hladiny hormonů (Moore et al, 2013).

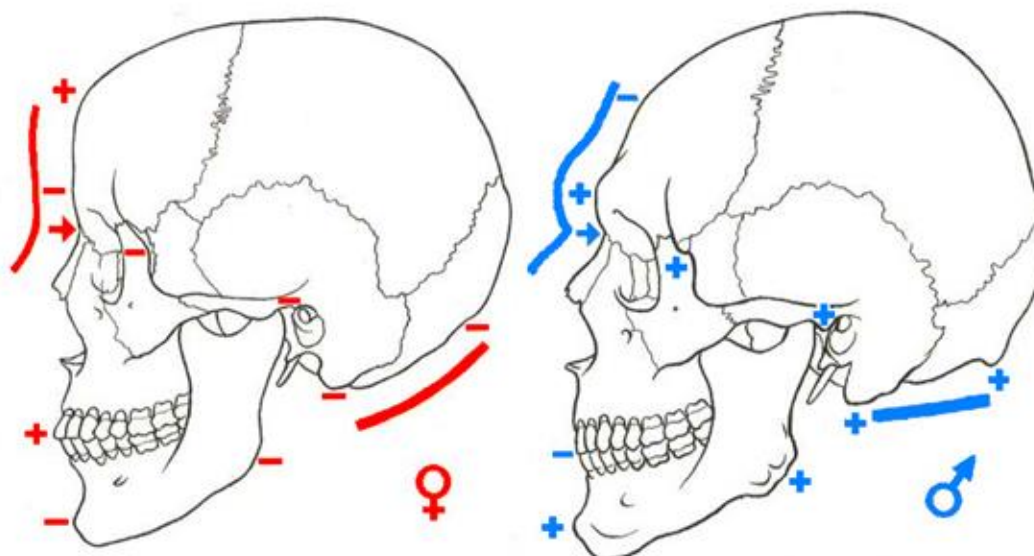
Stejně jako pozorujeme mezipohlavní rozdíly na měkkých tkáních obličeje, můžeme sledovat rozdíly i na tvrdých tkáních, tedy na lebce. Jantz a kolegové pomocí 3D zobrazovacích metod zjistili oblasti lebky, které nejvíce podléhají intrasexuální variabilitě. Podle jimi vypracovaného atlasu jsou signifikantní rozdíly formy v bizygomatické šířce (šířka obličeje), délce lebky, délce baze lební a výšce bradavkovitých výběžků. Ohledně rozdílů v tvaru je pohlavní dimorfismus signifikantní nejvíce v oblasti glabelly, sklonu čela a ohybu baze lební jak je zobrazeno na Obrázku 4 (Jantz et al, 2013, Abdel Fatah et al., 2014). To potvrzuje i studie Garvin a Ruffa, kteří

za nejvíce vypovídající intersexuální znak považují oblast glabelly a bradavkovitého výběžku (Garvin et al., 2014).



Obr. 4. Oblasti s vysokou mírou pohlavního dimorfismu. Červená barva značí nejvyšší variabilitu. Nenormalizovaná část pro formu – glabelární a okcipitální oblast, bradavkovité výběžky a lící kosti, normalizovaná část pro tvar – glabelární oblast a bradavkovité výběžky (upraveno z Abdel Fatah et al., 2014).

Podle dalších studií mají muži relativně větší nasopharyngeální prostor než ženy – větší nosní aperturu, větší vnitřní nozdry a hltan (Rosas a Bastir, 2002). Co se tvarem obličeje týká, muži mají spíše relativně obdélníkový tvar, kdežto ženy spíše čtvercový. Nejvíce je to ovlivněno dolní třetinou obličeje a polohou bodu pogonion (prominující bod v mediální rovině brady) vzhledem k ostatním strukturám (Ferrario et al., 1993). Podle Franklina a kolegů vysoký dimorfismus vykazuje bizygomatická šířka, profil čela, tvar supramastoidálního hřebenu a alveolární prognatismus. Zdá se, že tyto znaky jsou spjaté s velikostí lebky, vývojem svalů a s rozdílným energetickým výdejem. Při zkoumání jihoafrické populace se jako nejvhodnější kritéria ukázala laterální projekce zygomatických oblouků a bizygomatická šířka (Franklin et al., 2006). Zcela obecně shrnuje celkový pohlavní dimorfismus lebky Obrázek 5.



Obr. 5. Obecné zobrazení pohlavního dimorfismu lebky. Vlevo projev na ženské lebce, vpravo na mužské (Čihák a Grim, 2001).

Tvar lebky i velikost lebky jsou tedy významně pohlavně dimorfní (Nikita, 2012). Ross s kolegy ve své práci, kdy studovali změnu tloušťky lebečních kostí, došli k závěru, že tloušťka vzrůstá v závislosti na přibývajícím věku. Nicméně u mužů a žen se projevuje rozdílně. U žen lze pozorovat pomalý nárůst kostní tkáně ve frontální oblasti okolo 65 let věku (*hyperostosis frontalis interna*), naopak u mužů byl v čelní oblasti pozorován pomalý úbytek kostní tkáně (Ross et al., 2010). Teorii, že klenba lební je vysoce dimorfní potvrdila i nedávná studie provedená pomocí 3D zobrazovacích metod – ženy mají v průměru významně silnější frontální oblast, kdežto muži spíše okcipitální region (Abdel Fatah et al., 2014). Dále se pohlavní dimorfismus může projevit na délce střední části baze lební nebo na zakřivení supramastoidálního hřebene (Franklin et al., 2006).

2.3 Metody odhadu pohlaví na lebce

2.3.1 Odhad pohlaví

Odhad pohlaví je považován za nejdůležitější bod identifikace jedince (Jantz, 2013). Pohlavní dimorfismus na kostře je nejsilnější v oblasti pánve (např. Brůžek a Murail, 2006) a v oblasti krania (např. Nikita, 2012). Nicméně samotné určení míst s výrazným pohlavním dimorfismem nestačí k tomu, abychom dokázali odhadnout pohlaví, a je třeba využít spolehlivých a ověřených metod (Brůžek a Murail, 2006). Metody mohou být morfometrické (např. Ogawa et al., 2013, Ramsthaler et al., 2007, Walker, 2008), postavené na sledování morfologických znaků (např. Gonzales, 2001, Maat et al., 1997, Suazo, 2009, Williams Rogers, 2006) a v poslední době se do popředí dostávají 3D metody (např. Bookstein et al., 1999, Perez et al., 2006, Kimmerle et al., 2008, Ramsthaler et al., 2010, Franklin et al., 2013). Odhadu pohlaví pomocí těchto metod budou věnovány další kapitoly.

2.3.1.1 Odhad pohlaví u nedospělého jedince

Metody pro odhad pohlaví u dětí v současné době nedosahují potřebné úspěšnosti do období puberty (Sheuer, 2002). Po dosažení dospělosti jsou tvar a velikost lebky signifikantně odlišné mezi muži a ženami bez ohledu na věk, nicméně v dětském věku je vhodnější pro odhad pohlaví využít jiné přístupy (Nikita, 2012).

Pokud je možné odebrat z kostní tkáně vzorky DNA, lze u prepubertálních dětí a rovněž i u dospělých koster využít molekulárních postupů (Naito et al., 1994, Benecke, 1997). Například gen pro amelogenin má rozdílnou sekvenci v chromozomu X a v chromozomu Y a je tedy možné podle formy predikovat pohlaví (Stone et al., 1996).

2.3.2 Využitelnost metody

Odhad pohlaví ze skeletalizovaných ostatků je mnohdy problematický, protože ostatky jsou často porušené či nekompletní. Jak bylo zmíněno v předešlých kapitolách, největší pohlavní dimorfismus se vyskytuje v oblasti pánve a na lebce, tudíž jsou

nejvhodnější pro vytvoření metody pro odhad pohlaví (Scheuer, 2002). Vypracovaná metoda by následně měla být testována na dostatečně velkém souboru a vykazovat co nejvyšší úspěšnost. Úspěšností metody je myšleno procento jedinců, kteří z daného souboru byli zařazeni správně. Nicméně pro odhad pohlaví v bioarcheologii nebo soudním vyšetřování je důležitá vysoká spolehlivost metody. Pouze úspěšnost metody nestačí pro její všeobecné přijetí. Spolehlivou se metoda stává dalším otestováním na nezávislých populacích. Pokud tedy budeme hovořit o forenzní praxi, měla by spolehlivost metody přesahovat 95 %. Dále by funkční metoda měla být stejně přesný nástroj v rukou jak trénovaného odborníka, tak pozorovatele s menšími zkušenostmi (Brůžek a Murail, 2006).

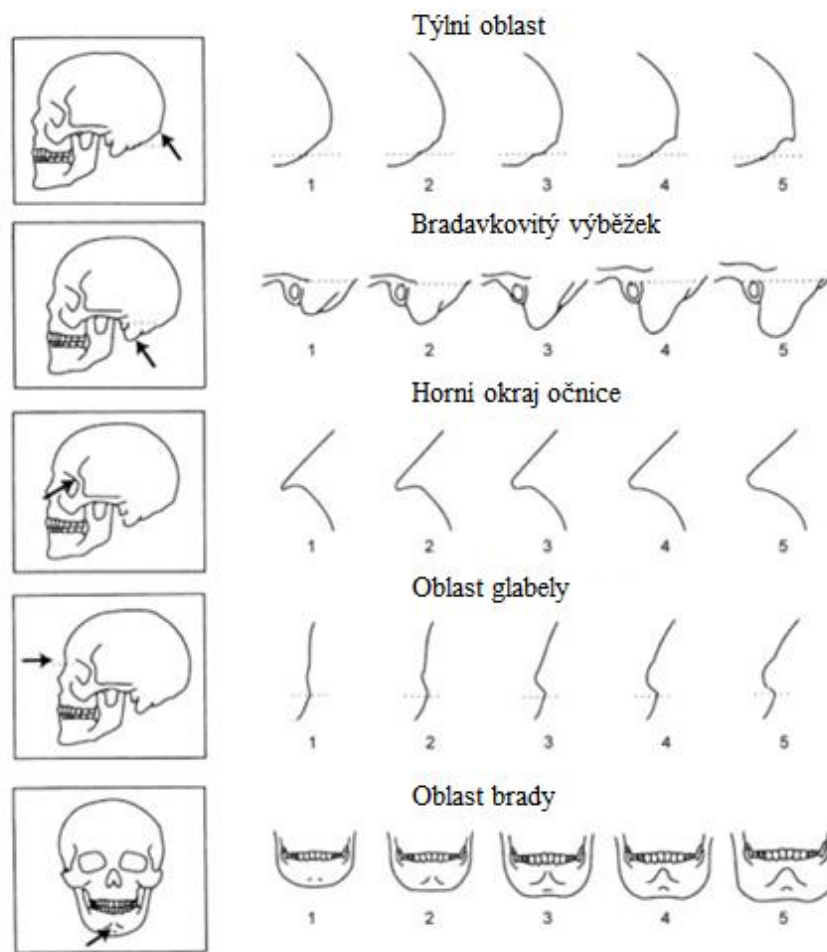
2.3.3 Morfoskopické metody odhadu pohlaví lebky

Morfoskopické metody jsou metody, které staví odhad pohlaví na vypořádání pohlavně dimorfních oblastí a jejich následnému zhodnocení (Ferembach et al., 1979, Buikstra a Ubelaker, 1994, Walrath et al., 2004, Williams a Rogers, 2006, Walker, 2008). Williams a Rogers ve své práci definovaly 21 znaků na lebce. Konkrétně jsou jimi např. velikost bradavkovitých výběžků, velikost nadočnicových oblouků, celková velikost a stavba lebky, velikost a tvar nosní apertury či goniální úhel – tyto znaky se hodnotí dichotomicky, je-li znak přítomný/nepřítomný či výrazný/nevýrazný atp. Při využití 20 znaků bylo dosaženo úspěšnosti 96 % (Williams a Rogers, 2006).

V takzvané metodě Evropských doporučení je uvedeno 14 znaků (glabella, bradavkovité výběžky, nuchální oblast, lícní oblouky, nadočnicové oblouky, čelní a týlní hrboly, *protuberantia occipitalis externa*, sklon čela, lícní kost, horní hrana a tvar očníce a čtyři znaky na spodní čelisti), které se hodnotí na pětistupňové škále od -2 (hyperfemininní) do +2 (hypermaskulinní), k těmto znakům je dále přiřazena i jejich váha v celkovém hodnocení. Váha znaku spočívá v jeho násobení jednou, dvakrát či třikrát v jeho závislosti na signifikanci při odhadu pohlaví. Konečný odhad pohlaví je váženým průměrem těchto hodnot (Ferembach et al., 1979).

Buikstra a Ubelaker ve své publikaci vybrali pro odhad pohlaví podle lebky pět morfologických oblastí, které vykazují vysoký pohlavní dimorfismus v tvaru, velikosti či robusticitě. Posuzuje se robusticita nuchálního hřebene, velikost bradavkovitého výběžku, ostrost supraorbitalního oblouku, prominence glabelly a vzhled bradové eminence (Obr. 6). V každém případě je znak hodnocen na stupnici od 1 do 5. Nejméně nápadná forma znaku je hodnocena číslem 1 a je nejvíce femininní, naopak forma nejvýraznějšího znaku je hodnocena číslem 5 jako nejvíce maskulinní. Pohlaví se následně hodnotí podle stupnice 1 – žena, 2 – pravděpodobně žena, 3 – neurčitelné pohlaví, 4 – pravděpodobně muž, 5 – muž (Buikstra a Ubelaker, 1994).

Metodologii přednesenou Buikstrou a Ubelakerem (1994) ověřoval ve své studii Walker, když ji aplikoval na rozdílné populace. S využitím všech znaků dospěl k úspěšnosti 88 % správně určených lebek. Při zohlednění věku a populační afinity se přesnost metody nijak výrazně nezvýšila. Dále porovnával rozdílný pohlavní dimorfismus lebky u Afro-Američanů, Evropských Američanů a Angličanů. V porovnání Američanů a Angličanů bylo zjištěno, že američtí muži a ženy mají robustnější kraniální znaky než Angličani – větší mentální eminenci či větší bradavkovitý výběžek. Což byo pravděpodobně způsobeno rozdílnými environmentálními vlivy, výživovými podmínkami nebo složením stravy (Walker, 2008).



Obr. 6. Morfoskopická metoda pro odhad pohlaví. Pět hodnocených znaků s grafickým srovnáním. Znaky s nejmenším projevem (s nejnižším číslem) jsou považovány za znaky femininní, naopak nejvyšší číslo značí největší expresi znaku – maskulinní znak (upraveno z Buikstra a Ubelaker, 1994).

2.3.4 Morfometrické metody odhadu pohlaví lebky

Přestože zkušení antropologové mohou stále preferovat metody založené na vizuálním posouzení lebky, metody založené na měření anatomických znaků prezentují objektivnější a méně náročnou alternativu (Ubelaker, 1998). Využitím měření a statistických metod se výrazně snižuje observační subjektivita (Ousley a Jantz, 2013). Morfometrické metody pracují na základě měření vysoce pohlavně dimorfních oblastí (De Paiva a Segre, 2003, Kemkes a Gobel, 2006, Gapert et al., 2009). Například Gapert a Last si ve své studii zvolili okcipitální oblast, protože se na ní nachází několik výrazných anatomických struktur, z nichž *foramen magnum* a okcipitální kondyly

vykazují rovněž pohlavní i populační odlišnost. Na základě 12 měření (např. šířka a délka *foramen magnum*, šířka, výška a délka okcipitálního kondylu, bikondylární šířka) došli k výsledku, že okcipitální krajina je jednou z vhodných oblastí pro další zkoumání pohlavního dimorfismu (Gapert et al., 2009). Na měření celé lebky pracovali například Ogawa s kolegy. Na 113 moderních japonských lebkách měřili 10 znaků (délku lebky, délku baze lebeční, šířku lebky, šířku čela atp.). Tato měření využili v diskriminačně funkční analýze, jejíž úspěšnost se pohybovala mezi 79 % a 89,9 % (Ogawa et al., 2013).

Pro vytvoření metod k odhadu pohlaví se velmi často využívá 2D zobrazovacích metod. Ali a Nakib prováděli měření na RTG snímcích pomocí klasických landmarků (glabella, basion, nasospinale, nasion, mentale, opisthokranion, mastoidale atp.). Na základě těchto landmarků dále definovali lineární měření a měření úhlů. U všech vybraných měření byl zjištěn signifikantní rozdíl mezi mužskými a ženskými lebkami. Při využití 11 měření v diskriminačně funkční analýze dospěli k úspěšnosti odhadu 86,7 % (Ali a Nakib, 2012).

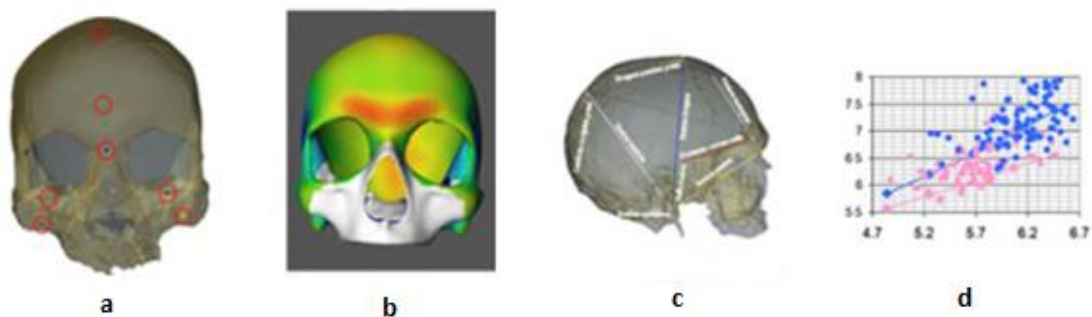
2.3.4.1 FORDISC

Fordisc je počítačový program vytvořený za účelem forenzní identifikace kosterních ostatků jedince – na základě pohlaví, věku, výšky a původu. Primární verze vznikla v roce 1993 (Ousley a Jantz, 1993) založená na měření 21 znaků na recentních datech z Forensic Data Bank. Nejedná se tedy o muzejní sbírky, ale o kosterní materiál z recentních forenzních případů (Ubelaker, 1998). Pokud je v současné době ve forenzní praxi jedinec porovnáván s muzejním materiálem, je nezbytné brát v potaz sekulární trend (Jantz, 2000). Druhá verze - Fordisc 2.0 (Jantz a Ousley, 1996) přišla hned s několika vylepšeními. Přibyla například možnost měření mandibuly, rozšířil se objem srovnávacího materiálu či přibyla měření postkraniálního skeletu umožňující odhad výšky jedince. Verze Fordisc 3.0 (Jantz a Ousley, 2005) je v současné době nejaktuálnější. Využívá lineární diskriminačně funkční analýzu k určení pohlaví a původu neznámých kosterních ostatků a lineární regresi k odhadu výšky postavy. Velká výhoda programu je také v tom, že je možné rozšiřovat kolekci dat pomocí internetu a je možné tak propojovat kolekce z různých částí světa (Jantz a Ousley, 2013).

Nicméně i Fordisc má svá omezení. Je třeba ho využívat spolu s dalšími materiály pro řádnou interpretaci (Ubelaker, 1998). Program neumožňuje provést odhad pohlaví samostatně, vždy pouze ve spojení s odhadem původu, což značně snižuje využitelnost programu v Evropě. Nejlepší dosažené výsledky studie se pohybovaly mezi 74,47 % - 86 %, což je stále nedostatečné. Spolehlivost vhodná pro forenzní praxi se pohybuje od 95 %. Bylo by tedy vhodné vytvořit nástroje odhadu pohlaví, které nebudou zatíženy dalšími faktory (Guyomarc'h a Brůžek, 2011).

2.3.5 3D zobrazovací metody odhadu pohlaví lebky

V posledních letech se do popředí dostávají trojrozměrné zobrazovací metody, které využívají buď data objemová – získaná pomocí magnetické rezonance (MRI) nebo počítačové tomografie (CT) nebo data získaná povrchovými skenery jako je například Breuckmannův skener (SmartScan 3D-HE, Breuckmann, Meersburg, Germany) nebo Vectra 3D (VECTRA-3D®: Canfield Scientific, Inc., Fairfield, NJ). Rozvoj těchto 3D zobrazovacích metod, podnítil výzkum k jejich využití pro forenzní praxi (např. Grabherr et al., 2009, Abdel Fatah et al., 2014) a bioarcheologii (např. Bookstein et al., 1999, Hughes, 2011). S 3D zobrazovacími metodami úzce souvisí geometrická morfometrie, která pracuje na základě zadaných landmarků, propočítávání tvarů a statistických metodách (Bookstein, 1998). Jak může vypadat práce s 3D daty je názorně vizualizováno pomocí Obrázku 7.



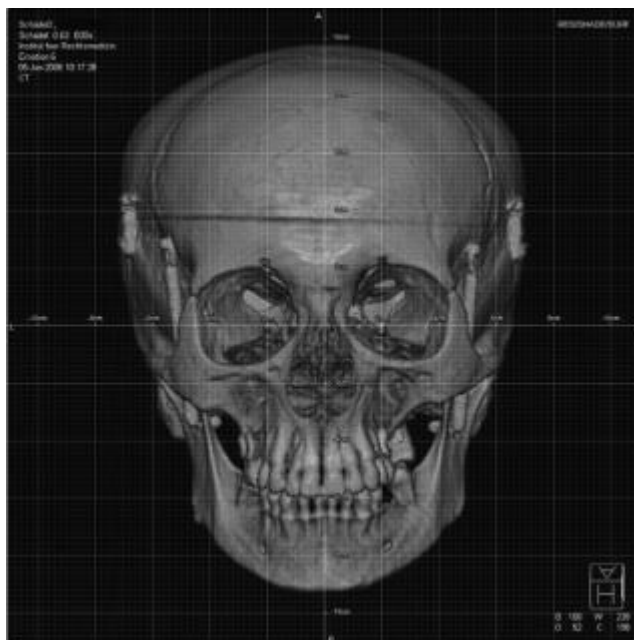
Obr. 7. Ukázka možné práce s 3D daty. Pokládání landmarků (a), analýza hlavních komponent (b), analýza úhlů a rozměrů (c), grafické zpracování analýzy (d) (upraveno z Abdel Fatah et al., 2014).

Využitím CT skenování ostatků se lze vyhnout značné ztrátě času, kterou by způsobilo čekání na maceraci ostatků. Další výhodou je, že kosti mohou být zkoumány neinvazivní metodou. Celková procedura skenování trvá 10-20 minut, data se uloží na disk a je možné s nimi efektivně manipulovat, zasílat pro odbornou expertízu na jiná pracoviště apod. (Grabherr et al., 2009). Významné je i využití CT skenování při hromadných neštěstích, kdy je třeba provést identifikaci osob co nejrychleji a nejšetrněji. Je reálné naskenovat až 80 zemřelých za den a dále pracovat už jen s virtuálními skeny, což významně ulehčuje etiku věci (Sidler et al., 2007).

