Original Article

3D printed educational models for anatomy and embryology: Higher quality and lower cost

Lotfi P[1], Paymard M[2], Mirsafi Niasar MA[2], Rafiyan M[2], Azami-Tameh A[3], Naderian H[3*]

1- Department of Anatomical Science, Faculty of Medicine, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I.R. Iran.
2- Student Research Committee, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I.R. Iran.
3- Anatomical Science Research Center, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I.R. Iran.

Received: 2022/03/14 | Accepted: 2022/09/10

Abstract:

Background: Learning anatomy and promoting practical skill and abilities constitute an important part of medical curriculum. 3D printer models are regarded as a suitable substitute in terms the variety, handling, low weight and cost compared to other models. The most important goals of this project included producing a correct and successful of scanning, receiving the processed output and the 3D printing of the high quality educational models with lower cost.

Materials and Methods: Two anatomical models of larynx and pancreas and two fetal models were 3D scanned. Using 3D software, the scanned pictures were processed base on the type, density percentage, size, number of outer layers and the supporting structure. The output files with layered melting PLA filament 3D printing in sizes of 100%, 75% and 50%

Results: The details of 3D print models of the larynx and pancreas, including the cartilages, muscles, ducts, vessels and nerves were similar to the original models. The features of embryo models, included pharyngeal arches and clefts, somites, visual and auditory vesicles, cardiac swelling, and limb bud are similar to original models. The weight of 3D models was found to be one-third to one-tenth also the cost of 3D printing is 1% to 3% of the original models.

Conclusion: 3D printing models have better quality and low cost in comparison of original models. The 3D scanning, processing and printing technology allows the provision of quality practical classes. Students can enjoy a promoted learning due to the advantage of having access to 3D printed samples outside of the classroom, also.

Keywords: Anatomical models, Embryological models, 3D printing, 3D scanning, Anatomy education

***Corresponding Author**
Email: naderian_h@kaums.ac.ir
Tel: 0098 913 361 0661
Fax: 0098 315 588 1114

Conflict of Interests: ***No***

Feyz, Journal of Kashan University of Medical Sciences, September, 2022; Vol. 27, No 5, Pages 560-567

Please cite this article as: Lotfi P, Paymard M, Mirsafi Niasar MA, Rafiyan M, Azami-Tameh A, Naderian H. 3D Printed Educational Models for Anatomy and Embryology: Higher Quality and Lower Cost. ***Feyz*** 2022; 27(5): 560-7.

چاپ سه‌بعدی مدل‌های آموزشی آناتومی و جنین‌شناسی: کیفیت بهتر و هزینه کمتر

پروین لطفی [۱]، محمّدامین پایمرد [۲]، محمّدعلی میرصفی نیاسر [۲]، مهدی رفیعیان [۳]، ابوالفضل اعظمی طامه [۴]، همایون نادریان [۴*]

خلاصه:

سابقه و هدف: یادگیری آناتومی و ارتقای مهارت و توانمندی عملی، بخش مهمّی از برنامه درسی دانشجویان پزشکی است. مدل‌های چاپگر سه‌بعدی به‌دلیل تنوع، جابه‌جایی، وزن و هزینه کمتر، جایگزین مناسبی نسبت به مدل‌های دیگر هستند. مهم‌ترین هدف این پروژه اجرای صحیح و موفق اسکن، دریافت خروجی پردازش‌شده و نیز چاپ سه‌بعدی مدل‌های آموزشی با کیفیت و هزینه کمتر بود.

مواد و روش‌ها: دو مدل آناتومی حنجره و پانکراس و دو مدل جنین، اسکن سه‌بعدی شدند. تصاویر اسکن‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای سه‌بعدی، از نظر درصد و نوع تراکم، اندازه، تعداد لایه‌ها و ساختار حمایتی پردازش گردیدند. فایل‌های خروجی با فرآیند ذوب لایه‌ای فیلامنت PLA در اندازه‌های ۱۰۰ درصد، ۷۵ درصد و ۵۰ درصد چاپ سه‌بعدی شدند.

نتایج: جزئیات چاپ سه‌بعدی مدل‌های حنجره و پانکراس نظیر غضروف‌ها، ماهیچه‌ها، مجاری، عروق و اعصاب مشابه مدل اصلی هستند. در مدل جنینی، قوس‌ها و شکاف‌های حلقی، سومایت‌ها، حباب‌های بینایی و شنوایی، برآمدگی قلبی و جوانه اندام دارای تمام جزئیات بودند. مدل‌های سه‌بعدی از نظر وزن حدود یک‌سوم تا یک‌دهم و همچنین از نظر هزینه ۱ تا ۳ درصد مدل‌های اصلی هستند.