Ze stejných důvodů (etických a časových) vznikl výzkumný program Virtopsy, který sdružuje mnoho různých vědeckých disciplín. Zabývá se tzv. virtuální pitvou – odtud název. Pomocí MSCT (micro-sliced computed tomography) jsou pod záštitou tohoto programu zkoumány postmortem i antemortem projevy nejrůznějších onemocnění, čímž se následně může zlepšovat odhalení příčin smrti (Thali et al., 2003, Thali et al., 2005, www.virtopsy.com).

Verhoff a kolegové provedli studii srovnání klasické osteologie a 3D zobrazovacích metod v kontextu s projektem Virtopsy. Šest pozorovatelů měřilo čtyři macerované lebky pomocí 32 lineárních měření, které byly poté naskenované pomocí MSCT (tloušťka skenu 1,25mm) a znovu měřené v podobě skenů (Obr. 8). Průměrná odchylka digitálního a analogického měření byla 1-2mm, stejně jako odchylka mezi

jednotlivými operátory. Bylo tedy zjištěno, že využití 3D metod je stejně kvalitní jako využití klasického osteologického měření (Verhoff et al., 2008).



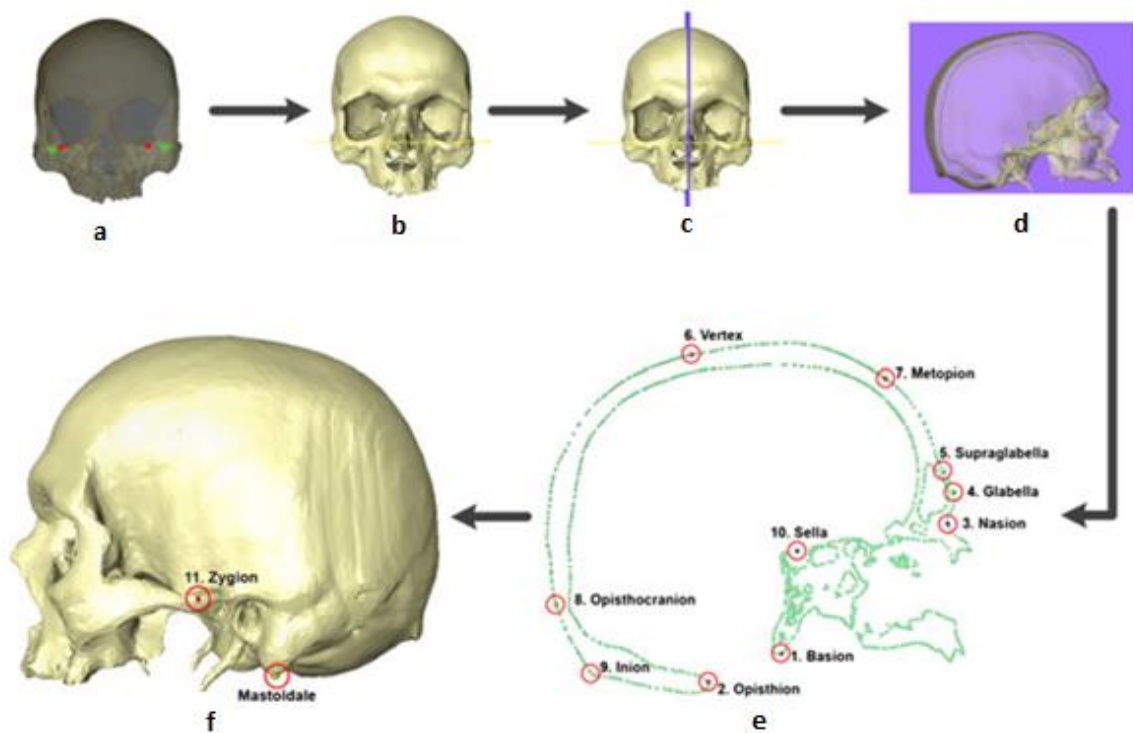
Obr. 8. Virtuální 3D rekonstrukce lebky na základě CT (Verhoff, 2008).

Dedouit s kolegy zkoumali pomocí MSCT 35 již pitvaných jedinců s různými příčinami smrti. U deseti těl byly pomocí 3D skenování nalezeny abnormality, na základě kterých bylo možné jedince identifikovat - 6 z nich se týkalo skeletu, 4 vnitřních orgánů. Z pitevních dokumentů se zjistilo, že pitva odhalila všechny viscerální abnormality (metastáze v plicích, ledvinové cysty, vyjmutí dělohy, vyjmutí části jícnu) nicméně pouze jednu kosterní (Harringtonova operace páteře). Antemortem změny na kostře byly - zlomenina prvního krčního obratle, osifikace štítné chrupavky, zlomenina femuru, bilaterální spondylitida pátého bederního obratle, angiom hrudního obratle. To poukazuje na nezanedbatelný význam 3D zobrazovacích metod ve forenzní praxi, není-li přítomen antropolog (Dedouit et al., 2007).

Za největší omezení, se kterým se mohou tyto postupy setkávat, bychom mohli považovat vysokou cenu CT skeneru a tedy jeho nedostupnost pro mnoho laboratoří, případně také velký objem výsledných dat (Grabherr et al., 2009).

Mezi 3D zobrazovací metody však nutně nepatří jen metody zabývající se snímky z CT skenů či magnetické rezonance. Existují další nástroje pro snímání 3D landmarků a programy pro jejich převedení do virtuální podoby. Jedním takovým nástrojem je Microscribe 3DX využitý například ve studii provedené Ross a kolegy, kdy snímali 75 kraniofaciálních landmarků pro vývoj nových geometricko-morfometrických metod (Ross et al., 2010). Tento nástroj použila ve své bioarcheologické práci například Bigoni s kolegy (Bigoni et al., 2013). Dále jsou velmi využívané také povrchové skenery jako je například Breuckmannův skener či Vectra 3D (See et al., 2008, Koudelová et al., 2015).

Metoda publikovaná Abdelem Fatahem a kolegy (2014) je stěžejní pro tuto diplomovou práci. Ve své studii předložili inovativní 3D metodologii pro zpřesnění odhadu pohlaví, založenou na měření rozměrů exokrania i endokrania. Nejprve byl vytvořen tzv. statistický atlas z 222 lebek Američanů evropského původu. Tento atlas nadále sloužil k určení nejvyšší mezipohlavní variability lebek. V závislosti na velikosti vykazovala největší rozdíly bizygomatická šířka, celková délka lebky, délka baze lební a výška bradavkovitých výběžků. V závislosti na tvaru nejmarkantnější rozdíly vykazovala projekce oblasti glabelly, sklon čelní oblasti a zakřivení baze lební. Po této analýze byly položeny landmarky orbitale a porion, na základě kterých byla odvozena frankfurtská horizontála. Následovaly landmarky basion, glabella, inion, mastoidale, metopion, nasion, opisthocranion, opisthion, sella, supraglabella, vertex a zygon.



Obr. 9. Postup při zadávání landmarků. Nejprve byly zadány body - orbitale a porion (a), podle kterých se určila Frankfurtská horizontála (b). Pomocí té je nalezena midsagitální rovina (c), ze které se vytvoří kontura (d), na které jsou následně zadávány zbylé landmarků (e). Jako poslední jsou zadány zygion a mastoidale jako nejlaterálnější a nejvíce inferiorně položený (f) (upraveno z Abdel Fatah et al., 2014).

Po zadání landmarků následovala analýza hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis). V normalizované analýze, která se soustředila na tvar lebky, vyšla nejvíce signifikantně pohlavně dimorfní oblast glabelly a bradavkovité výběžky. Nenormalizovaná část, která pracovala i s velikostí, označila za nejvíce signifikantní oblasti glabelární a okcipitální, bradavkovité výběžky a lícní kosti. Na základě těchto dimorfních oblastí byla následně postavena druhá tzv. lokální analýza, která využívá měření vzdáleností, úhlů a tloušťky lebeční klenby. Mužské klenby lebeční se ukázaly být signifikantně silnější než ženské ve všech oblastech, s výjimkou v bodech metopion a vertex - ženy mají tedy silnější oblast čelní kosti než muži. Následně byla provedena lineárně diskriminační analýza (LDA) s leave one out cross-validací. Nejvyšší úspěšnost klasifikace pohlaví byla dosažena za využití 11 proměnných, a to 97,3 % (Abdel Fatah et al., 2014).

3 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

CÍLE PRÁCE

1. Zhodnotit variabilitu tvaru a formy ve zkoumaném souboru.
2. Zhodnotit pohlavní dimorfismus ve zkoumaném souboru.
3. Vytvořit uživatelsky a technologicky jednodušší metodu odhadu pohlaví podle lebky inspirovanou prací Abdela Fataha a kolegů (2014), která je založená na analýze povrchových sítí lebky.

HYPOTÉZY

1. V analýze tvaru i formy pohlavně dimorfních oblastí dojdeme k podobným závěrům, které přednesl Abdel Fatah s kolegy (2014), tedy že největší pohlavní dimorfismus bude v oblasti glabelly a nadočnicových oblouků, oblasti bradavkovitých výběžků a okcipitální oblasti.
2. Úspěšnost klasifikace lebek podle pohlaví námi navrženou metodou by se měla pohybovat v rozmezí úspěšností dvou metodologicky podobných studií. Garvin a Ruffa (2012), kteří sledovali povrchové sítě pouze faciální oblasti lebky (79,8 %) a úspěšností metody Abdela Fataha a kolegů (2014) užívajících lebku jako celek (97,3 %).

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Materiál

Materiálem pro tuto diplomovou práci byla velkoobjemová data získaná pomocí počítačové tomografie. Jedná se o data snímaná v nemocnici v Marseille, která nám byla zapůjčena tamějším radiologickým oddělením prostřednictvím školitele.

Celkem jsme tedy obdrželi 104 anonymizovaných CT skenů současné francouzské populace. Jednalo se o CT skeny zejména oblasti hlavy s variabilními úseky páteře či dolní čelisti – záleželo zejména na poloze skenovaného pacienta. Z tohoto souboru bylo celkem 51 žen, ve věkovém rozmezí od 28 do 90 let, s průměrným věkem 58 let; a 53 mužů ve věkovém rozmezí od 18 do 92 let, s průměrným věkem 52,5 roku (Tabulka 1).

Tabulka 1. Materiál. Počty jedinců a údaje o věku

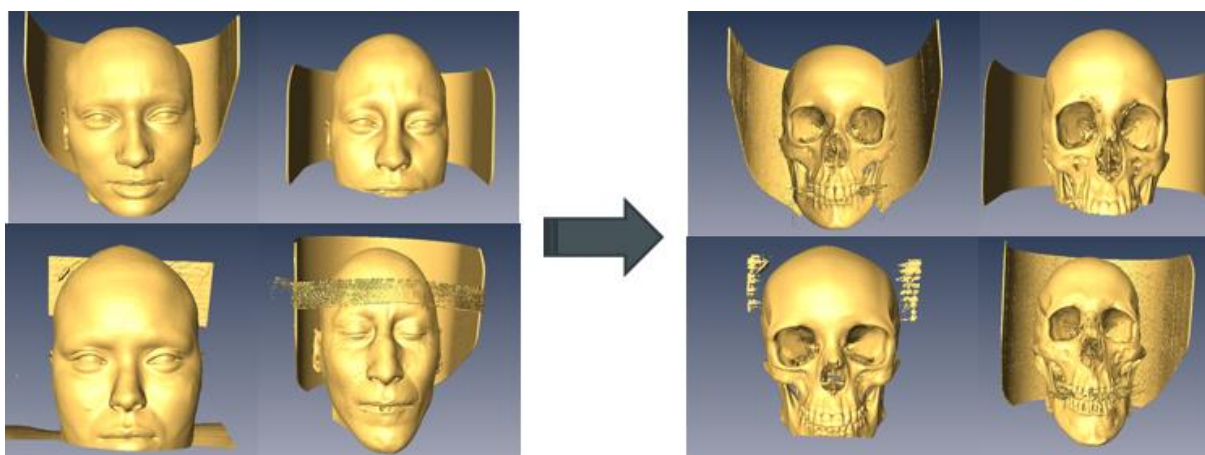
	Počet	Rozmezí věku	Průměrný věk
Ženy	51	28-90	58
Muži	53	18-92	52,5
Celkem	104	18-92	55,1

4.2 Metody

4.2.1 Úprava dat

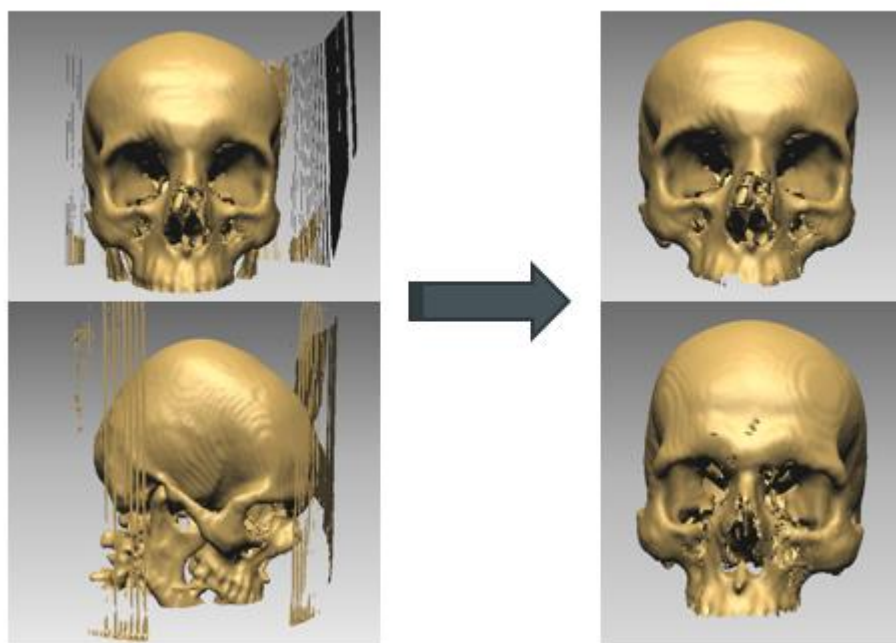
Velkoobjemová data bylo zapotřebí nejprve upravit a zmenšit jejich velikost. Práce probíhala ve 3D zobrazovacích programech Amira 5.3.3 (Visage Imaging Inc., San Diego, CA), Rapidform2006 (INUS Technology, Inc., Seoul, South Korea) a Morphome3cs (Version 2.0, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague, Czech Republic, 2012). Dále probíhalo statistické zpracování v programu Morphome3cs. Jednalo se o Coherent Point Drift/Dense Correspondence Analysis (CPD/DCA) pro registraci dat a následně analýzu Support vector machine (SVM) s radiálním jádrem a analýzu hlavních komponent (PCA) i formy i tvaru.

Nejprve tedy probíhala práce ve 3D zobrazovacím programu Amira 5.3.3. Tento program se zaměřuje na vizualizaci a zpracování 3D dat, jejich segmentaci nebo pro geometrickou rekonstrukci či vizualizaci molekul. Byl vyvinutý jednak pro medicínské účely, kdy je potřeba kvalitně a rychle pracovat s CT skeny pacientů, tak i pro vědecké účely nejrůznějších disciplín - zejména biologie, chemie a inženýrství (Stalling et al., 2005). V našem případě byly z našeho souboru CT skenů odstraněny měkké tkáně pomocí funkce, která separuje tkáně podle jejich hustoty (Obr. 10). Dále byl snížen počet trojúhelníků o polovinu pro zmenšení velikosti skenu.



Obr. 10. Úprava 3D CT skenů v programu Amira 5.3.3. Odstranění měkkých tkání a snížení počtu trojúhelníků.

Další práce probíhala v programu Rapidform2006. Zde došlo k ořezávání nepotřebných částí skenu. Nejprve bylo zapotřebí odstranit podložky a pomocné destičky v okolí hlavy pacientů, dále dýchací přístroje, případně další lékařské pomůcky, s nimiž byl pacient oskenován. Odstraněny byly také části skeletu, se kterými jsme se rozhodli v naší studii nepracovat (Obr. 11). U všech skenů byla odstraněna páteř, která do analýzy povrchu lebky nezapadá. Dále celá spodní čelist a zuby, které vykazují velkou variabilitu. Zuby často chybí, případně jsou spravované amalgámovými plombami, které na CT skenech vytvářejí výrazné paprsky a narušují celý sken.

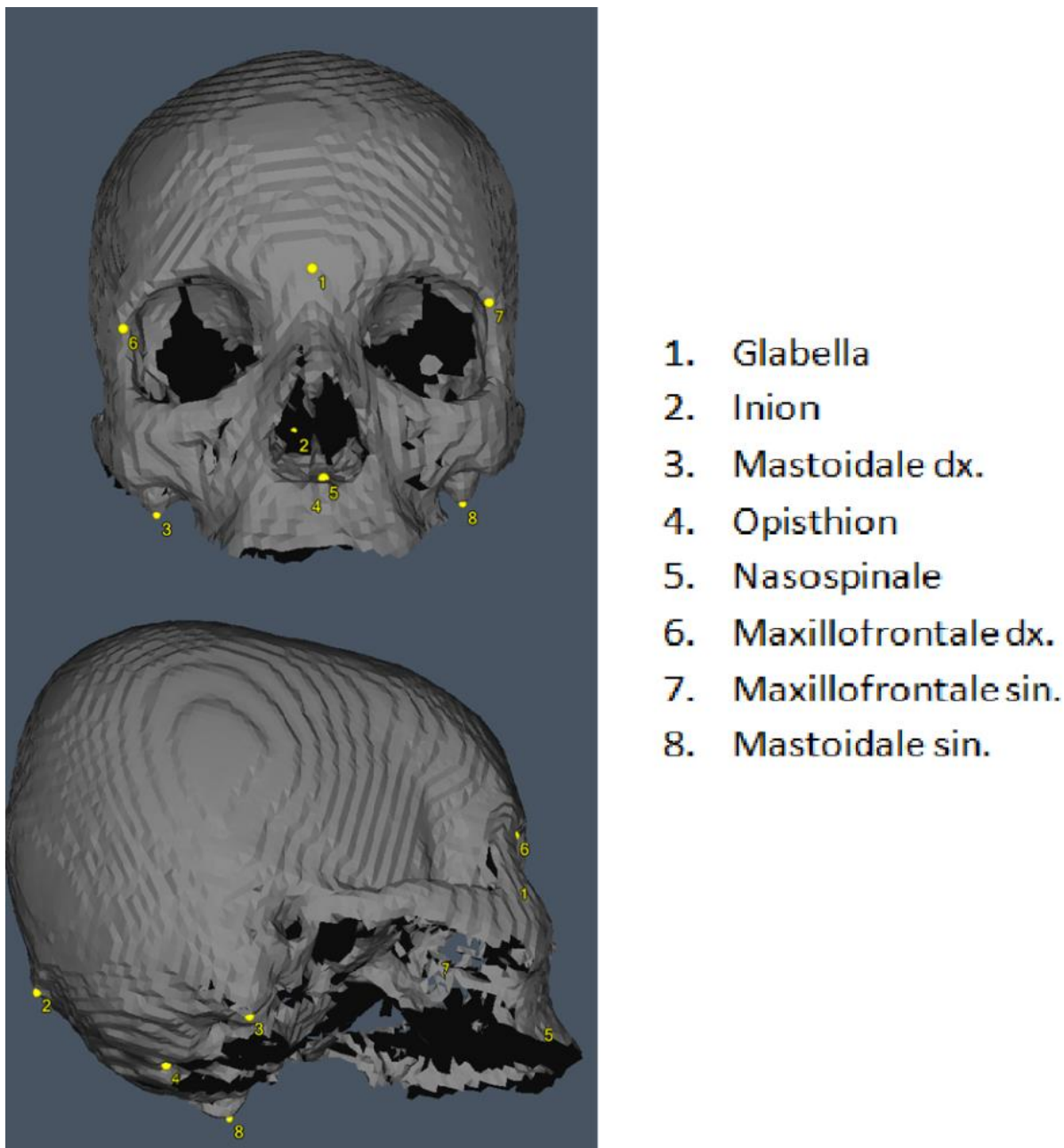


Obr. 11. Úprava skenů v programu Rapidform. Ořezávání podložek a destiček a následné odstranění páteře, spodní čelisti a zubů.

Následně bylo zapotřebí vysegmentovat exokranium, pro další zmenšení objemu dat. Segmentování a všechny následné úpravy a analýzy probíhaly v programu Morphome3cs. Endokranium bylo odsegmentováno metodou viditelných trojúhelníků - kolem lebky bylo umístěno 8 bodů, které snímaly povrch exokrania a segmentovaly tedy pouze viditelné trojúhelníky na vnějším povrchu lebky. Na takto upravený povrch lebky bylo zadáváno celkem osm landmarků (Obr. 12). Pokládány byly jak nepárové – glabella, inion, opisthion, nasospinale, tak párové landmarky – mastoidale a maxillofrontale (Tabulka 2).

Tabulka 2. Seznam použitých landmarků s popisem (podle Martina a Sallera, 1959)

Landmark	Popis landmarku
Glabella	Bod na nejprominentnějším místě v mediální rovině mezi nadočnicovými oblouky, nad kořenem nosu
Inion	Bod leží na bazi zevního týlního hrbolu (<i>protuberantia occipitalis externa</i>) v mediální rovině
Opisthion	Bod na průsečíku mediální roviny se zadním okrajem <i>foramen magnum</i>
Nasospinale	Bod na průsečíku mediální roviny a spojnice nejnižších bodů na dolním okraji <i>apertura piriformis</i>
Mastoidale	Párový. Bod na vrcholu bradavkovitého výběžku (<i>processus mastoideus</i>)
Maxillofrontale	Párový. Bod na průsečíku vnitřního okraje očnice se švem <i>sutura frontomaxillaris</i>



Obr. 12. Zadávané landmarky na povrch exokrania

4.2.2 Geometrická morfometrie

Geometrická morfometrie je disciplína na pomezí statistiky, matematiky, výpočetní techniky. Velmi významnou roli hraje v poslední době zejména v nejrůznějších biologických oborech. Spousta biologických procesů vytváří rozdíly ve tvaru, velikosti nebo formě (tvar i velikost dohromady). Tyto rozdíly mohou značit rozdílné funkce, rozdílné odpovědi na stejné selekční tlaky nebo rozdílný růst a vývoj. Geometrická morfometrie je jeden z nástrojů, jak těmto změnám porozumět.

V antropologii našla uplatnění zejména v problematice pohlavního dimorfismu, studiu populační specifity nebo například v růstových a vývojových studiích (Zelditch et al., 2012).

4.2.2.1 Coherent Point Drift/Dense Correspondence Analýza (CPD/DCA)

Tato metoda využívá dvou principů. Základem je tzv. Dense Correspondence Analysis, která je metodou vytvořenou za účelem nerigidní registrace dat a zarovnání povrchových modelů. Nerigidní registraci lze nejnázne popsat jako afinní či elastickou transformaci, kdy dochází v přeškálování a ohýbání modelů. Naopak rigidní transformace nastává v případě, kdy zůstávají zachovány všechny vzdálenosti mezi jednotlivými body. (Myronenko et al., 2007). Jedná se tedy o metodu, která automaticky detekuje spolu korespondující landmarky pomocí lokálních geometrických znaků a deformuje odpovídající povrchy a trojúhelníky meshů na sebe. Výsledkem je schopnost metody efektivně zarovnat shodné tvary, které se liší v poloze, geometrických detailech, velikosti atd. (Zhang et al., 2008). Urychlení výpočtů umožňuje tzv. Coherent Point Drift algoritmus. Ten redukuje složitost výpočtu a mění ho na lineární, díky čemuž je metoda využitelná a pro velké množství dat. Metoda byla vytvořena za účelem jak rigidní, tak i nerigidní registrace dat. V případě nerigidní registrace je obvyklé vysoké číslo transformačních parametrů, navzdory tomu se však jedná o metodu citlivou k šumu dat či extrémním výkyvům. Metoda pracuje se dvěma datasey, prvním je tzv. směs normálního rozdělení, který byl přizpůsoben na data, aby bylo dosaženo maximální variability, druhým je zkoumaný dataset. Optimálně se oba datasey zarovnají a shoda je získána pomocí posteriorních pravděpodobností z komponent prvního datasetu. Funguje na principu souvislého pohybu komponent se zachováním topologické struktury data setu (Myronenko et al., 2006, Myronenko a Song, 2010).

V našem případě byla nejprve na základě osmi zadaných landmarků provedena rigidní registrace lebek. Ta tedy spočívá v zarovnání příslušných landmarků na sebe pomocí posunu, rotaci a škálování. Poté došlo k nerigidní registraci v podobě Coherent Point Drift/Dense Correspondence Analysis (CPD/DCA), kdy se korespondovaly anatomicky odpovídající struktury. Tato metoda je variací na výše zmíněný algoritmus, který navíc výrazně snižuje čas zpracovávání velkého množství dat. (Dupej et al, 2014).

4.2.2.2 Analýza hlavních komponent (PCA)

Analýza hlavních komponent je mnohovariační analýza, která konstruuje proměnné, jež mohou být použity při zkoumání variability mezi jedinci v daném souboru (Zelditch, 2012). Všeobecně lze říci, že všechna data lze zjednodušit pomocí analýzy hlavních komponent. Zejména velké objemy dat v číselné podobě jsou jednou z nejnáročnějších věcí pro lidský mozek. Analýza hlavních komponent může být použita k vytvoření modelu, jak nejrůznější systémy, např. fyzikální nebo chemické, fungují. Takové modely mohou být následně využity pro predikci dalších dat vložených do téhož systému. Analýza hlavních komponent může být použita také pro rozřídění komplexních dat pomocí křivek (Wold, 1987, Jolliffe, 2002).

Cílem analýzy hlavních komponent je tedy extrahovat z datasetu důležité informace a prezentovat je jako nové ortogonální proměnné, které se nazývají hlavní komponenty. Hlavní komponenty jsou seřazeny podle procentuální variability, kterou v souboru představují. První dvě hlavní komponenty představují většinu variability vzorku a se zvyšujícím se číslem komponenty klesá její podíl na variabilitě vzorku (Abdi a Williams, 2010). Pro potřeby rozdělení grafů jsou většinou dostačující dvě až tři hlavní komponenty, nicméně pro účely modelování by měl být počet signifikantních komponent určen crossvalidací (Jolliffe, 2002).

4.2.2.3 Klasifikátor Support vector machine (SVM) s radiálním jádrem

Analýza Support vector machine (SVM) (Cristianini and Shawe-Taylor, 2000) je jedním z typů učicího algoritmu (Boser et al., 1992), který nachází největší využití v případech, kdy není možné lineární rozložení dat. V takovém případě do analýzy vstupuje ještě technika radiálního jádra, která automaticky mapuje nelineárně rozložené vlastnosti prostoru. Jedná se tedy o velmi robustní metodu, která dokáže navzdory silnému rozptýlení dat rozřídřit například části textu či funkce proteinů (Furey et al., 2000).

4.2.2.4 Crossvalidace dat

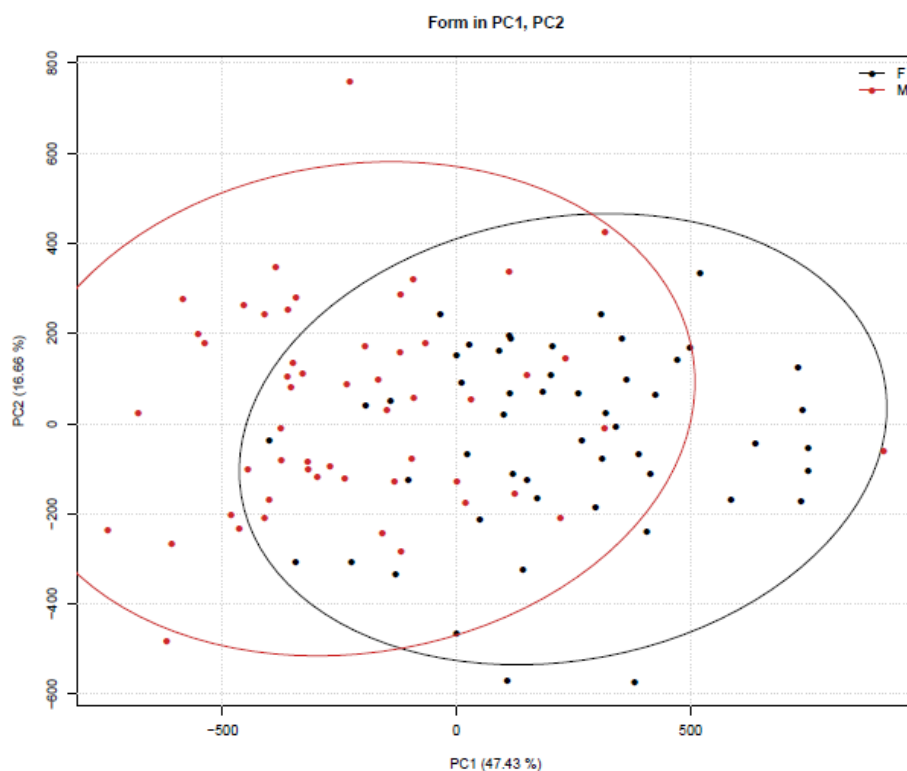
Ve většině studií zkoumaný dataset reprezentuje vzorek z větší populace. V takových případech je cílem stanovit přínos takového pozorování pro danou populaci. Kvůli výskytu takzvaného náhodného efektu nelze použít v modelování standardní parametrické procesy. V takových případech je PCA model zpřesněn pomocí počítačových přezkušovacích technik jako je právě crossvalidace, při které dochází k rozdělování dat na zkušební a testovací datasey. Nejvyužívanější je takzvaná leave-one-out crossvalidace, kdy každý jeden jedinec je zkušebním souborem (Abdi a Williams, 2010). Funguje na principu, kdy je část dat (např. jedinec) vynechána z modelování a následuje jeho klasifikace podle modelu. Predikované hodnoty a hodnoty reálné se mezi sebou porovnají. Tento proces se může opakovat několikrát, v případě leave-one-out crossvalidace se opakuje na všech datech (jedincích). Po takovém přezkoumání je zjištěno, nakolik silný je klasifikátor na testovaném modelu. V praktickém využití díky tomu nedochází k falešně pozitivní interpretaci dat a měly by být eliminovány chybné výstupy (Jolliffe, 2002).

5 VÝSLEDKY

Výsledky jsou pro větší přehlednost řazeny do kapitol. První část výsledků bude věnována analýze hlavních komponent, která byla vypracována v programu Morfome3cs. V první části je poukázáno na významný podíl analýzy Support vector machine s radiálním jádrem ve zkoumání pohlavního dimorfismu v souboru. Zvláštní podkapitoly budou následně patřit výsledkům variability pohlavního dimorfismu v našem souboru dat. Věnovali jsme se jak analýze tvaru, tak analýze formy, která pracuje i s velikostí dat. V další kapitole bude vyobrazen pohlavní dimorfismus vypracovaný taktéž v programu Morfome3cs pomocí analýzy Compare groups, kdy jsou proti sobě porovnávány dvě skupiny – v našem případě muži a ženy z datasetu. V poslední části bude projednána samotná úspěšnost námi přednesené metody, a to jak na tvaru, tak na velikosti exokraniálních meshů.

5.1 Analýza hlavních komponent (PCA)

Rozdělení dat/jedinců v našem zkoumaném souboru nebylo lineární. Vzhledem k tomu, že se jednalo o pacienty z francouzské populace, bylo možné předpokládat Gaussovské normální rozložení jedinců. V takových případech se k analýze hlavních komponent připojuje analýza support vector machine (SVM) s radiálním jádrem (viz. kapitola 4.2.2.3), která napomáhá najít větší podrobnosti v nelineárním prostoru. Na Obrázku 13 je výstup klasifikátoru Support vector machine s radiálním jádrem, kdy byly analyzovány dvě první hlavní komponenty formy. Ženy zaujímají pozitivnější hodnoty v první hlavní komponentě na rozdíl od mužů, kteří se nachází ve více negativních hodnotách PC1. V druhé komponentě se oba celky nijak výrazně neliší - muži zaujímají nepatrně pozitivnější hodnotu PC2 než ženy.



Obr. 13 Graf rozložení jedinců podle formy prvních dvou hlavních komponent po SVM analýze s radiálním jádrem. PC1 – první hlavní komponenta, PC2 – druhá hlavní komponenta, M – muži, F – ženy.

5.1.1 Hodnocení analýzy tvaru

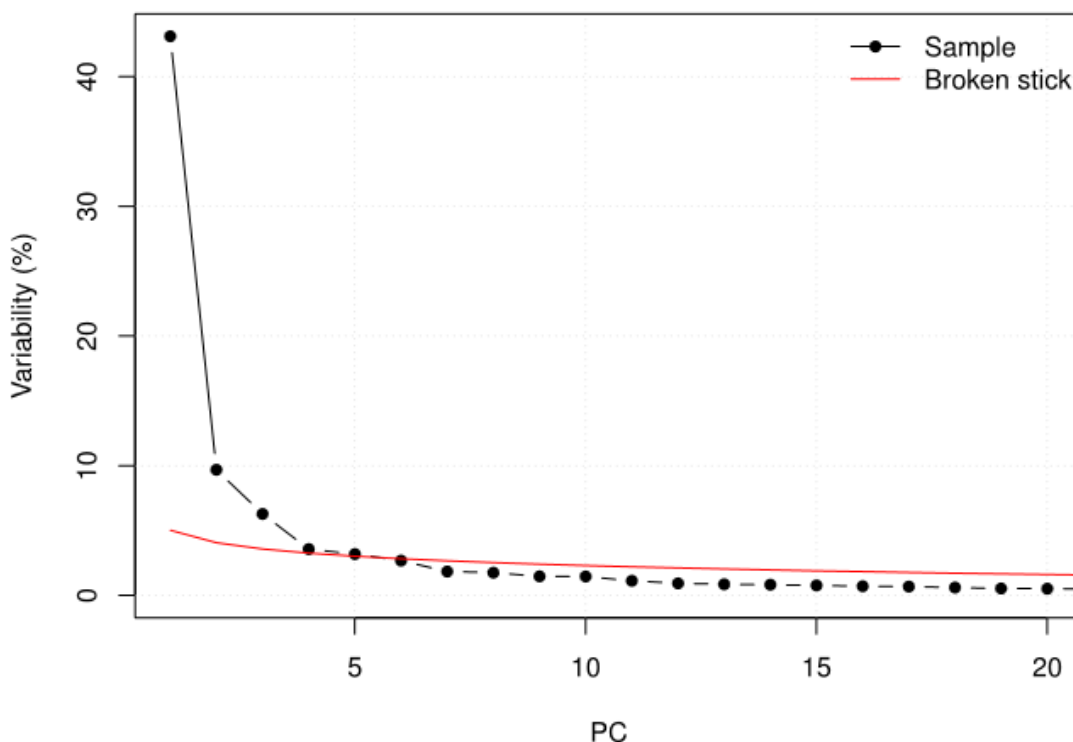
Nejprve byla hodnocena variabilita samotného tvaru (byla odškálována velikost) na základě exokraniálních meshů pomocí analýzy hlavních komponent v programu Morphome3cs. Byla zjištěna celková variabilita souboru a podíl jednotlivých komponent na vysvětlení této variability. První komponenta zahrnuje 43,11 % z celkové variability, druhá komponenta 9,69 %, třetí komponenta 6,28 % a čtvrtá komponenta 3,57 % z celkové variability. Přínos všech komponent do celkové variability je zobrazen v Tabulce 3. Vliv těchto hlavních komponent byl následně sledován na exokraniálních modelech, a to jak pomocí barevné vizualizace, kdy je sledován negativní a pozitivní projev komponenty, tak pomocí porovnávací vizualizace, kdy jsou vedle sebe z frontálního i laterálního pohledu lebky minimálního, průměrného a maximálního projevu dané komponenty v našem souboru. Dále jsou vizualizovány extrémní projevy prvních čtyř hlavních komponent

Tabulka 3. Variabilita tvaru v prvních deseti hlavních komponentách

PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variabilita (%)	43,11	9,69	6,28	3,57	3,18	2,68	1,84	1,75	1,47	1,46

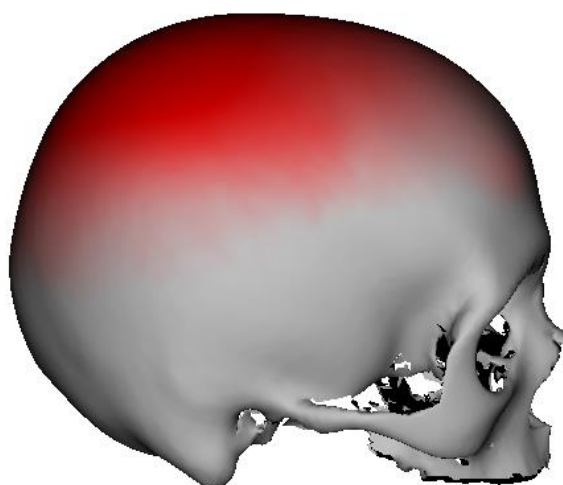
Vliv hlavních komponent na variabilitu můžeme sledovat také pomocí scree plotů – suťových grafů. Ty zachycují podíl jednotlivých hlavních komponent na celkové variabilitě. Slouží zejména k tomu, abychom měli představu kolik hlavních komponent interpretovat a které už nesou velmi nízkou hodnotu variability. Takové komponenty se nacházejí pod dělicí čarou a dají se považovat za nesignifikantní. Na Obrázku 14 je tedy suťový graf variability hlavních komponent v analýze tvaru, podle kterého jsme se rozhodli v následujících odstavcích představit vliv prvních čtyř hlavních komponent.

Shape scree plot



Obr. 14. Graf variability tvaru prvních 20 hlavních komponent. PC – hlavní komponenta.

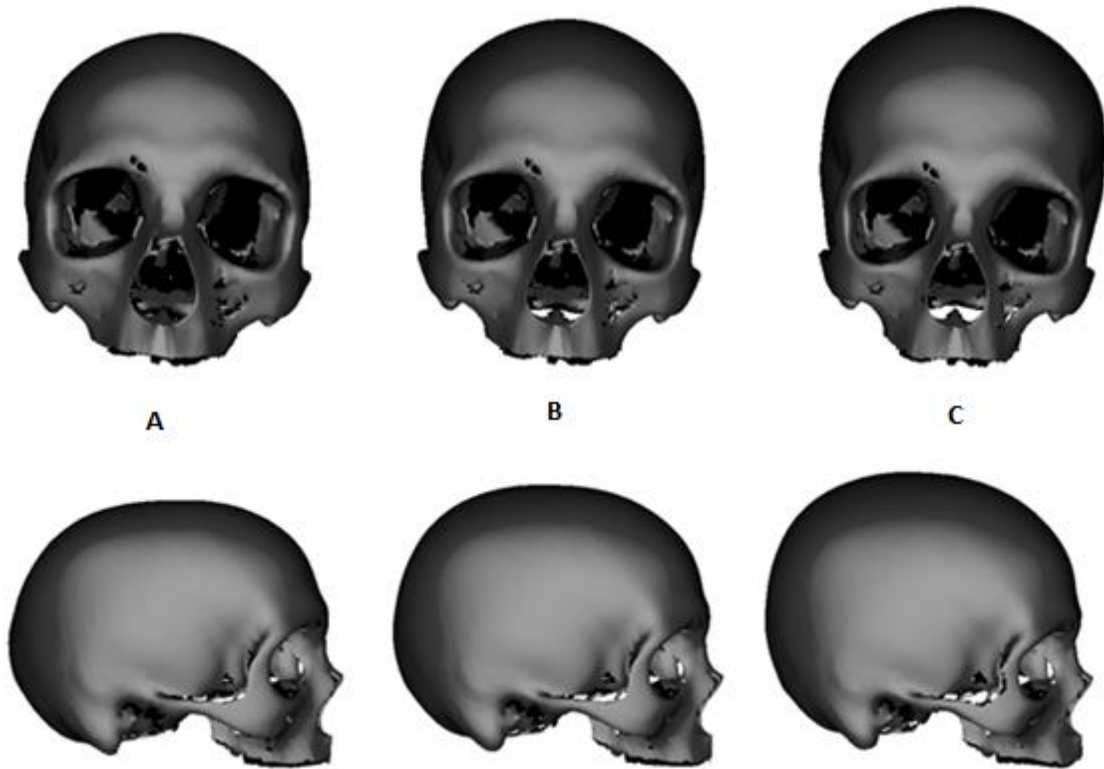
První hlavní komponenta zahrnuje 43,11 % celkové variability. Jak je možné vidět na Obrázku 15 pracuje hlavně s velikostí neurokrania. Červená barva značí posun do kladných hodnot, neurokranium se bude tedy relativně zvyšovat a celkově zvětšovat svou velikost s rostoucí hodnotou první hlavní komponenty. Modrá barva, která by značila posun do negativních hodnot se ve vizualizaci první hlavní komponenty neobjevuje.



Obr. 15. Vliv první hlavní komponenty na tvar lebky. Červená barva značí relativně se zvětšující oblasti, modrá barva relativně se zmenšující.

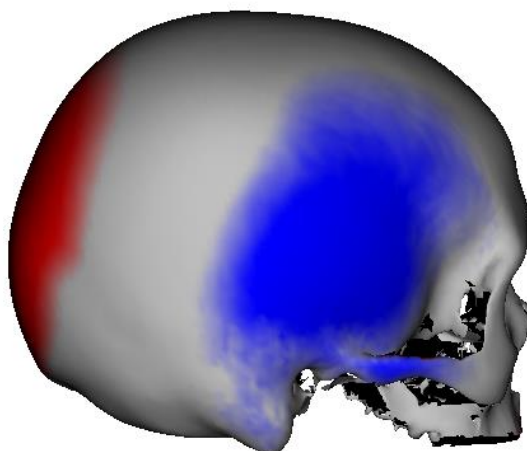
Obrázek 16 znázorňuje vliv, jaký má první hlavní komponenta na tvar povrchu lebky. Zodpovídá především za změnu výšky mozkovny. Uprostřed obrázku je lebka průměrného jedince v daném souboru, který odpovídá nulové hodnotě první komponenty. Vlevo je projev nejvíce negativní hodnoty první komponenty a vpravo naopak nejvíce pozitivní projev. Na frontálním pohledu můžeme pozorovat jak se mění především výška mozkovny. S přibývajícím pozitivní hodnotou první hlavní komponenty se výška mozkovny postupně zvětšuje. Z laterálního pohledu je možné sledovat, že první komponenta mění délku lebky, kterou bychom mohly definovat jako vzdálenost dvou landmarků – glabella, inion. Jedinec s nejvíce negativní hodnotou první hlavní komponenty vykazuje tedy nejnižší mozkovnu, s čímž souvisí i nejnižší čelo, naopak vykazuje mozkovnu nejdelší. Jedinec na druhé (pozitivní) straně první hlavní

komponenty vykazuje nejvyšší mozkovnu a čelo, naopak nejkratší mozkovnu z laterálního pohledu.



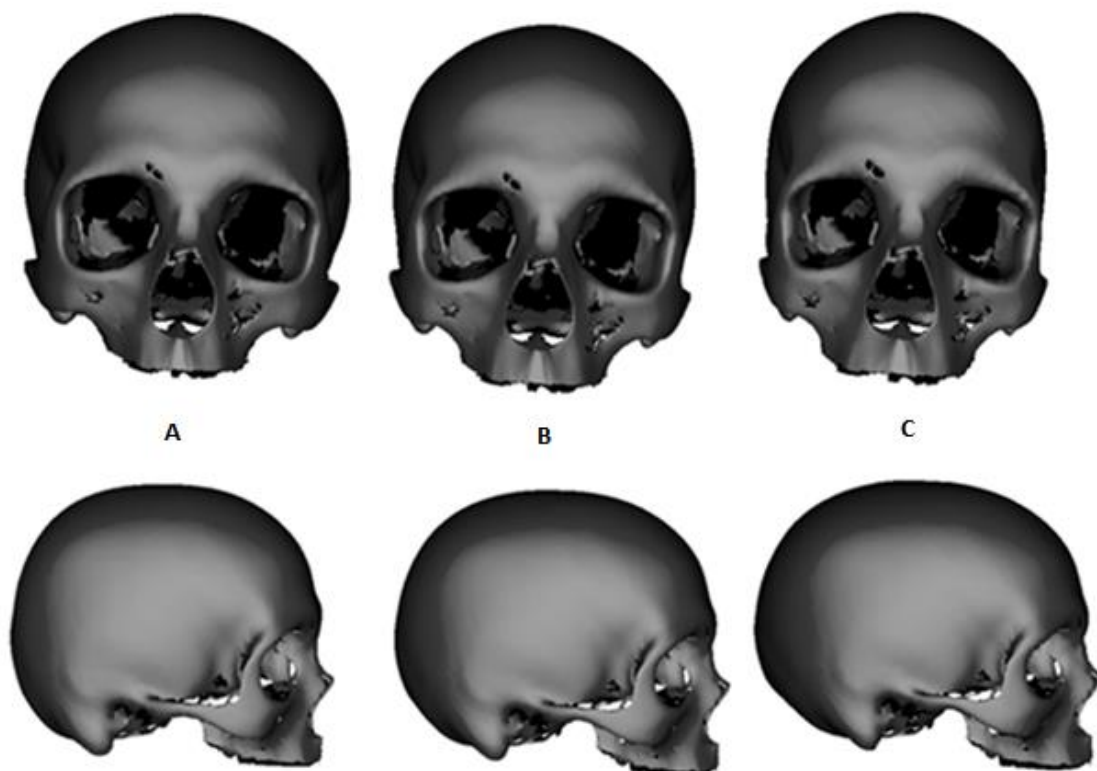
Obr. 16. Projev první hlavní komponenty v tvaru. (A) tvar lebky odpovídající nejvíce negativní hodnotě první hlavní komponenty, (B) je nulový jedinec a (C) tvar, který odpovídá nejvíce pozitivní hodnotě.

Druhá hlavní komponenta v analýze tvaru zaujímá 9,69 % celkové variability. Je zodpovědná zejména za změnu v délce a šířce lebky, jak je možné vidět na Obrázku 17. Modrá barva značí relativní zmenšení s posunem komponenty do negativních hodnot. Relativním zmenšením je nejvíce ovlivněna boční strana lebky, zejména lící oblouk a spánková kost. Červená barva v týlní oblasti naopak značí relativní prodlužování lebky ve smyslu vzdálenosti bodu inion od glabelly.



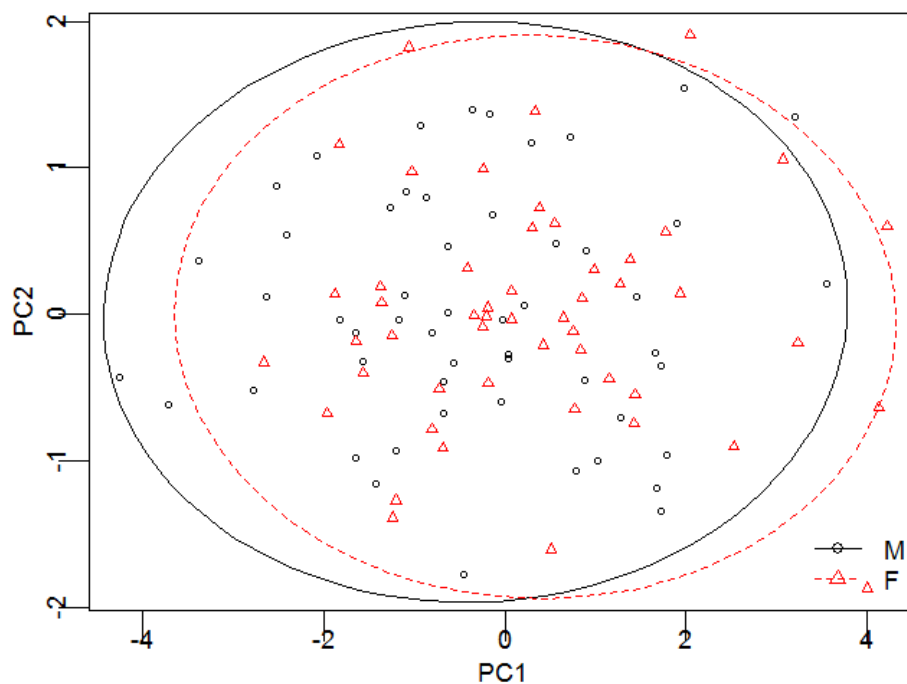
Obr. 17. Vliv druhé hlavní komponenty na tvar lebky. Červená barva značí relativně se zvětšující oblasti, modrá barva relativně se zmenšující.

Uprostřed Obrázku 18 je lebka průměrného jedince v daném souboru, který odpovídá nulové hodnotě druhé komponenty. Úplně vlevo je projev nejvíce negativní hodnoty druhé komponenty a vpravo naopak nejvíce pozitivní projev. Na frontálním pohledu můžeme pozorovat jak se mění především zejména šířka mozkovny. S přibývajícím pozitivní hodnotou druhé hlavní komponenty se mozkovna zužuje a mírně zvyšuje. Stejně se zužuje i faciální oblast. Jedinec s nejvíce pozitivní hodnotou druhé komponenty má výrazně užší bitygomatickou šířku a užší mozkovnu. Z laterálního pohledu je patrné, že i druhá komponenta mění délku mozkovny. Jedinec s nejvíce negativní hodnotou vykazuje tedy nejširší a zároveň nejkratší mozkovnu. Délka lebky se s přibývajícím hodnotou druhé komponenty prodlužuje. Nejpozitivnější jedinec v dané komponentě bude tedy vykazovat úzkou, vysokou a dlouhou lebku.



Obr. 18. Projev druhé hlavní komponenty v tvaru. (A) tvar lebky odpovídající nejvíce negativní hodnotě první hlavní komponenty, (B) je nulový jedinec a (C) tvar, který odpovídá nejvíce pozitivní hodnotě.

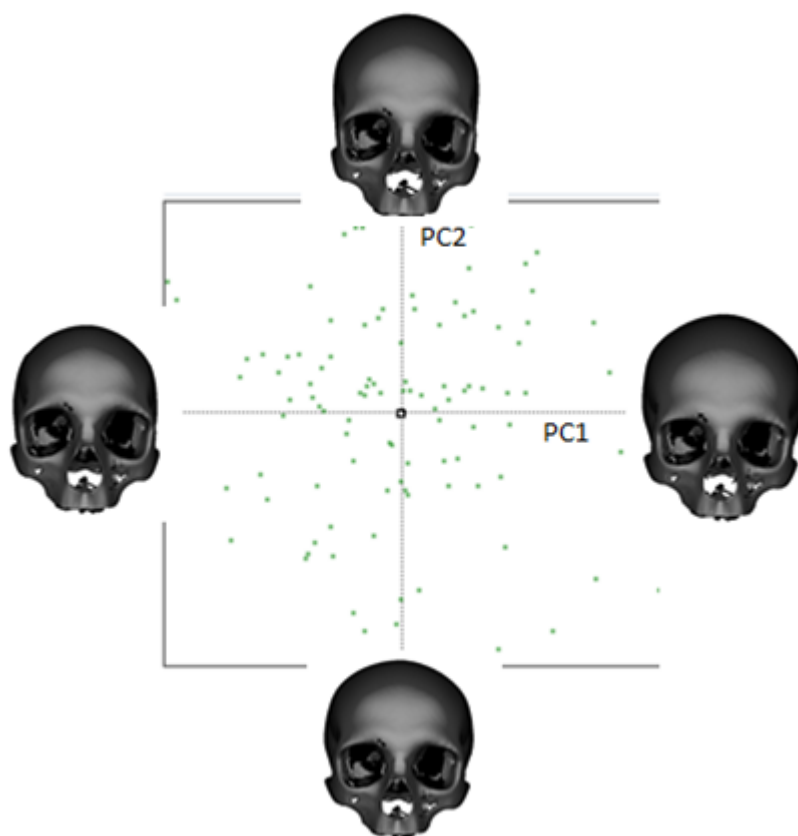
Vliv dvou prvních hlavních komponent lze vizualizovat pomocí scatterplotu (Obr. 19). V případě první a druhé hlavní komponenty není rozložení jedinců podle tvaru výrazně odlišné. Komponenty se ve svém projevu značně překrývají. Ženské lebky znázorněné trojúhelníky vykazují nepatrně větší posun do pozitivních hodnot první komponenty, kdežto muži směřují více negativně po ose první komponenty. V druhé komponentě zaujímají muži nepatrně pozitivnější pozici oproti ženám. Nicméně z celkového pohledu jsou rozdíly rozložení minimální.



Obr. 19. Graf rozložení jedinců podle první a druhé hlavní komponenty.

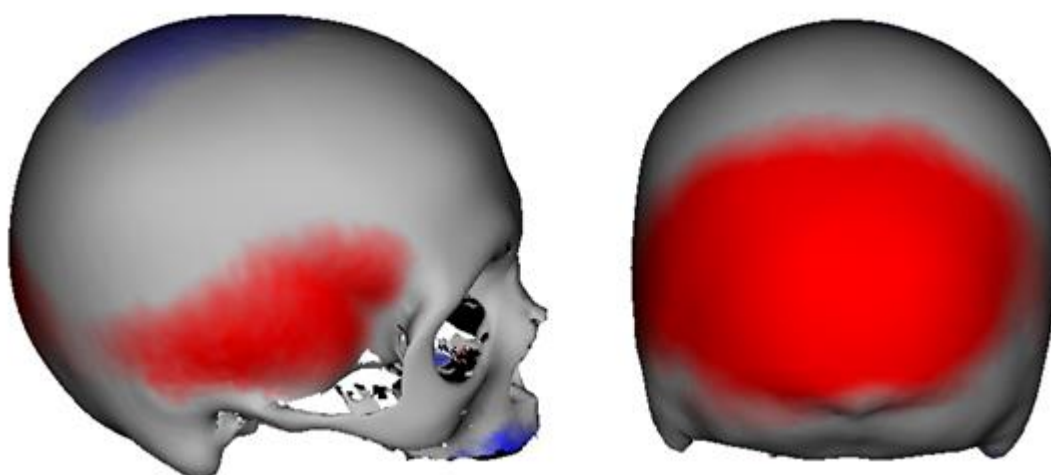
PC1 – první hlavní komponenta, PC2 – druhá hlavní komponenta, M – muži, F – ženy.

Na Obrázku 20 jsou vyobrazeny extrémní hodnoty první a druhé komponenty. Nejvíce negativní a nejvíce pozitivní lebky jsou vidět pro obě komponenty na příslušných osách. Na diagramu jsou podle analýzy hlavních komponent znázorněni zkoumaní jedinci. V místě styku os se nachází nejprůměrnější – tzv. nulový jedinec. Horizontální osa patří první hlavní komponentě, která mění výšku mozkovny. Svislá osa odpovídá druhé hlavní komponentě, na které můžeme pozorovat zejména změnu šířky lebky.



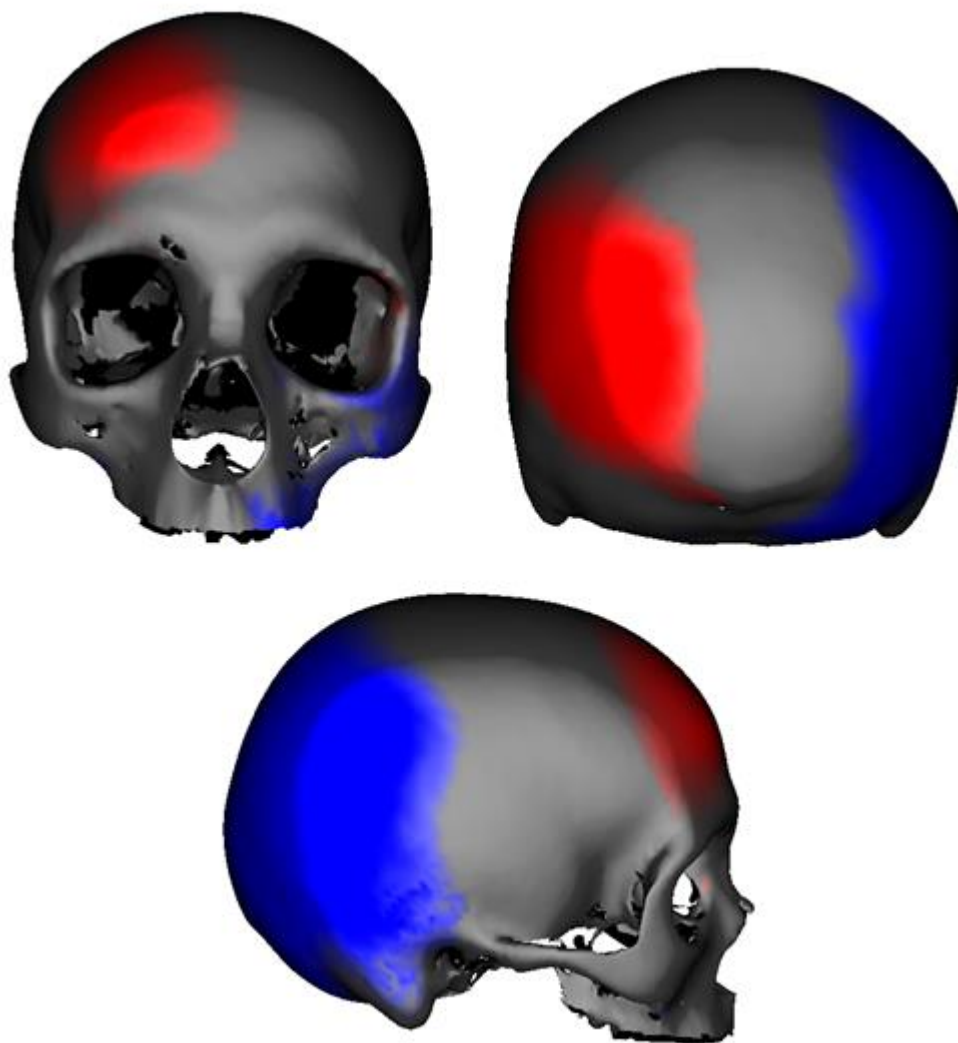
Obr. 20. Diagram pro analýzu tvaru. Znázorňuje rozložení jedinců v analýze hlavních komponent a extrémní hodnoty první a druhé hlavní komponenty.

Třetí hlavní komponenta se podílí na vysvětlení 6,28 % celkové variability. Na Obrázku 21 je zobrazeno, za jaké změny ve tvaru lebky zodpovídá. Modrá barva značí posun do negativních hodnot. V závislosti na hodnotě třetí komponenty se bude tedy tvar v oblasti horní čelisti a vrcholu kalvy relativně zmenšovat. Naopak červená barva odpovídá pozitivním hodnotám komponenty a relativní zvětšování bude působit zejména v oblasti *fossa temporalis* a v okcipitální oblasti nad *protuberantia occipitalis externa*.



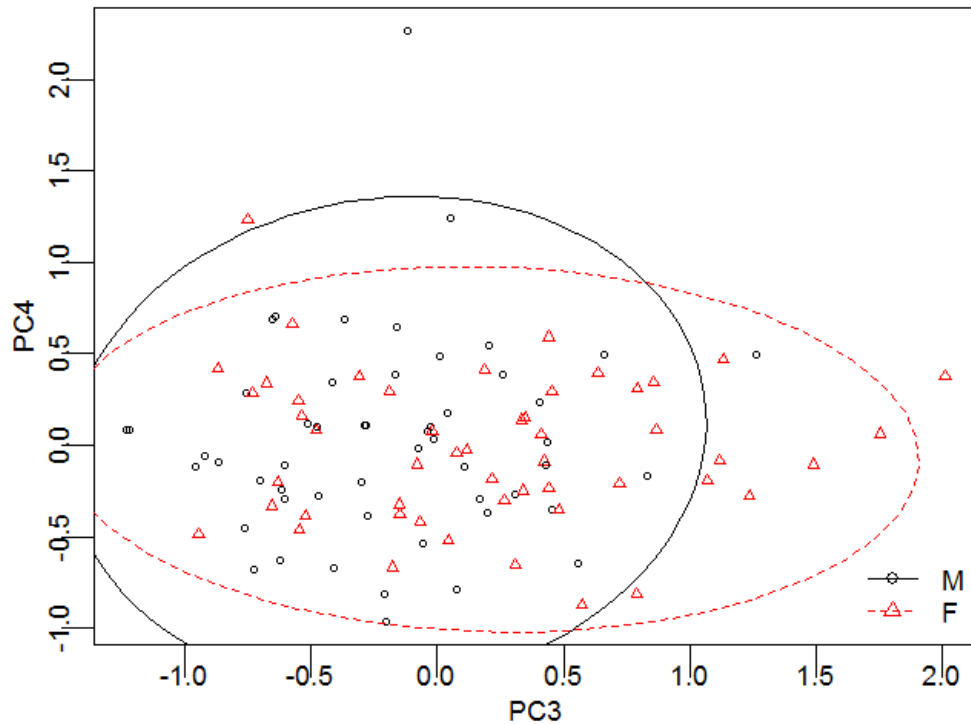
Obr. 21. Vliv třetí hlavní komponenty na tvar lebky. Červená barva značí relativně se zvětšující oblasti, modrá barva relativně se zmenšující.

Vliv čtvrté hlavní komponenty na celkovou variabilitu je 3,57 %. Ze všech signifikantních komponent se nejvýrazněji podílí na asymetrii lebky. Červená oblast (Obr. 22) se projevuje pozitivně relativním zvětšováním, a to zejména v oblasti pravého čelního hrbolu a v levé části týlní oblasti nad *protuberantia occipitalis externa*. Modrá oblast, se projevuje relativním zmenšením levé části splanchnokrania, konkrétně působí na spodní okraj očnice, lící oblouk a alveolární výběžek horní čelisti; a na pravou stranu neurokrania v oblasti týlní a temenní kosti až po bradavkovitý výběžek.



Obr. 22. Vliv třetí hlavní komponenty na tvar lebky. Červená barva značí relativně se zvětšující oblasti, modrá barva relativně se zmenšující.

Na následujícím Obrázku 23 je zobrazena třetí a čtvrtá hlavní komponenta pomocí scatterplotu. Stále dochází k velkému překryvu jedinců, nicméně ženy vykazují větší posun po ose x , tedy větší variabilitu ve třetí komponentě. Muži naopak nevykazují tak výrazný posun po ose třetí hlavní komponenty, ale projevuje se větší posun po ose čtvrté hlavní komponenty než soubor žen, a to jak do pozitivních, tak do negativních hodnot komponenty.



Obr. 23. Graf rozložení jedinců podle třetí a čtvrté hlavní komponenty.

PC3 – třetí hlavní komponenta, PC4 - čtvrtá hlavní komponenta, M – muži, F – ženy.

5.1.1.1 Vizualizace prvních čtyř hlavních komponent

V této podkapitole jsou pro přehlednost vizualizovány extrémní projevy prvních čtyř komponent (Obr. 24-27), které jsou v analýze tvaru signifikantní. V programu Morphome3cs byly zvoleny hraniční hodnoty PCA skóre -3 a 3 pro extrémní projevy. Nula vizualizovala průměrného jedince našeho souboru. Na následujících obrázcích je projev negativní vždy vlevo a pozitivní vždy vpravo.



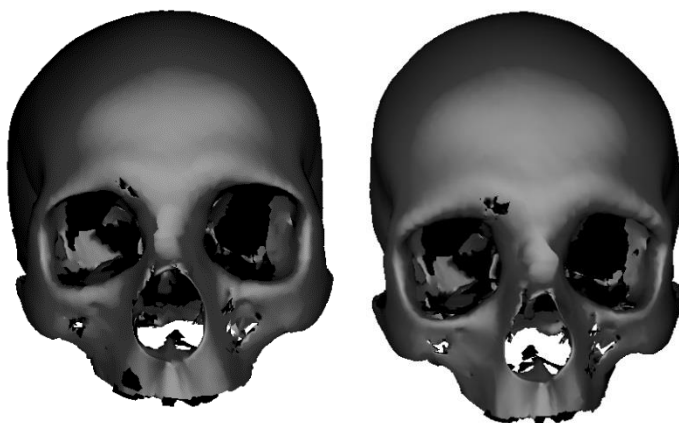
Obr. 24. Extrémní projev PC1. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 25. Extrémní projev PC2. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 26. Extrémní projev PC3. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 27. Extrémní projev PC4. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.

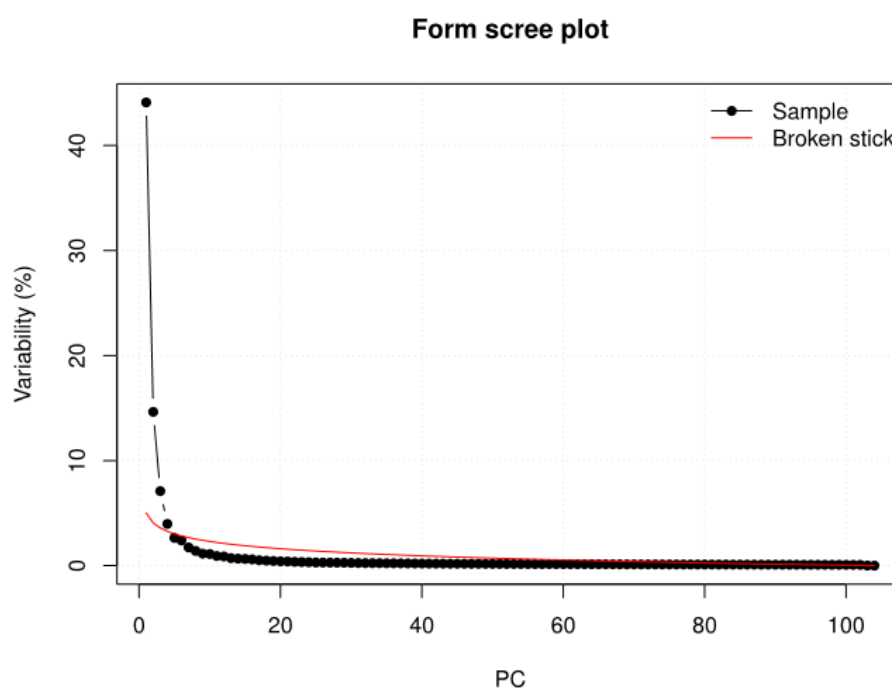
5.1.2 Hodnocení analýzy formy

Po analýze tvaru byla hodnocena variabilita formy (zohledňuje tvar i velikost) na základě exokraniálních meshů pomocí analýzy hlavních komponent v programu Morphome3cs. Byla zjištěna celková variabilita souboru a podíl jednotlivých komponent na vysvětlení této variability. První komponenta zahrnuje 44,11 % z celkové variability, druhá komponenta 14,64 %, třetí komponenta 7,09 % a čtvrtá komponenta 3,97 % z celkové variability. Přínos všech komponent do celkové variability je zobrazen v Tabulce 4. Vliv těchto hlavních komponent byl následně sledován na exokraniálních modelech.

Tabulka 4. Variabilita formy v prvních deseti hlavních komponentách

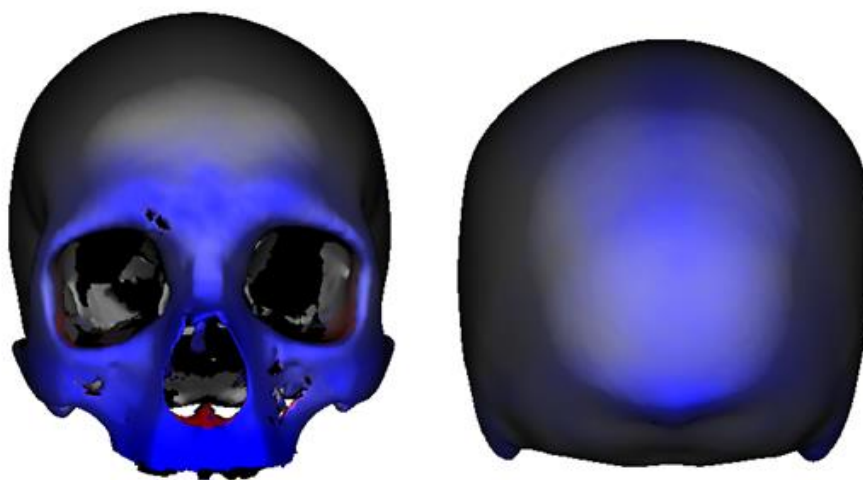
PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variabilita (%)	44,11	14,64	7,09	3,97	2,64	2,40	1,73	1,48	1,14	1,11

Podíl komponent na celkové variabilitě je zobrazen i na následujícím Obrázku 28. Graf opět zobrazuje komponenty, které jsou ještě signifikantní pro náš soubor (nad čarou). Po analýze formy se tedy budeme dále zabírat vizualizací prvních čtyř hlavních komponent, které vykazují signifikanci.



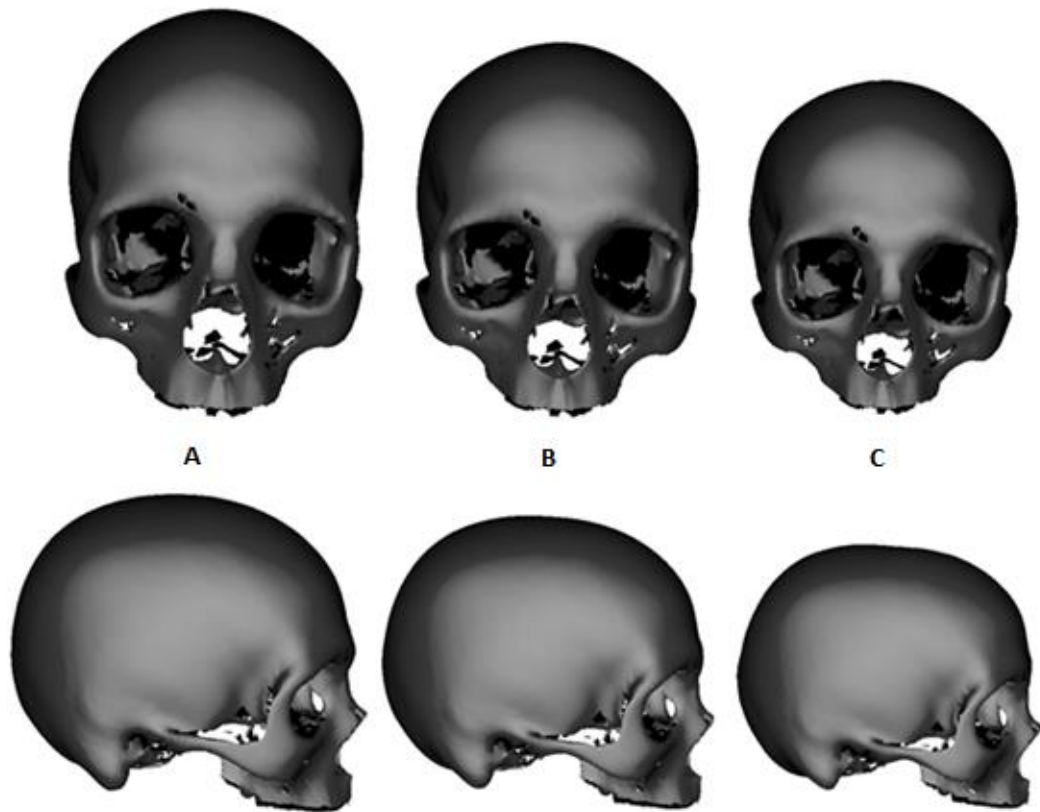
Obr. 28. Graf variability formy prvních 20 hlavních komponent. PC – hlavní komponenta.

První hlavní komponenta zahrnuje 44,11 % variability. Obrázek 29 znázorňuje vliv, jaký má první hlavní komponenta na formu povrchu lebky. Modrá barva odpovídá negativnímu projevu PC1, v tomto případě zmenšování lebky. To působí nejvýrazněji v oblasti *apertura piriformis*, horní čelisti, lícnicích kostí, očnic, nadočnicových oblouků, oblasti glabelly, bradavkovitých výběžků, temenní a týlní oblasti s *protuberantia occipitalis externa*.



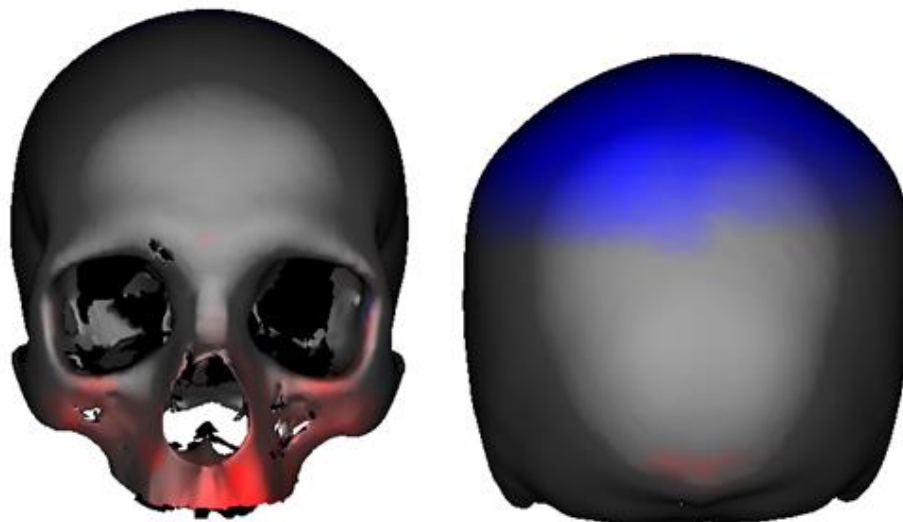
Obr. 29. Vliv první hlavní komponenty na formu lebky. Červená barva značí zvětšující se oblasti, modrá barva zmenšující se.

První komponenta tedy výrazně zodpovídá za velikost splanchnokrania i neurokrania. Jak se konkrétně projevují hodnoty první hlavní komponenty je vidět na Obrázku 30. Uprostřed obrázku je lebka průměrného jedince v daném souboru, který odpovídá nulové hodnotě první komponenty. Úplně vlevo je projev nejvíce negativní hodnoty první komponenty a vpravo naopak nejvíce pozitivní projev. Na frontálním pohledu můžeme pozorovat jak se mění celková velikost mozkovny – jak výška, tak délka. S přibývajícím pozitivní hodnotou první hlavní komponenty se velikost mozkovny postupně zmenšuje. Stejný projev první hlavní komponenty je možné sledovat i na laterálním pohledu. Jedinec s nejvíce negativní hodnotou první hlavní komponenty vykazuje tedy největší mozkovnu, s čímž souvisí i vyšší čelo a faciální oblast. Jedinec na druhé (pozitivní) straně první hlavní komponenty má nejmenší mozkovnu, nižší čelo a čelo, nižší faciální oblast.



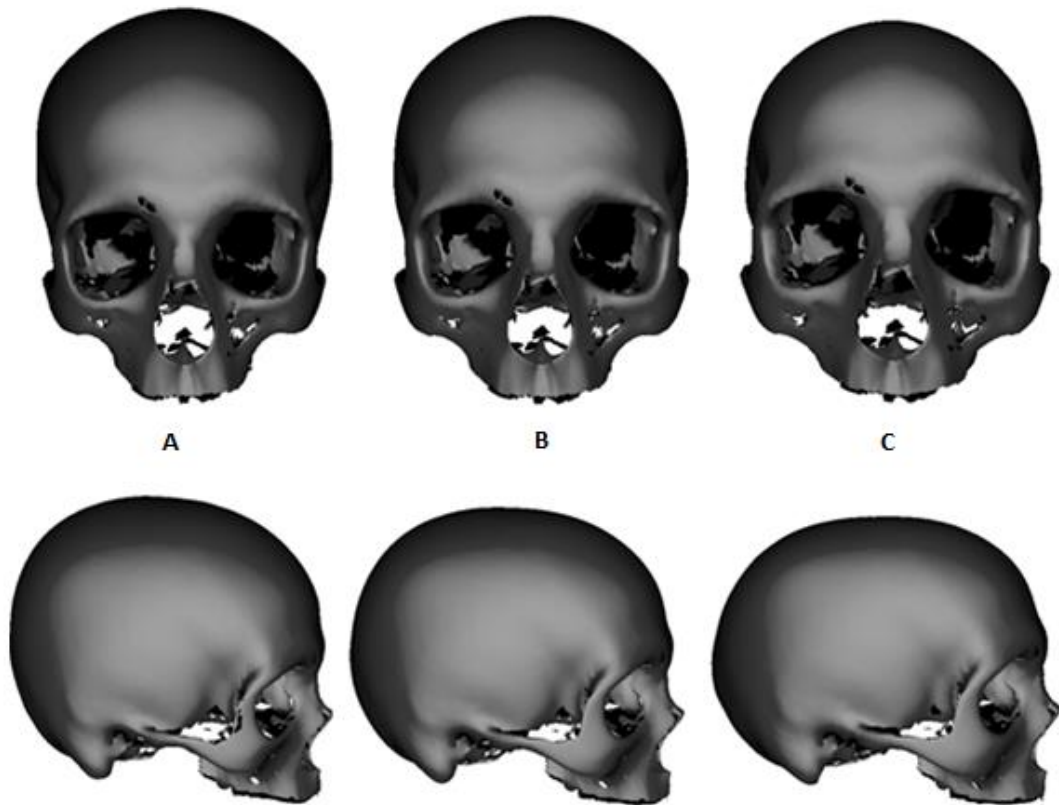
Obr. 30. Projev první hlavní komponenty ve formě. (A) tvar lebky odpovídající nejvíce negativní hodnotě první hlavní komponenty, (B) je nulový jedinec a (C) tvar, který odpovídá nejvíce pozitivní hodnotě.

Druhá hlavní komponenta v analýze tvaru zaujímá 14,64 % celkové variability. Je zodpovědná zejména za změnu ve výšce lebky a prominenci splanchnokrania. Na Obrázku 31 modrá barva značí místa, kde má komponenta negativní účinek. V tomto případě dochází ke zmenšování v oblasti neurokrania, konkrétně temenních kostí. Červeně jsou naopak zvýrazněny oblasti, kde dochází k pozitivnímu projevu. Je možné tedy pozorovat výraznější prominenci obličeje (zejména v oblasti lících kostí, spodním okraji očníce a horní čelisti) a zvýraznění *protuberantia occipitalis externa*.



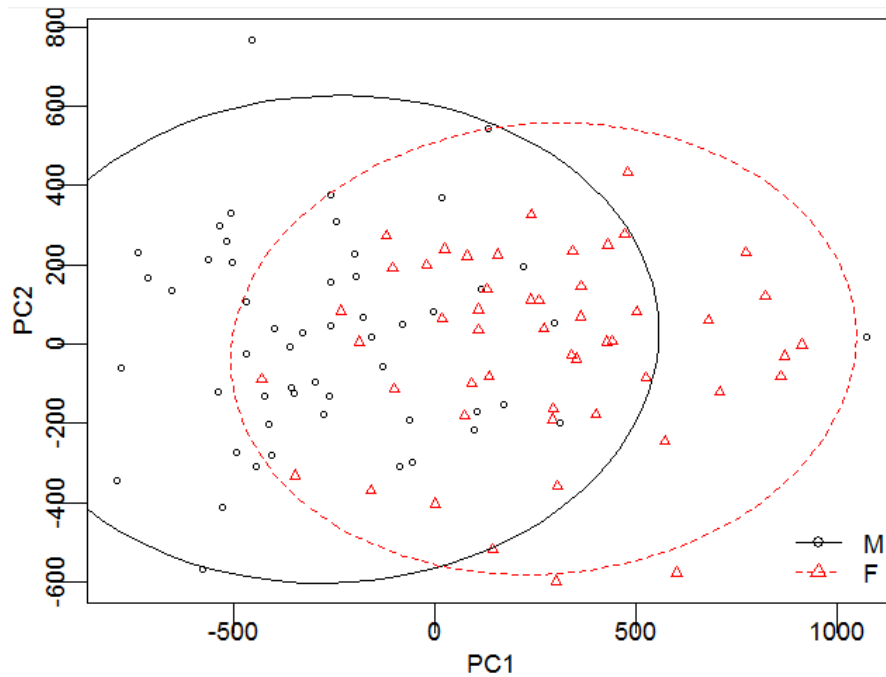
Obr. 31. Vliv druhé hlavní komponenty na formu lebky. Červená barva značí zvětšující se oblasti, modrá barva zmenšující se.

Tyto vlivy druhé hlavní komponenty jsou dále zobrazeny na Obrázku 32. Uprostřed obrázku je lebka průměrného jedince v daném souboru, který odpovídá nulové hodnotě druhé komponenty. Úplně vlevo je projev nejvíce negativní hodnoty druhé komponenty a vpravo naopak nejvíce pozitivní projev. Na frontálním pohledu můžeme pozorovat jak se mění především zejména výška mozkovny. S přibývajícím pozitivní hodnotou druhé hlavní komponenty se mozkovna rozšiřuje a snižuje. Stejně se rozšiřuje i faciální oblast. Jedinec s nejvíce pozitivní hodnotou druhé komponenty má výrazně širší bizygomatickou šířku. Z laterálního pohledu je patrné, že i druhá komponenta mění délku mozkovny. Jedinec s nejvíce negativní hodnotou vykazuje nejkratší mozkovnu. Ta se s přibývajícím hodnotou druhé komponenty prodlužuje.



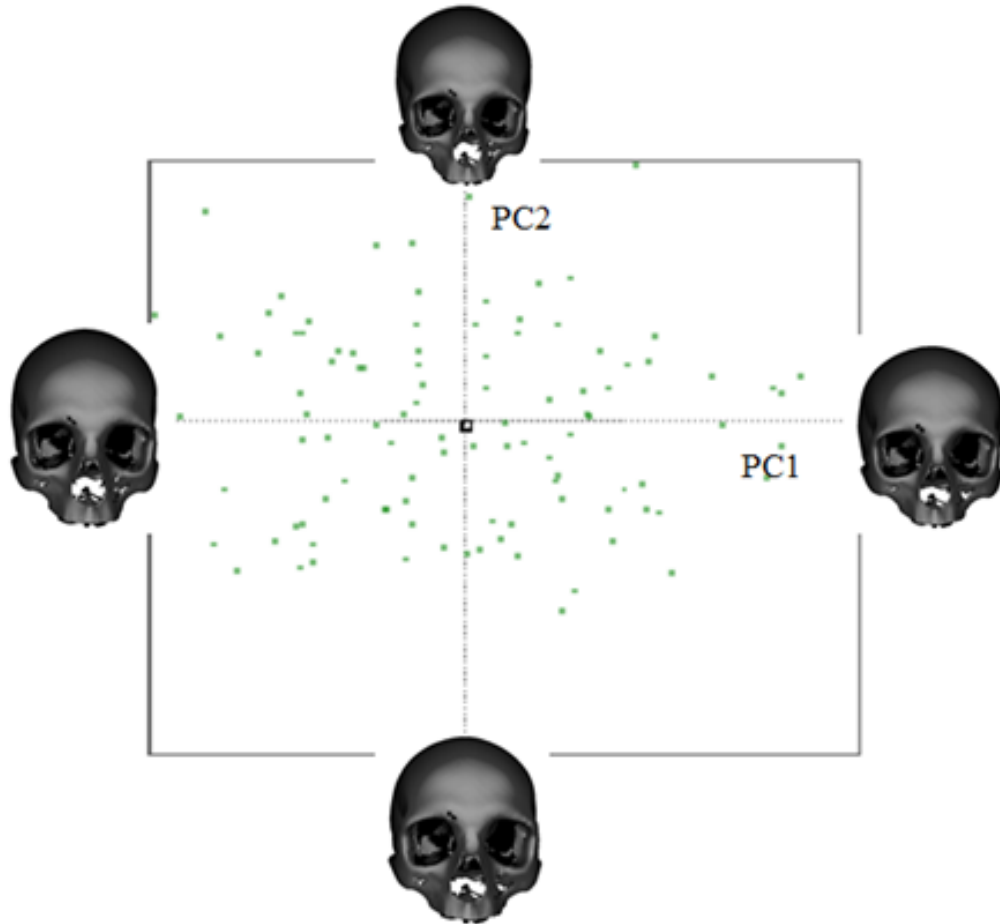
Obr. 32. Projev druhé hlavní komponenty ve formě. (A) tvar lebky odpovídající nejvíce negativní hodnotě první hlavní komponenty, (B) je nulový jedinec a (C) tvar, který odpovídá nejvíce pozitivní hodnotě.

Tyto dvě první hlavní komponenty byly vizualizovány pomocí scatter plotu. Obrázek 33 zobrazuje vliv první a druhé hlavní komponenty na rozložení zkoumaných jedinců. Zde je vidět již výrazné rozdělení podle pohlaví, zejména po ose první hlavní komponenty. Na základě vizualizace první komponenta charakterizuje převážně rozdíl ve velikosti. S přibývajícím hodnotou PC1 dochází ke zmenšování lebek, které je tedy charakteristické zejména pro ženy. Naopak muži zaujmají více záporné hodnoty PC1 a lze tedy předpokládat větší velikost lebek. V rozložení podle druhé hlavní komponenty muži dosahují nepatrně pozitivnějších hodnot než ženy.



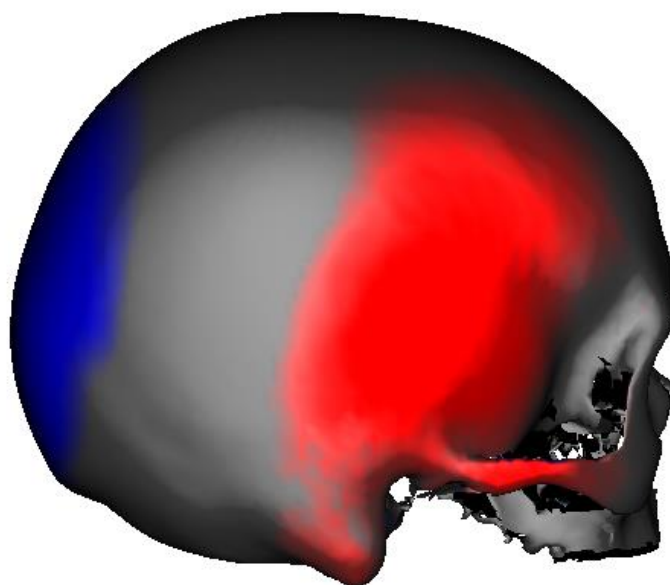
Obr. 33. Graf rozložení jedinců podle první a druhé hlavní komponenty. PC1 – první hlavní komponenta, PC2 – druhá hlavní komponenta, M – muži, F - ženy.

Na Obrázku 34 jsou vyobrazeny extrémní hodnoty první a druhé hlavní komponenty v analýze formy. Nejvíce negativní a nejvíce pozitivní lebky jsou vidět pro obě komponenty na příslušných osách. Na diagramu jsou podle analýzy hlavních komponent znázorněni zkoumaní jedinci. V místě styku os se nachází nejprůměrnější/nulový jedinec. Horizontální osa patří první hlavní komponentě, která mění velikost mozkovny. Svislá osa odpovídá druhé hlavní komponentě, na které můžeme pozorovat zejména změnu šířky a výšky lebky.



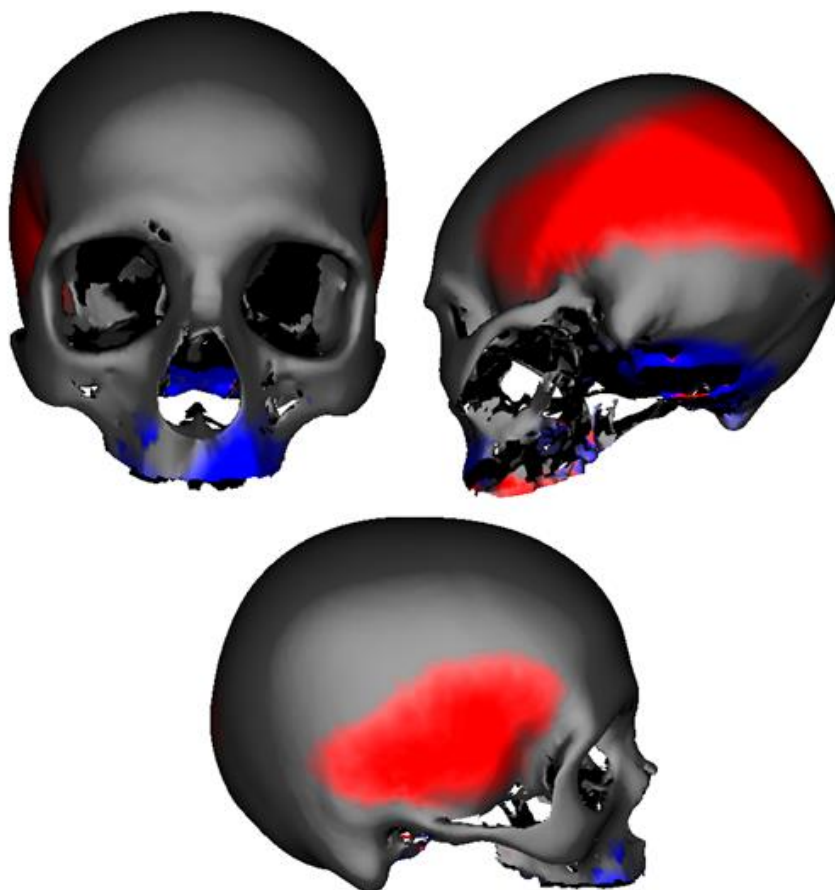
Obr. 34. Diagram pro analýzu formy. Znázorňuje rozložení jedinců v analýze hlavních komponent a extrémní hodnoty první a druhé hlavní komponenty.

Vliv třetí hlavní komponenty na vysvětlení variability souboru je 7,09%. To jak působí na povrch lebky je znázorněno na Obrázku 35. Modře je zvýrazněna týlní oblast, kde dochází k nejvýraznějšímu zmenšení. Červeně naopak boční oblast lebky, lícní oblouk, spánková kost a bradavkovitý výběžek. Lebka tedy bude zkracovat svou délku, naopak bude docházet k jejímu zvětšování do šířky.



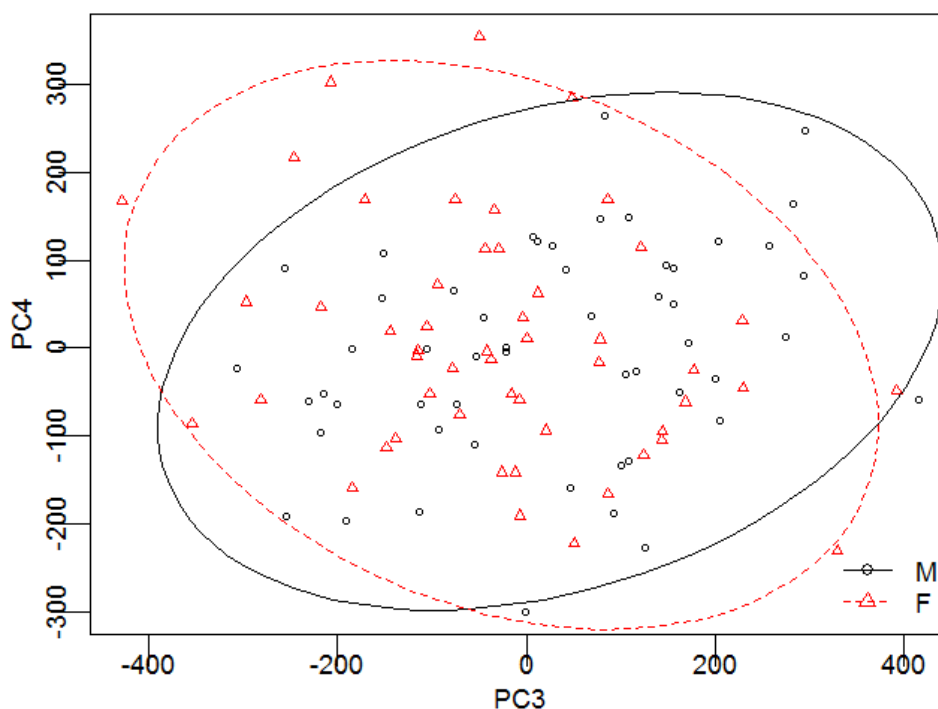
Obr. 35. Vliv třetí hlavní komponenty na formu lebky. Červená barva značí zvětšující se oblasti, modrá barva zmenšující se.

Čtvrtá hlavní komponenta zaujímá 3,97 % z celkové variability. Červené oblasti značí pohyb struktury do kladných hodnot. Jak je možné vidět na Obrázku 36, v tomto případě komponenta ovlivňuje šířku lebky právě díky projevu v oblasti *fossa temporalis* a výrazněji se projevuje na levé straně lebky. Naopak negativní projev nastává v prominenci horní čelisti a oblasti baze lební, zejména okolo *foramen magnum* a okcipitálních kondylů. Negativní vliv komponenty zasahuje i na vnitřní stranu bradavkovitých výběžků.



Obr. 36. Vliv třetí hlavní komponenty na formu lebky. Červená barva značí zvětšující se oblasti, modrá barva zmenšující se.

Vzájemný vliv třetí a čtvrté hlavní komponenty byl vizualizován pomocí scatter plotu. Na Obrázku 37 můžeme pozorovat rozložení žen a mužů v našem souboru podle třetí a čtvrté hlavní komponenty. Obě kategorie dosahují stejných hodnot na ose čtvrté hlavní komponenty, ale v různé hodnotě komponenty třetí. Ženy dosahují této hodnoty při negativnější hodnotě PC3, muži naopak při pozitivnější.



Obr. 37. Graf rozložení jedinců podle třetí a čtvrté hlavní komponenty. PC3 – třetí hlavní komponenta, PC4 – čtvrtá hlavní komponenta, M – muži, F - ženy.

5.1.2.1 Vizualizace prvních čtyř hlavních komponent

V této podkapitole jsou vizualizovány extrémní projevy prvních čtyř komponent (Obr. 38-41), které jsou v analýze formy signifikantní. V programu Morphome3cs byly zvoleny hraniční hodnoty PCA skóre -1000 a 1000 pro extrémní projevy dané hlavní komponenty. Nula na škále komponenty vždy vizualizovala průměrného jedince ve zkoumaném souboru. Na následujících obrázcích je negativní projev (záporné hodnoty komponenty) vždy vlevo a pozitivní projev (kladné hodnoty komponenty) vždy vpravo.



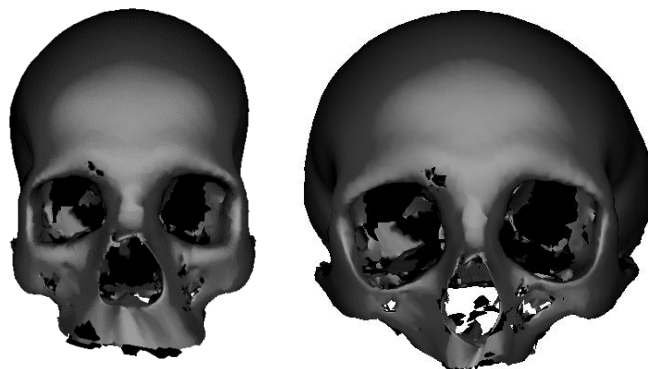
Obr. 38. Extrémní projev PC1. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 39. Extrémní projev PC2. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 40. Extrémní projev PC3. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.



Obr. 41. Extrémní projev PC4. Vlevo negativní projev a vpravo pozitivní.

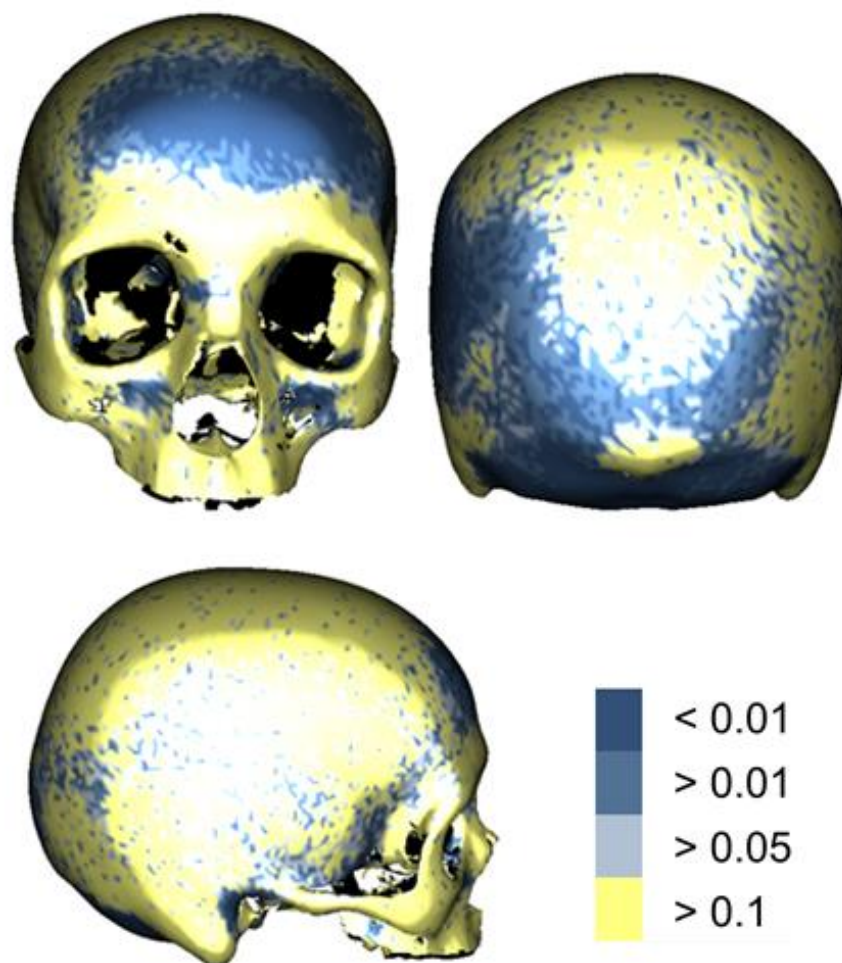
5.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu

Tato část výsledků je věnována hodnocení pohlavního dimorfismu. Pohlavní dimorfismus mezi muži a ženami našeho souboru byl zkoumán pomocí analýzy „srovnání skupin“ (Compare groups), taktéž v samotném tvaru a ve formě. První podkapitola se věnuje analýze tvaru, druhá se věnuje analýze formy.

5.2.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu tvaru

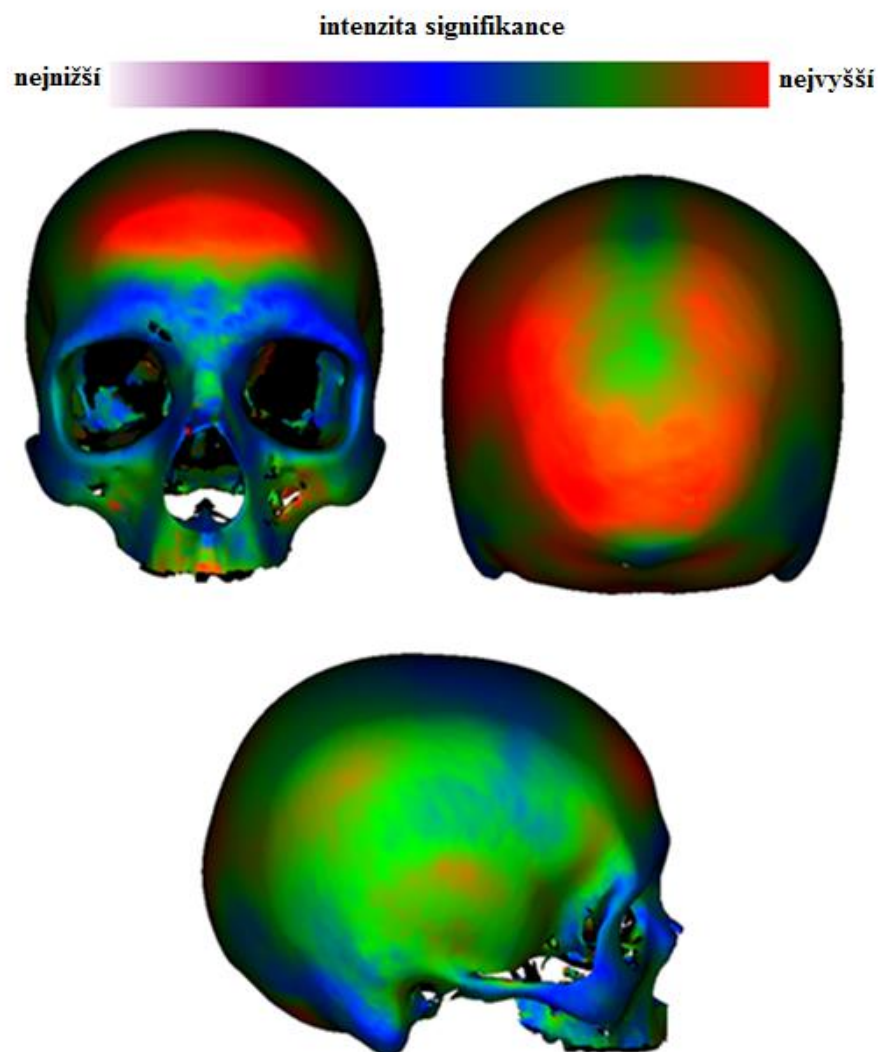
Na následujících stránkách bude zobrazen pohlavní dimorfismus našeho souboru několika přístupy, které k zobrazení nabízí program Morphome3cs. Tato kapitola se bude zabývat pohlavním dimorfismem tvaru, tedy analýzou tvarových rozdílů, po odškálování velikosti. Data jsou výstupem analýzy Compare groups, kdy jsou porovnávány lebky mužské a ženské vůči sobě.

Nejprve došlo k vizualizaci oblastí, které vykazují signifikantní hodnoty pro pohlavní dimorfismus. Vizualizace byla provedena pomocí analýzy Shell distance significance (Obr. 42), která pracuje s p-hodnotami pro danou oblast. Byla stanovena škála síly signifikance, která byla použita ke konstrukci barevné mapy promítnuté na lebku, kde byly barevně rozlišeny oblasti lebky s rozdílnou signifikancí. Žlutá barva odpovídala p-hodnotě větší než 0,1 – tudíž nesignifikantní oblast. Tři odstíny modré barvy odpovídaly již signifikantním místům, kdy p-hodnota byla nižší než hladina významnosti 0,05. Čím tmavší modrá barva, tím signifikantně silnější oblast. Významné oblasti v analýze tvaru byly tedy zejména oblast čela a oblast okcipitální kromě *protuberantia occipitalis externa*.



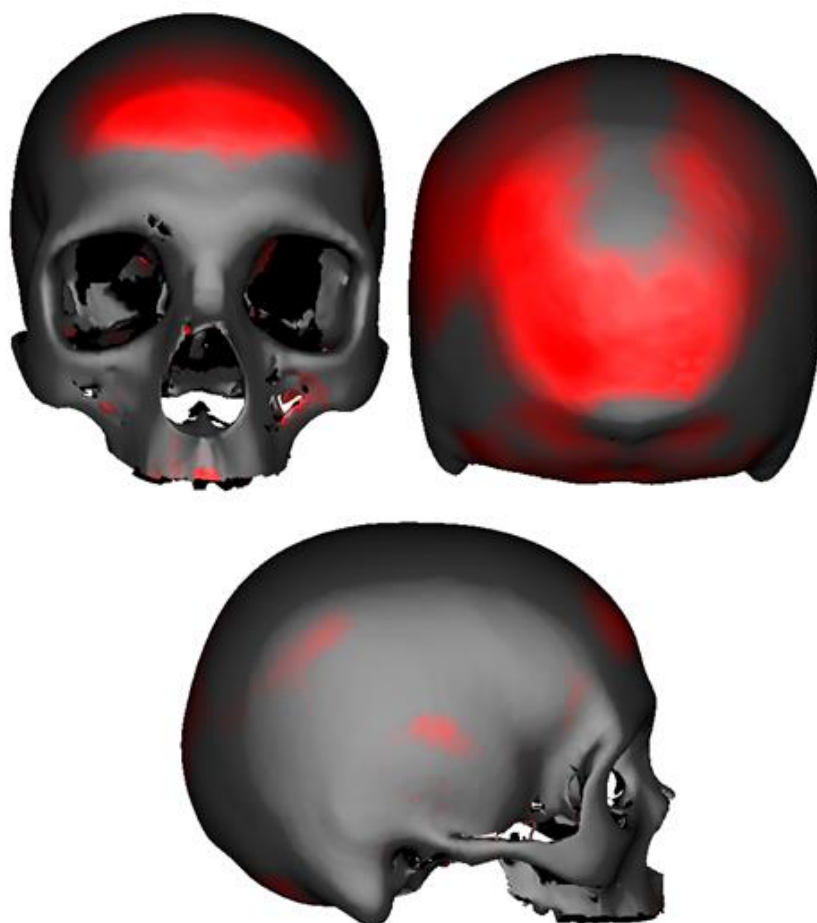
Obr. 42. Zobrazení signifikantních oblastí pro pohlavní dimorfismus pomocí Shell distance signifikance. Škála vpravo odpovídá p-hodnotám. Čím tmavší modrá barva, tím signifikantně silnější oblast.

Signifikance pohlavního dimorfismu byla vizualizovaná také pomocí zobrazení Happy heat map. Toto zobrazení nabízí podrobnější a přehlednější zobrazení signifikantních oblastí. Škála v horní části obrázku (Obr. 43) značí sílu signifikance, která vzrůstá zleva doprava. Studené barvy (fialová, modrá a zelená) jsou nejméně signifikantní a s přechodem k teplému barevnému spektru (oranžová, červená) dochází ke zvyšování signifikance. Týká se to zejména oblasti čela a okcipitální oblasti kromě *protuberantia occipitalis externa*.



Obr. 43. Zobrazení signifikantních oblastí pro pohlavní dimorfismus pomocí Happy heat map.

Pro celkovou přehlednost analýzy tvaru jsou na Obrázku 44 vizualizovány pomocí zobrazení Distance of means pouze signifikantní oblasti. Ty jsou na obrázku viditelné červenou barvou. Čím sytější červená barva, tím vyšší hodnota signifikance. Jedná se tedy zejména o oblasti mezi čelními hrboly, týlní oblast nad i pod *protuberantia occipitalis externa* a oblast temenní.



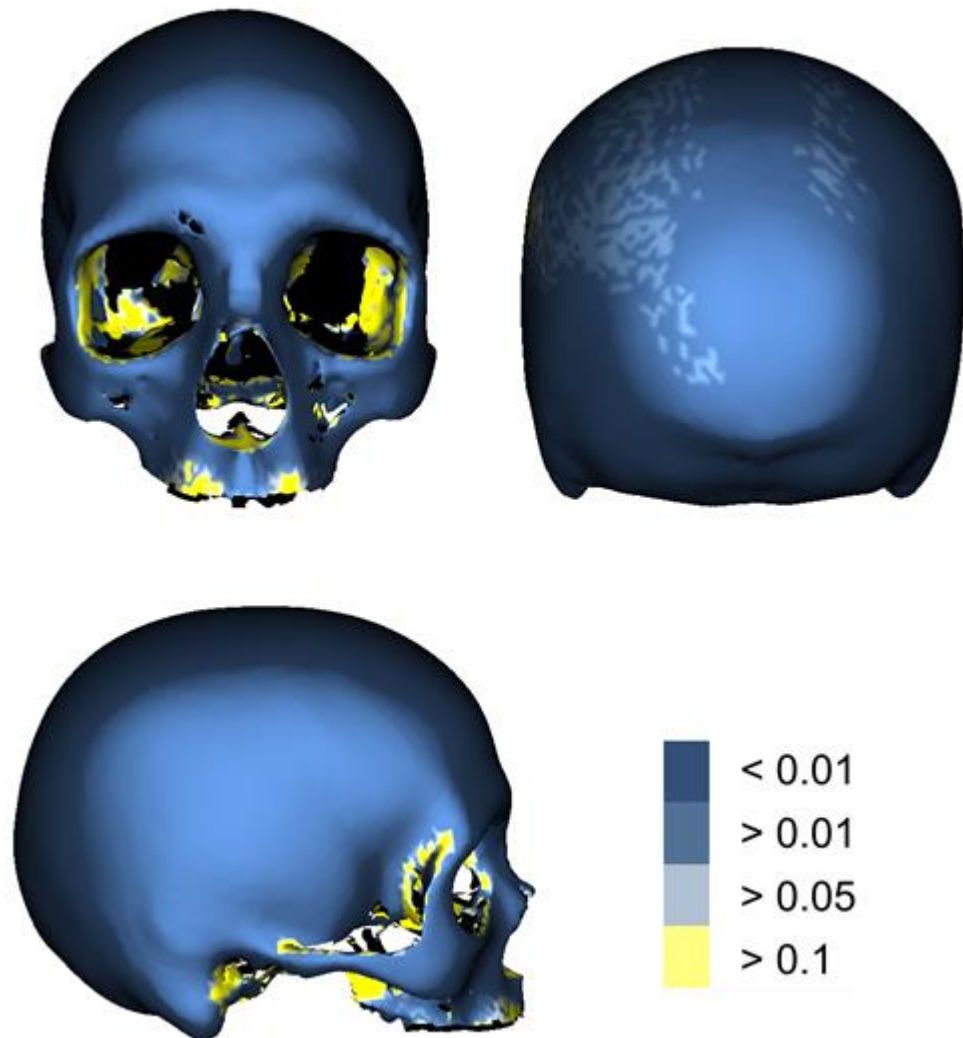
Obr. 44. Zobrazení signifikantních oblastí pro pohlavní dimorfismus pomocí Distance of means. Červená barva značí signifikantní oblasti.

5.2.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu formy

Na následujících stránkách bude zobrazen pohlavní dimorfismus našeho souboru několika přístupy, které k zobrazení nabízí program Morphome3cs. Tato kapitola se bude zabývat pohlavním dimorfismem formy, tedy analýzou jak tvarových rozdílností, tak i velikostních. Data jsou výstupem analýzy Compare groups, kdy jsou porovnávány lebky mužské a ženské vůči sobě.

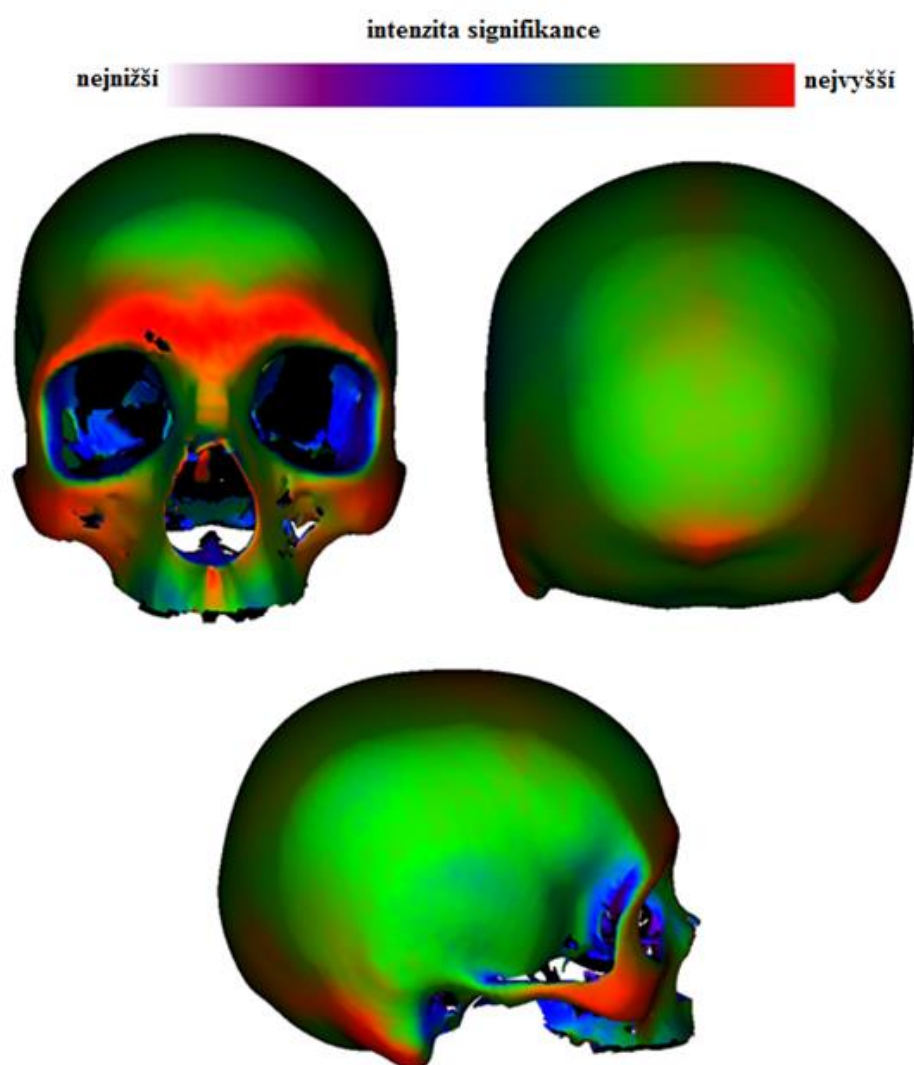
Prvním zobrazením v analýze formy, které bylo využito je Shell distance significance (Obr. 45). Toto zobrazení nám říká, jak silně signifikantní pro studium pohlavního dimorfismu jsou jednotlivé části lebky. Vizualizace pracovala s p-hodnotami pro danou oblast. Byla stanovena škála síly signifikance, podle které následně došlo k barevnému rozlišení oblastí lebky s rozdílnou signifikancí. Žlutá barva odpovídala

p-hodnotě větší než 0,1 – tudíž nesignifikantní oblast. Tři odstíny modré barvy odpovídaly již signifikantním místům, kdy p-hodnota byla nižší než hladina významnosti 0,05. Čím tmavší modrá barva, tím signifikantně silnější oblast.



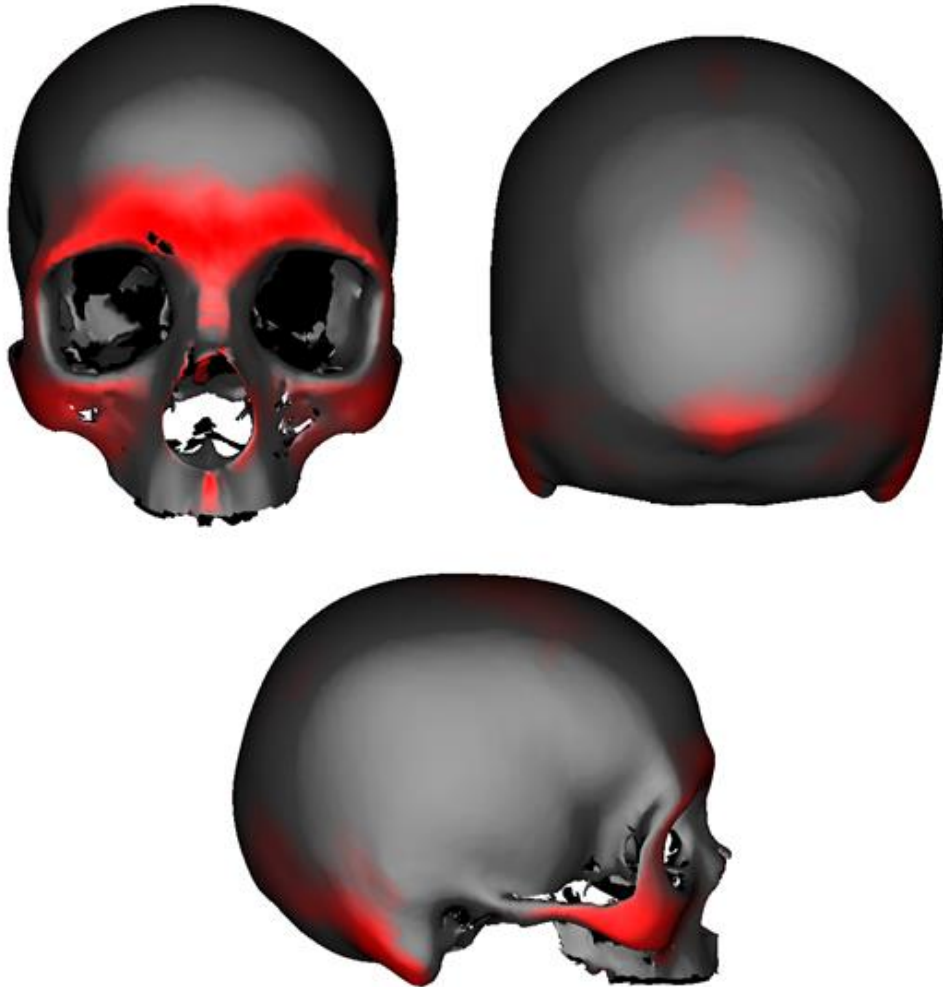
Obr. 45. Zobrazení signifikantních oblastí pro pohlavní dimorfismus pomocí Shell distance signifikance. Škála vpravo odpovídá p-hodnotám. Čím tmavší modrá barva, tím signifikantně silnější oblast.

Na Obrázku 46 je zobrazení pohlavního dimorfismu v našem souboru pomocí Happy heat map. Toto zobrazení nabízí podrobnější a přehlednější zobrazení signifikantních oblastí. Škála v horní části obrázku značí sílu signifikance, která vzrůstá zleva doprava. Studené barvy (fialová, modrá a zelená) jsou nejméně signifikantní a s přechodem k teplému barevnému spektru (oranžová, červená) dochází ke zvyšování signifikance. Červená barva na modelu lebky tedy značí oblasti nejvíce pohlavně dimorfní. Podle formy je nejvíce dimorfní oblast glabelly a nadočnicových oblouků, lícních kostí, nuchální oblast (zejména *protuberantia occipitalis externa*) a oblast bradavkovitých výběžků.



Obr. 46. Zobrazení pohlavního dimorfismu pomocí Happy heat map. Škála v horní části obrázku značí sílu signifikance.

Opět bylo pro zpřehlednění využito zobrazení je Distance of means, které způsobí zvýraznění nejvíce pohlavně dimorfních oblastí v našem souboru lebek. V tomto případě čím sytější červená barva, tím významnější oblast pohlavního dimorfismu. Jak je možné pozorovat na Obrázku 47 nejvíce pohlavně dimorfní je oblast glabelly a nadobčnicových oblouků, lícních kostí, bradavkovitého výběžku a oblast nuchální s *protuberantia occipitalis externa*.

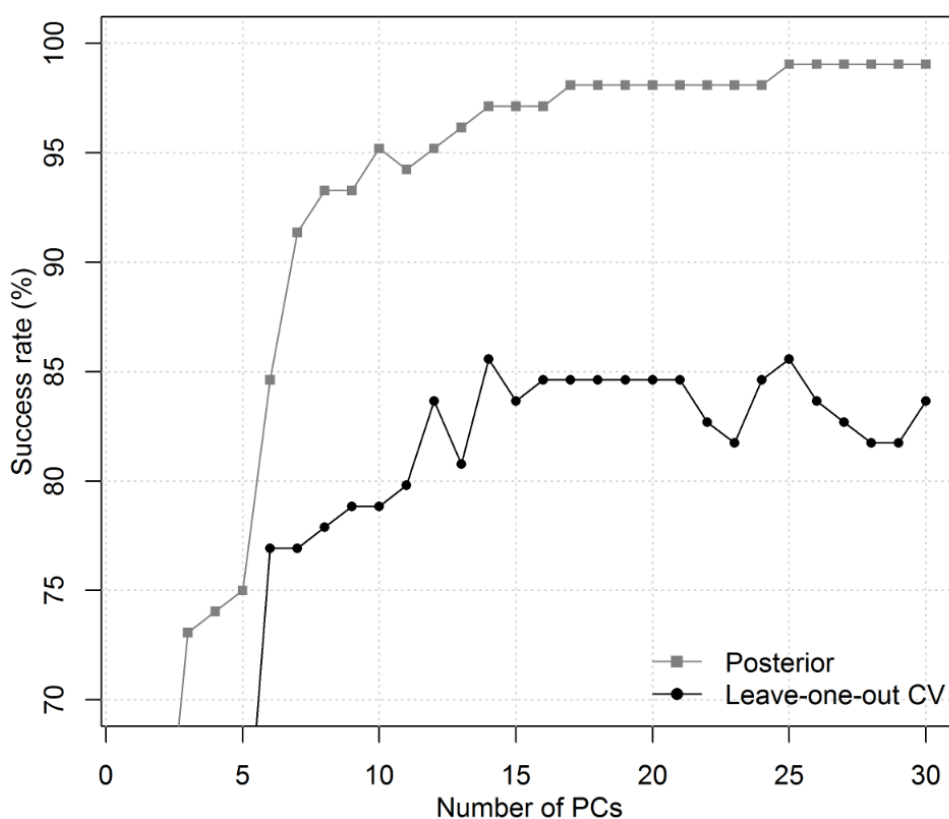


Obr. 47. Zobrazení pohlavního dimorfismu formy pomocí Distance of means.
Červená barva odpovídá nejvíce pohlavně dimorfním oblastem.

5.3 Úspěšnost predikce pohlaví podle povrchu exokrania

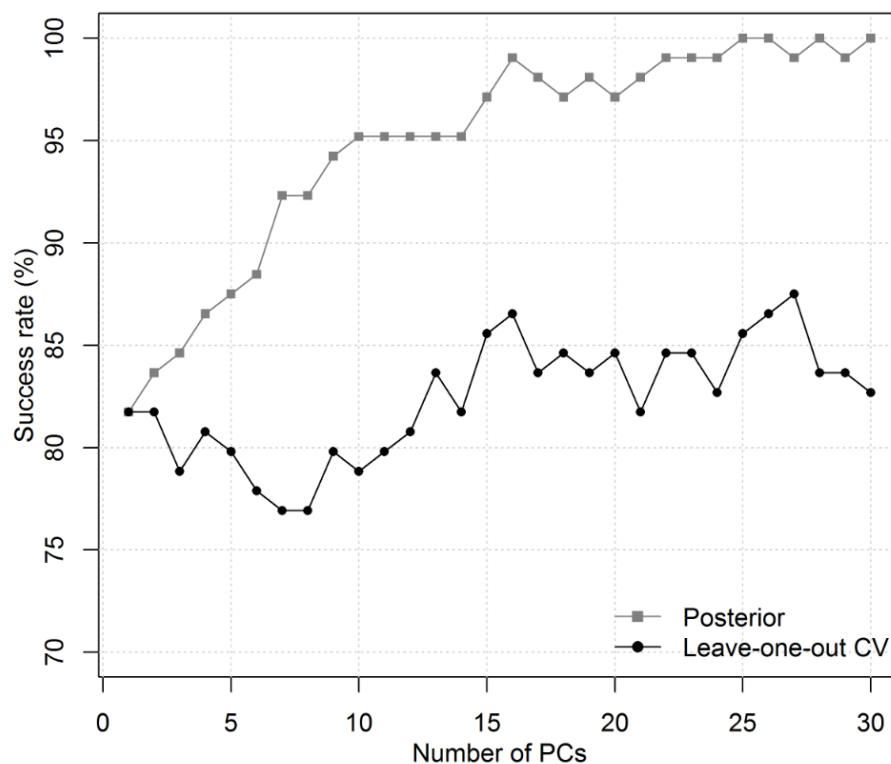
Poslední podkapitola, která uzavírá kapitolu výsledky, se věnuje celkovému výstupu odhadu pohlaví. Metoda pro odhad pohlaví předložená v této diplomové práci využívá tedy pouze povrchové sítě lebek. Z každé lebky bylo odsegmentováno endokranium pomocí metody viditelných trojúhelníků v programu Morphome3cs. Na takto upravené modely exokrania byla následně aplikována analýza hlavních komponent a analýza Support vector machine s radiálním jádrem. Dále byla aplikována leave-one-out crossvalidace. Tato metodologie byla puožita jak na tvar exokraniálních meshů, tak na formu zahrnující velikost.

Na Obrázku 48 je zobrazena úspěšnost metody v analýze tvaru. Je zapotřebí sledovat spodní křivku, na kterou byla aplikována leave-one-out crossvalidace, kdy učení metody probíhá na každém jedinci zvlášť. Díky tomu je zamezeno naučení algoritmu na soubor, jak můžeme pozorovat na vrchní křivce – tzv. posterior. Úspěšnost naší metody v analýze samotného tvaru je 85,5 % při využití 14 hlavních komponent.



Obr. 48. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví podle tvaru exokrania. Po crossvalidaci je nejvyšší úspěšnost 85,5 %.

Na Obrázku 49 je konečně graf, na kterém je zobrazena nejvyšší úspěšnost zde prezentované metody. Tato úspěšnost byla dosažena při analýze formy, kdy tedy do analýzy vstupuje jak tvar exokrania, tak jeho velikost. Po leave-one-out crossvalidaci bylo dosaženo úspěšnosti 87,5 % s využitím 27 hlavních komponent.



Obr. 49. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví podle formy exokrania. Po crossvalidaci je nejvyšší úspěšnost 87,5 %.

Tato práce se tedy zaměřila na sledování pohlavního dimorfismu současné francouzské populace. Materiálem bylo celkem 104 CT skenů, z toho 53 mužských a 51 ženských, s průměrným věkem 55,1 let. Z těchto skenů bylo tedy vysegmentovány pouze exokraniální meshe, na které byly v programu Morphome3cs aplikovány geometricko-morfometrické analýzy. Nejprve byly meshe zarovnané pomocí CPD/DCA (Dupej et al., 2014), následně byla využita analýza hlavních komponent (PCA) s analýzou Support vector machine (SVM) s radiálním jádrem a na závěr došlo k posílení pomocí leave-one-out crossvalidace. Výstupem je nový klasifikátor pro predikci pohlaví podle povrchu lebky.

6 DISKUSE

Diplomová práce se zabývá perspektivní oblastí odhadu pohlaví s využitím 3D analýzy. Zpřesnění identifikace jedince je jedno z nejzásadnějších odvětví biologické antropologie a své využití nachází jak na poli forenzní antropologie, tak bioarcheologie a dalších přidružených disciplín. Odhadem pohlaví se zabývá mnoho studií, které přicházejí s rozdílnými přístupy. Jednak mohou být metody morfoskopické (např. Ferembach, 1979, Buikstra a Ubelaker, 1994, Walrath et al., 2004), morfometrické (např. Ogawa, 2013, Ramsthaler, 2007, Walker, 2008) nebo 3D metody (např. Bookstein, 1999, Kimmerle, 2008, Franklin, 2013). Nehledě na to, s jakou vstupní informací metoda pracuje, je vždy vyžadována maximální úspěšnost. Současná geometrická morfometrie dosahuje vysoké úspěšnosti v klasifikaci mužských a ženských lebek (Abdel Fatah et al., 2014), případně i jiných částí skeletu, jako je pánev (Decker et al., 2011).

Primárním impulsem pro tuto práci byl výstup grantového projektu Jantze a kolegů (2013), následně publikovaný v *Journal of Forensic Sciences* (Abdel Fatah et al., 2014), kde představili metodu dosahující úspěšnosti 97,3 %. Této úspěšnosti dosáhli pomocí 3D analýzy endokraniálních i exokraniálních rozměrů lebky. Původním plánem diplomové práce bylo otestovat tuto metodu na evropské populaci a porovnat výsledky těchto studií ve dvou různých populacích. Po odborném nastudování problematiky jsme se však rozhodli přistoupit k metodologii odlišně. Analýza zahrnující endokranium je časově i softwarově náročnější a z praktického hlediska i méně využitelná. Proto jsme se rozhodli pracovat pouze s povrchem exokrania – tedy s vnější strukturou lebky. Taková metoda přináší značné výhody a stává se využitelnou i pro skeny snímané povrchovými skenery, ne pouze pro objemová data z počítačové tomografie.

Co se pohlavního dimorfismu týče, užitá analýza *Compare groups* v programu *Morphome3cs* aplikovaná na exokranium ukazuje, že nejvíce pohlavně dimorfní oblasti v analýze tvaru je *os frontale* zejména v oblasti mezi čelními hrboly a oblast týlní, a to zejména pod *protuberantia occipitalis externa*. Samotná *protuberantia occipitalis externa* nevykazuje v analýze tvaru signifikantní rozdíly. Naše výsledky podporuje

studie Franklina (2006), který označil zejména profil čela spolu s supramastoidálním hřebínkem a alveolárním prognatismem jako výrazně tvarově dimorfní. Také studie provedená na asijské populaci potvrzuje výrazný rozdíl ve tvaru kalvy v závislosti na pohlaví (Green a Curnoe, 2009). Naopak globální analýza provedená ve studii Abdela Fataha a kolegů (2014) souhlasí s naším výstupem pouze v dimorfismu sklonu čela. Jinak označila za nejvíce dimorfní oblast ve tvaru lebky oblast glabelly a jejího okolí. Oblast glabelly nebyla v našem případě nijak výrazně pohlavně dimorfní v závislosti na tvaru, což mohlo být způsobeno vysegmentováním endokrania.

Zhodnotíme-li formu, bez odškálování velikosti se stala převážná většina exokrania signifikantní. Nejvíce pohlavně dimorfní oblasti podle analýzy našeho souboru jsou oblast glabelly a nadočnicových oblouků, lícních kostí, bradavkovitých výběžků a oblast nuchální s *protuberantia occipitalis externa*. K naprosto stejným výsledkům došli také Abdel Fatah a kolegové (2014) v jejich globální analýze formy. Podle analýzy Thin-plate spline (TPS) je signifikantní rozdíl také v nasální apertuře, která vykazuje u mužů výrazně větší velikost (Rosas, 2002). I v našem případě jsou okraje *apertura piriformis* velmi signifikantní. Bylo tedy ověřeno, že pohlavní dimorfismus závisí především na velikosti exokrania a také že naše výstupy zejména analýzy formy se shodují se studií Abdela Fataha a kolegů (2014) navzdory vysegmentovanému endokranium. Výstup z analýzy formy se také shoduje s oblastmi, které jsou preferovány klasickými studii založenými na morfoskopickém hodnocení pohlavně dimorfních struktur lebky (Ferembach et al., 1979, Buikstra a Ubelaker, 1994, Williams a Rogers, 2006).

V poslední části výsledků je konečně prezentován klasifikátor pro odhad pohlaví lebky podle exokraniálních povrchových sítí. V analýze tvaru bylo dosaženo nejvyšší klasifikační úspěšnosti 85,5 %. V analýze formy, která je považována za silnější, neboť zahrnuje i celkovou velikost exokrania bylo dosaženo ještě lepších výsledků, a to 87,5 %. Pro porovnání například metoda Garvin a Ruffa (2012), která také pracuje s povrchovými sítěmi, ale pouze v oblasti nadočnicových oblouků a brady dosáhla po leave-one-out crossvalidaci úspěšnosti pouhých 79,8 %. Studie Abdela Fataha a kolegů (2014), která inspirovala naši metodu, dosáhla úspěšnosti klasifikace 97,3 %. Zde prezentovaná metoda se tedy pohybuje mezi těmito dvěma metodologicky podobnými studii. V našem případě mohla být úspěšnost negativně ovlivněna vysokým věkem testovaných jedinců, protože míra pohlavního dimorfismu se se zvyšujícím věkem

snižuje (Wells et al., 2007), nebo rozdílnou mírou pohlavního dimorfismu v populaci (např. Brůžek a Murail, 2006, Walker et al., 2008). Dalším, a to nejvíce pravděpodobným důvodem, proč Abdel Fatah s kolegy dosáhli vyšší úspěšnosti predikce pohlaví, je pravděpodobné odstranění endokrania. Bylo ověřeno, že právě tloušťka lebečních kostí je vysoce pohlavně dimorfní (Lynnerup et al, 2005, Ross et al., 2010, Abdel Fatah et al., 2014). Navzdory tomu, je obecně vzato námi prezentovaná metoda využitelnější, neboť není závislá pouze na velkoobjemových datech z počítačové tomografie, ale je aplikovatelná i na data snímaná dostupnějšími povrchovými skenery.

Finálním výstupem této práce je tedy nový klasifikátor pro odhad pohlaví podle lebky. Problematika jakýchkoli metod pro identifikaci jedince je velmi diskutované téma. Primárně by metoda měla být vytvořena na co největším souboru jedinců a vykazovat co nejvyšší úspěšnost – tedy co nejvyšší procento správně klasifikovaných jedinců. Nicméně pro to, aby mohla být metoda přijata v praxi, je nutná hlavně její spolehlivost. Spolehlivosti je možné dosáhnout testováním metody na nezávislých populacích a využitím crossvalidace. Funkční metoda by také měla být stejně přesný nástroj v ruce trénovaného odborníka, tak i pozorovatele s menšími zkušenostmi (Brůžek a Murail, 2006). Zde prezentovaná metoda vykazuje vysokou úspěšnost klasifikace pohlaví podle povrchu lebky a je třeba jí dále testovat na jiných populacích.

Prezentovaný klasifikátor pro odhad pohlaví podle lebky je tedy založený na 3D metodologii. V praxi bychom lebku oskenovali povrchovým skenerem, ve 3D zobrazovacím programu na lebku nenesli landmarky, anatomicky je zarovnali a korespondovali pomocí Coherent Point Drift/Dense Correspondence Analysis (CPD/DCA). Po takovém procesu se souřadnice lebky transformují analýzou hlavních komponent (PCA). Z této analýzy jsou výstupem PCA skóre, ty se následně vloží do klasifikátoru Support vector machine (SVM), který lebku zařadí do kategorie muž/žena.

7 ZÁVĚR

Předkládaná práce se zabývala pohlavním dimorfismem a metodologií pro predikci pohlaví podle exokraniálních povrchových sítí lebky. Byla zaměřena na sledování pohlavního dimorfismu současné francouzské populace. Materiálem bylo celkem 104 CT skenů, z toho 53 mužských a 51 ženských, s průměrným věkem 55,1 let. Nejprve byla hodnocena variabilita tvaru a formy vnějšího povrchu lebky. Poté byla hodnocena síla pohlavního dimorfismu a jeho projevy v souboru současné francouzské populace. V závěru byl představen nový klasifikátor pro predikci pohlaví vykazující úspěšnost 87,5 % na základě formy lebky. Výsledky jednotlivých částí jsou následující:

- Variabilita formy lebky je signifikantně vyšší než variabilita tvaru lebky. Velikost je v našem souboru nejdůležitějším kritériem.
- Statisticky významné rozdíly pro pohlavní dimorfismus byly prokázány jak ve tvaru, tak ve formě lebky. Sexuálně dimorfní rozdíly ve formě lebky byly signifikantní téměř na celém jejím povrchu.
- V analýze formy jsme prokázali signifikanci stejných oblastí pro pohlavní dimorfismus exokrania jako Abdel Fatah a kolegové (2014), bez ohledu na vysegmentované endokranium.
- Úspěšnost klasifikace dosáhla ve francouzském souboru 87,5 %. Tento výsledek se pohybuje v předpokládaném rozmezí dvou studií. Garvin a Ruff (2012) dosáhli ve své studii splanchnokrania úspěšnosti 79,8 %, Abdel Fatah a kolegové (2014) na základě endokraniálních a exokraniálních měření vytvořili vysoce úspěšný model o síle 97,3 %. Zde prezentovaná metoda se s úspěšností 87,5 % predikce pohlaví podle formy řadí mezi tyto dvě metodologicky podobné studie.

- Využití povrchového skeneru, které je pro akvizici námi modelovaných dat dostačující, je vhodné pro odhad pohlaví pomocí 3D geometrické-morfometrie a je tudíž rovnocenným nástrojem získání dat jako počítačová tomografie.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- Abdel Fatah EE, Shirley NR, Jantz RL, Mahfouz MR. 2014. Improving sex estimation from crania using a novel three-dimensional quantitative method. *Journal of Forensic Sciences* 59:590-600.
- Abdi H, Williams LJ. 2010. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2:433-459.
- Aiello L, Dean C. 1990. An introduction to human evolutionary anatomy. Academic Press.
- Ali AR, Al-Nakib LH. 2012. The value of lateral cephalometric image in sex identification. *Journal Bagh College Dentistry* 25:54-58.
- Babladi PI, Pejavar SR, Reddy M. 2014. A study of estimation of stature from footprint length. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology* 8:176-181.
- Barber N. 1995. The evolutionary psychology of physical attractiveness: Sexual selection and human morphology. *Ethology and Sociobiology* 16:395-424.
- Benecke M. 1997. DNA typing in forensic medicine and in criminal investigations: a current survey. *Naturwissenschaften* 188:181-188.
- Bidmos MA, Dayal MR. 2003. Sex determination from the talus of South African whites by discriminant function analysis. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* 24:322-328.
- Bidmos MA, Steinberg N, Kuykendall KL. 2005. Patella measurements of South African whites as sex assessors. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology* 56:69-74.
- Bigoni L, Krájíček V, Sládek V, Velemínský P, Velemínská J. 2013. Skull shape asymmetry and the socioeconomic structure of an early medieval central European society. *American Journal of Physical Anthropology* 150:349-364.

- Bookstein FL, Article F, Schafer K, Prossinger H, Seidler H, Fieder M, Stringer C, Weber GW, Arsuaga J-L, Slice DE, Rohlf FJ, Reiches W, Mariam AJ, Marcus LF. 1999. Comparing frontal cranial profiles in Archaic and Modern Homo by morphometric analysis. *The Anatomical Record* 217-224.
- Bookstein FL. 1997. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press.
- Boser BE, Guyon IM, Vapnik VN. 1992. A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the 5th Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory* 144-152.
- Breitinger E. 1937. Zur Berechnung der Körperhöhe aus den langen Gliedmaßenknochen. *Anthropologischer Anzeiger* 249-274.
- Bruzek J, Murail P. 2006. Methodology and reliability of sex determination from the skeleton. In: Schmitt A, Cunha E, Pinheiro J, editors. *Forensic Anthropology and Medicine: Complementary Sciences From Recovery to Cause of Death* 225-242.
- Bruzek J. 2002. A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology* 117:157-168.
- Brzobohatá H, Krajíček V, Horák Z, Velemínská J. 2015. Sex classification using the three-dimensional tibia form or shape including population specificity approach. *Journal of Forensic Sciences* 60:29-40.
- Buckberry JL, Chamberlain AT. 2002. Age estimation from the auricular surface of the ilium: a revised method. *American Journal of Physical Anthropology* 119:231-239.
- Buikstra JE, Ubelaker DH. 1994. *Standards for data collection from human skeletal remains: proceedings of a seminar at the Field Museum of Natural History*. AR: Arkansas Archeological Survey Fayetteville.
- Bulygina E, Mitteroecker P, Aiello L. 2006. Ontogeny of facial dimorphism and patterns of individual development within one human population. *American Journal of Physical Anthropology* 131:432-443.

- Cosmides L, Tooby J. 1994. Beyond intuition and instinct blindness: Toward an evolutionarily rigorous cognitive science. *Cognition* 50:41-77.
- Cristianini N, Shawe-Taylor J. 2000. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press.
- Cunningham MR. 1986. Measuring the physical in physical attractiveness: quasi-experiments on the sociobiology of female facial beauty. *Journal of Personality and Social Psychology* 50:925.
- Čihák R, Grim M. 2001. Anatomie 1. Druhé opravené a doplněné vydání. Grada, Praha.
- Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life, London/Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl, Leipzig oJ.
- De Paiva LAS, Segre M. 2003. Sexing the human skull through the mastoid process. *Revista do Hospital das Clinicas Sao Paulo* 58:15-20.
- Dedouit F, Telmon N, Costagliola R, Otal P, Florence LL, Joffre F, Rougé D. 2007. New identification possibilities with postmortem multislice computed tomography. *International Journal of Legal Medicine* 121:507-510.
- Demirjian A, Goldstein H, Tanner JM. 1973. A new system of dental age assessment. *Human Biology* 211-227.
- DiGangi EA, Hefner JT. 2013. Ancestry Estimation. In: *Research Methods in Human Skeletal Biology* 117-149.
- Dkhar W. 2014. Radiological age and sex determination from sternum. *International Journal of Scientific Research* 3:1-3.
- Dupej J, Krajíček V, Pelikán J. 2015. Low-rank matrix approximations for Coherent point drift. *Pattern Recognition Letters* 52:53-58.
- Elliott M, Collard M. 2009. FORDISC and the determination of ancestry from cranial measurements. *Biology Letters* 5:849-852.

- Emlen T, Oring L. 1977. Ecology, sexual selection, and the evolution of mating systems. *Science*. 19:215-223.
- Ferembach D, Schwidetzky I, Stloukal M. 1979. Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 6:7-45.
- Ferrario VF, Sforza C, Pizzini G, Vogel G, Miani A. 1993. Sexual dimorphism in the human face assessed by euclidean distance matrix analysis. *Journal of Anatomy* 183:593-600.
- Filipek PA, Richelme C, Kennedy DN, Caviness VS. 1994. The young adult human brain: an MRI-based morphometric analysis. *Cerebral cortex* 4:344-360.
- Franklin D, Cardini A, Flavel A, Kuliukas A. 2013. Estimation of sex from cranial measurements in a Western Australian population. *Forensic Science International* 229:158.e1-158.e8.
- Franklin D, Freedman L, Milne N, Oxnard CE. 2006. A geometric morphometric study of sexual dimorphism in the crania of indigenous southern Africans. *South African Journal of Science* 102:229-238.
- Frazer DW, Wolpoff MH. 1985. Sexual Dimorphism. *Annual Review of Anthropology* 14:429-473.
- Furey TS, Cristianini N, Duffy N, Bednarski DW, Schummer M, Haussler D. 2000. Support vector machine classification and validation of cancer tissue samples using microarray expression data. *Bioinformatics*, 16:906-914.
- Gapert R, Black S, Last J. 2009. Sex determination from the foramen magnum: Discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century British sample. *International Journal of Legal Medicine* 123:25-33.
- Garvin HM, Ruff CB. 2012. Sexual dimorphism in skeletal browridge and chin morphologies determined using a new quantitative method. *Annual Review of Anthropology* 147:661-670.

- Garvin HM, Sholts SB, Mosca LA. 2014. Sexual dimorphism in human cranial trait scores: Effects of population, age, and body size. *Annual Review of Anthropology* 154:259-269.
- Gonzales PN, Bernal V, Perez SI. 2009. Analysis of sexual dimorphism of craniofacial traits using geometric morphometric techniques. *International Journal of Osteoarchaeology*.
- Grabherr S, Cooper C, Ulrich-Bochsler S, Uldin T, Ross S, Oesterhelweg L, Bolliger S, Christe A, Schnyder P, Mangin P, Thali MJ. 2009. Estimation of sex and age of “virtual skeletons” - A feasibility study. *European Radiology* 19:419-429.
- Green H, Curnoe D. 2009. Sexual dimorphism in Southeast Asian crania: A geometric morphometric approach. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology* 60:517-534.
- Guyomarc’h P, Bruzek J. 2011. Accuracy and reliability in sex determination from skulls: A comparison of Fordisc 3.0 and the discriminant function analysis. *Forensic Science International* 208:30-35.
- Hefner JT. 2009. Cranial nonmetric variation and estimating ancestry. *Journal of Forensic Sciences* 54:985-995.
- Introna F, Di Vella G, Campobasso C Pietro. 1998. Sex determination by discriminant analysis of patella measurements. *Forensic Science International* 95:39-45.
- Işcan MY, Loth SR, King CA, Shihai D, Yoshino M. 1998. Sexual dimorphism in the humerus: a comparative analysis of Chinese, Japanese and Thais. *Forensic Science International* 98:17-29.
- Işcan MY, Loth SR, Wright RK. 1984. Age estimation from the rib by phase analysis: white males. *Journal of Forensic Sciences* 29:1094-1104.
- Işcan MY, Miller-Shaivitz P. 1984. Determination of sex from the tibia. *American Journal of Physical Anthropology* 64:53-57.

- Jantz RL, Mahfouz M, Shirley NR, Fatah EA. 2013. Improving sex estimation from crania using 3-dimensional CT scans (Final grant report).
- Jantz RL, Meadows Jantz L. 2000. Secular change in craniofacial morphology American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council 12:327–338.
- Jantz RL, Ousley SD. 2005. FORDISC 3: computerized forensic discriminant functions, Version 3.0. The University of Tennessee, Knoxville.
- Jolliffe I. 2002. Principal component analysis. John Wiley & Sons.
- Kemkes A, Göbel T. 2006. Metric assessment of the “mastoid triangle” for sex determination: a validation study. Journal of Forensic Sciences 51:985-989.
- Kerley ER. 1965. The microscopic determination of age in human bone. American Journal of Physical Anthropology 23:149-163.
- Kilian J, Sidlo R, Merglová V. 1981. Age determination of individuals by teeth. Ceskoslovenska patologie 17:33-42.
- Kimmerle EH, Ross A, Slice D. 2008. Sexual dimorphism in America: Geometric morphometric analysis of the craniofacial region. Journal of Forensic Sciences 53:54-57.
- Klales AR, Ousley SD, Vollner JM. 2012. A revised method of sexing the human innominate using Phenice’s nonmetric traits and statistical methods. American Journal of Physical Anthropology 149:104-114.
- Klepinger LL, Katz D, Micozzi MS, Carroll L. 1992. Evaluation of cast methods for estimating age from the os pubis. Journal of Forensic Sciences 37:763-770.
- Konigsberg LW, Algee-Hewitt BFB, Steadman DW. 2009. Estimation and evidence in forensic anthropology: Sex and race. American Journal of Physical Anthropology 139:77-90.

- Korabečná M. 2014. Možnosti molekulárně genetického stanovení věku jednotlivce z biologických stop. *Soudní lékařství* 59:52-54.
- Koudelová J, Dupej J, Brůžek J, Sedlak P, Velemínská J. 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.
- Krishan K. 2008. Estimation of stature from cephalo-facial anthropometry in north Indian population. *Forensic Science International* 181:1-6.
- Krogman WM, Iscan MY. 1986. *The human skeleton in forensic medicine*. Springfield: Charles C. Thomas.
- L'Abbé EN, Van Rooyen C, Nawrocki SP, Becker PJ. 2011. An evaluation of non-metric cranial traits used to estimate ancestry in a South African sample. *Forensic Science International*.
- Lee U, Jung G, Choi S, Kim Y. 2014. Anthropological age estimation with bone histomorphometry from the human clavicle. *Anthropologist* 17:929-936.
- Lestrel PE, Cesar RM, Takahashi O, Kanazawa E. 2005. Sexual dimorphism in the Japanese cranial base: A fourier-wavelet representation. *American Journal of Physical Anthropology* 128:608-622.
- Lettre G. 2009. Genetic regulation of adult stature. *Current Opinion in Pediatrics* 21:515-522.
- Lewis ME. 2007. *The bioarchaeology of children: perspectives from biological and forensic anthropology*. Cambridge University Press.
- Lieberman DE, McBratney BM, Krovitz G. 2002. The evolution and development of cranial form in *Homo sapiens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99:1134-1139.
- Lovejoy C. 1988. Evolution of human walking. *Scientific American* 259:118-125.

- Lovell NC. 1989. Test of Phenice's technique for determining sex from the os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 79:117-120.
- Lynnerup N, Astrup JG, Sejrsen B. 2005. Thickness of the human cranial diploe in relation to age, sex and general body build. *Head & face medicine*.
- Maat GJR, Mastwijk RW, Van Der Velde EA. 1997. On the reliability of non-metrical morphological sex determination of the skull compared with that of the pelvis in The Low Countries. *International Journal of Osteoarchaeology* 7:575-580.
- MacLaughlin SM, Bruce MF. 1990. The accuracy of sex identification in European skeletal remains using the phenice characters. *Journal of Forensic Sciences* 35:1384-1392.
- Mahfouz M, Badawi A, Merkl B, Fatah EEA, Pritchard E, Kesler K, Moore M, Jantz R, Jantz L. 2007. Patella sex determination by 3D statistical shape models and nonlinear classifiers. *Forensic Science International* 173:161-170.
- Mahfouz MR, Merkl BC, Abdel Fatah EE, Booth Jr R, Argenson JN. 2007. Automatic methods for characterization of sexual dimorphism of adult femora: distal femur. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 10:447-456.
- Mall G, Hubig M, Büttner A, Kuznik J, Penning R, Graw M. 2001. Sex determination and estimation of stature from the longbones of the arm. *Forensic Science International* 117:23-30.
- Martin R, Saller K. 1959. *Lehrbuch der Antropologie*. Stuttgart: Gustav Fisher.
- Martínez-Abadías N, Paschetta C, de Azevedo S, Esparza M, González-José R. 2009. Developmental and genetic constraints on neurocranial globularity: Insights from analyses of deformed skulls and quantitative genetics. *Evolutionary Biology* 36:37-56.
- Meindl RS, Lovejoy CO. 1985. Ectocranial suture closure: a revised method for the determination of skeletal age at death based on the lateral-anterior sutures. *American Journal of Physical Anthropology* 68:57-66.

- Meissner C, Ritz-Timme S. 2010. Molecular pathology and age estimation. *Forensic Science International* 203:34-43.
- Merglová V. 1981. K problematice určování stáří jedince podle chrupu. *Soudní lékařství*.
- Merritt CE. 2014. The Influence of Body Size on Adult Skeletal Age Estimation Methods. *American Journal of Physical Anthropology*.
- Moore FR, Coetzee V, Contreras-Garduño A. 2013. Cross-cultural variation in women's preferences for cues to sex-and stress-hormones in the male face. *Biology Letters*.
- Moorrees C, Fanning EA, Hunt EE. 1963. Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research* 42:1490-1502.
- Moss ML. 1968. A theoretical analysis of the functional matrix. *Acta Biotheoretica* 18:195-202.
- Myronenko A, Song X, Carreira-Perpiñán MÁ. 2007. Non-rigid point set registration: Coherent Point Drift. *Advances in Neural Information Processing Systems* 19:1009-1016.
- Myronenko A, Song X. 2010. Point Set Registration: Coherent Point Drift. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32:2262-2275.
- Naito E, Dewa K, Yamanouchi H, Kominami R. 1994. Sex typing of forensic DNA samples using male-and female-specific probes. *Journal of Forensic Sciences* 39:1009-1017.
- Nikita E. 2012. Age-associated variation and sexual dimorphism in adult cranial morphology: implications in anthropological studies. *International Journal of Osteoarchaeology*.
- Novotný V. 1986. Sex determination of the pelvic bone: a system approach. *Anthropologie (Brno)* 24:197-206.

- O'Connor JJM, Fraccaro PJ, Pisanski K, Tigue CC, O'Donnell TJ, Feinberg DR. 2014. Social dialect and men's voice pitch influence women's mate preferences. *Evolution and Human Behavior* 35:368-375.
- Ogawa Y, Imaizumi K, Miyasaka S, Yoshino M. 2013. Discriminant functions for sex estimation of modern Japanese skulls. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 20:234-238.
- O'Higgins P, Dryden IL. 1993. Sexual dimorphism in hominoids: further studies of craniofacial shape differences in Pan, Gorilla and Pongo. *Journal of Human Evolution* 24:183-205.
- Ohtani S. 1995. Estimation of age from the teeth of unidentified corpses using the amino acid racemization. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology* 16:238-242.
- Ousley SD, Jantz RL. 1996. FORDISC 2.0. Personal computer forensic discriminant functions. University of Tennessee, Knoxville, TN.
- Ousley SD, Jantz RL. 2013. Fordisc 3: Third generation of computer-aided forensic anthropology. *Rechtsmedizin* 23:97-99.
- Pandey N, Roshan S, Kharate R, Sonawane M. 2014. Prediction of stature based on foot length. *Journal of Nobel Medical College* 3:66-70.
- Pawlowski B, Jasienska G. 2005. Women's preferences for sexual dimorphism in height depend on menstrual cycle phase and expected duration of relationship. *Biological Psychology* 70:38-43.
- Perez SI, Bernal V, Gonzalez PN. 2006. Differences between sliding semi-landmark methods in geometric morphometrics, with an application to human craniofacial and dental variation. *Journal of Anatomy* 208:769-784.
- Phenice TW. 1969. A newly developed visual method of sexing the os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 30.2: 297-301.

- Ramsthaler F, Kettner M, Gehl A, Verhoff M. 2010. Digital forensic osteology: Morphological sexing of skeletal remains using volume-rendered cranial CT scans. *Forensic Science International* 195:148-152.
- Ramsthaler F, Kreutz K, Verhoff M. 2007. Accuracy of metric sex analysis of skeletal remains using Fordisc based on a recent skull collection. *International Journal of Legal Medicine* 121:477-482.
- Rhodes G, Hickford C, Jeffery L. 2000. Sex-typicality and attractiveness: are supermale and superfemale faces super-attractive? *British Journal of Psychology*, London, England 125-140.
- Richtsmeier JT, Aldridge K, DeLeon VB, Panchal J. 2006. Phenotypic integration of neurocranium and brain. *Journal of Experimental Zoology. Part B: Molecular and Developmental Evolution* 306:1-7.
- Ritz S, Schütz, HW, Peper C. 1993. Postmortem estimation of age at death based on aspartic acid racemization in dentin: its applicability for root dentin. *International Journal of Legal Medicine* 105:289-293.
- Rogers TL. 2005. Determining the sex of human remains through cranial morphology. *Journal of Forensic Sciences* 50:493-500.
- Rosas A, Bastir M. 2002. Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology* 117:236-245.
- Ross AH, Slice DE, Williams SE. 2010. Geometric morphometric tools for the classification of human skulls (Final grant report).
- Santos M, Mart N, Esparza M, Sjøvold T, Gonz R, Hern M, Klingenberg CP. 2011. Pervasive genetic integration directs the evolution of human skull shape. *Evolution* 66:1010-1023.

- See MS, Roberts C, Nduka C. 2008. Age-and gravity-related changes in facial morphology: 3-dimensional analysis of facial morphology in mother-daughter pairs. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 66:1410-1416.
- Shine R. 1989. Ecological causes for the evolution of sexual dimorphism: a review of the evidence. *The Quarterly Review of Biology* 64:419-461.
- Scheuer L, Black S, Cunningham C. 2000. *Developmental juvenile osteology*. Academic Press.
- Scheuer L. 2002. Application of osteology to forensic medicine. *Clinical Anatomy* 15:297-312.
- Sidler M, Jackowski C, Dirnhofer R, Vock P, Thali M. 2007. Use of multislice computed tomography in disaster victim identification - advantages and limitations. *Forensic Science International* 169:118-128.
- Skrinda I, Krama T, Kecko S, Moore FR, Kaasik A, Meija L, Lietuvielis V, Rantala MJ, Krams I. 2014. Body height, immunity, facial and vocal attractiveness in young men. *Naturwissenschaften* 101:1017-1025.
- Slatkin M. 1984. Ecological causes of sexual dimorphism. *Evolution* 38:622-630.
- Spradley MK, Jantz RL, Robinson A, Peccerelli F. 2008. Demographic change and forensic identification: problems in metric identification of hispanic skeletons. *Journal of Forensic Sciences* 53:21-28.
- Spradley MK, Jantz RL. 2011. Sex estimation in forensic anthropology: skull versus postcranial elements. *Journal of Forensic Sciences* 56:289-296.
- Stalling D, Westerhoff M, Hege HC. 2005. Amira: A highly interactive system for visual data analysis. *The visualization handbook*.
- Stinson S. 2012. Growth variation: biological and cultural factors. *Human Biology: An Evolutionary and Biocultural Perspective, Second Edition* 587-635.

- Stone AC, Milner GR, Paäbo S, Stoneking M. 1996. Sex determination of ancient human skeletons using DNA. *American Journal of Physical Anthropology* 99:231-238.
- Suazo Galdames IC, Zavando Matamala DA, Smith RL. 2009. Performance evaluation as a diagnostic test for traditional methods for forensic identification of sex. *International Journal of Morphology* 27:381-386.
- Tague RG, Lovejoy CO. 1986. The obstetric pelvis of AL 288-1 (Lucy). *Journal of Human Evolution* 15:237-255.
- Thali MJ, Braun M, Buck U, Aghayev E, Jackowski C, Vock P, Dirnhofer R. 2005. VIRTOPSY - scientific documentation, reconstruction and animation in forensic: individual and real 3D data based geo-metric approach including optical body/object surface and radiological CT/MRI scanning. *Journal of Forensic Sciences* 50:428-42.
- Thali MJ, Yen K, Vock P, Ozdoba C, Kneubuehl BP, Sonnenschein M, Dirnhofer R. 2003. Image-guided virtual autopsy findings of gunshot victims performed with multi-slice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) and subsequent correlation between radiology and autopsy findings. *Forensic Science International* 138:8-16.
- Thornhill R, Gangestad S. 1999. Facial attractiveness. *Trends in cognitive sciences* 3:452-460.
- Thornhill R, Gangestad SW. 1993. Human facial beauty. *Human nature* 4:237-269.
- Torimitsu S, Makino Y, Saitoh H, Sakuma A, Ishii N, Hayakawa M, Yajima D, Inokuchi G, Motomura A, Chiba F, Iwase H. 2014. Stature estimation in Japanese cadavers based on pelvic measurements in three-dimensional multidetector computed tomographic images. *International Journal of Legal Medicine* 1-7.
- Trotter M, Glesser GC. 1952. Estimation of stature from long bones of American whites and Negroes. *American Journal of Physical Anthropology* 10:463-514.

- Tsuji A, Ishiko A, Takasaki T, Ikeda N. 2002. Estimating age of humans based on telomere shortening. *Forensic Science International* 126:197-199.
- Ubelaker DH. 1998. Book review: *FORDISC 2.0: personal computer forensic diskriminant functions*. Stephen D. Ousley and Richard L. Jantz, Forensic Anthropology Center, Department of Anthropology, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, 1996.
- Uhl NM. 2012. Age at death. In: DiGangi EA, Moore MK, editors. *Research methods in human skeletal biology*. Academic Press 63-90.
- Verhoff M, Ramsthaler F, Krähahn J, Deml U, Gille RJ, Grabherr S, Thali MJ, Kreutz K. 2008. Digital forensic osteology - possibilities in cooperation with the Virtopsy® project. *Forensic Science International* 174:152-156.
- Vystrčilová M, Novotný V. 2000. Estimation of age at death using teeth. *Variability and Evolution* 8:39-49.
- Walker PL. 2008. Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *American Journal of Physical Anthropology* 136:39-50.
- Walker RA, Lovejoy CO. 1985. Radiographic changes in the clavicle and proximal femur and their use in the determination of skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology* 68:67-78.
- Walrath D. 2003. Rethinking Pelvic Typologies and the Human Birth Mechanism. *Current Anthropology* 44:5-31.
- Walrath DE, Turner P, Bruzek J. 2004. Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination. *American Journal of Physical Anthropology* 125:132-137.
- Wells JCK, Treleaven P, Cole TJ. 2007. BMI compared with 3-dimensional body shape: The UK national sizing survey. *American Journal of Clinical Nutrition* 85:419-425.

- Willems G, Olmen A Van, Spiessens B, Carels C, Spiessens B, Carels C. 2001. Dental age estimation in Belgian children: Demirjian's technique revisited. *Journal of Forensic Sciences* 893-895.
- Williams B, Rogers TL. 2006. Evaluating the accuracy and precision of cranial morphological traits for sex determination. *Journal of Forensic Sciences* 51:729-735.
- Wold S, Esbensen K, Geladi P. 1987. Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 2:37-52.
- Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD. 2012. *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. Academic Press.
- Zhang H, Sheffer A, Cohen-Or D, Zhou Q, van Kaick O, Tagliasacchi A. 2008. Deformation-driven shape correspondence. *Eurographics Symposium on Geometry Processing* 27:1431-1439.