نتیجه‌گیری: مدل‌های چاپ سه‌بعدی هزینه کمتر و کیفیت بهتری نسبت به مدل‌های اصلی دارند. دستیابی به فناوری اسکن، پردازش، چاپ و تهیه مدل‌های سه‌بعدی سبب برگزاری بهتر کلاس‌های عملی می‌شود. دانشجویان می‌توانند نمونه‌های چاپ سه‌بعدی را در ساعت‌های خارج کلاس در اختیار بگیرند و یادگیری بهتری داشته باشند.

واژگان کلیدی: مدل‌های آناتومی، مدل‌های جنینی، چاپ سه‌بعدی، اسکن سه‌بعدی، آموزش آناتومی

دوماه‌نامه علمی - پژوهشی فیض، دوره بیست و ششم، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، صفحات ۵۶۷-۵۶۰

مقدمه

آناتومی اصلی‌ترین برنامه درسی آموزش پزشکی و با هدف ارتقای مهارت‌های بالینی فارغ‌التحصیلان رشته پزشکی و پیراپزشکی است [۱]. برای دهه‌ها آموزش آناتومی مبتنی‌بر شیوه‌های آموزش سنتی نظیر سخنرانی، استفاده از تشریح جسد، تصاویر و مدل‌های صنعتی بوده است [۳،۲]. سخنرانی و استفاده از تصاویر، شیوه رایج برنامه‌های آموزشی است که اطلاعات زیادی را در زمان محدود به فراگیران منتقل می‌کند، ولی تأثیر چندانی در ارتقای مهارت‌های عملی ندارد [۵،۴].

استفاده از جسد همواره به‌عنوان استاندارد طلایی آموزش آناتومی در برنامه آموزشی دانشجویان پزشکی مورد توجه قرار داشته است، ولی تهیه آن اغلب با محدودیت‌های اخلاقی، فرهنگی، اجتماعی، مذهبی و اقتصادی همراه می‌باشد [۶]. از طرفی ارتقای مهارت و توانمندی دانشجویان بیشتر وابسته‌به فعالیت در آزمایشگاه و کلاس‌های عملی است که تأثیر بیشتری در یادگیری دارد [۷]. فقدان کسب مهارت‌های عملی آناتومی در دوره بالینی می‌تواند به خطاهای آناتومی منجر گردد. تحقیقات نشان داده است که حدود یک‌سوم دستیاران جراحی در دانش آناتومی ضعیف هستند، همچنین سالانه بیش از هشتاد هزار مرگ در اثر خطای آناتومی اتفاق می‌افتد که اغلب به‌دلیل عدم کسب مهارت و توانمندی عملی و کاربردی آناتومی است [۸]. برنامه آموزشی آناتومی دانشجویان پزشکی در کشورهای مختلف به‌طور متوسط ۱۵۰ ساعت است که یک‌سوم آن در سالن‌های تشریح و کلاس‌های عملی مرتبط با کسب مهارت‌های عملی روی جسد و مدل‌های آناتومی می‌گذرد [۹]. برگزاری کلاس عملی فعال در آزمایشگاه برای دانشجو نیازمند مدل‌های مختلف و متنوع است، ویژگی مدل‌های آناتومی تسهیل یادگیری اوّلیه آناتومی به‌دلیل ساختاری ساده‌تر در مقایسه با ساختارهای پیچیده جسد است. مدل‌ها بر ساختار آناتومی یک ناحیه یا عضوی خاص تمرکز می‌کنند که سبب دقت و توجه دانشجو بر ناحیه موردنظر می‌شود [۱۰]. ولی مدل‌های صنعتی نیز محدودیت‌هایی دارند، بزرگ و حجیم هستند، امکان جابه‌جایی کمتری دارند، تعداد آن‌ها در آزمایشگاه

۱. کارشناس ارشد علوم تشریح، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم تشریح، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

۳. دانشجوی پزشکی، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

۴. استاد، مرکز تحقیقات علوم تشریح، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

۵. دانشیار، مرکز تحقیقات علوم تشریح، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

*نشانی نویسنده مسؤول:

گروه علوم تشریح، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

تلفن: ۰۹۱۳۳۶۱۰۶۶۱ دورنویس: ۰۳۱۵۵۸۸۱۱۱۴

پست الکترونیک: naderian_h@kaums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۶/۱۹

محدود است، تهیه مجدد آن‌ها زمان‌بر است و مهم‌تر از همه این‌که بسیار گران هستند. از طرفی ممکن است برخی از دانشکده‌ها دسترسی به جسد و یا مدل‌های صنعتی مناسب برای آموزش آناتومی را نداشته باشند. به‌جز آناتومی، در آموزش جنین‌شناسی تکامل ساختارهای جنینی مطرح است که ساختار پیچیده‌تری دارند و در صورت استفاده از مدل‌ها یادگیری آن بهتر خواهد بود. ولی مشکلات تهیه مدل‌های جنینی از آناتومی بیشتر است، زیرا از جنین طبیعی به‌دلیل ملاحظات اخلاقی نمی‌توان استفاده کرد. مدل‌های جنینی پیچیده‌تر هستند و محدودیت‌های بیشتری دارند، تهیه و تولید مدل‌های جنینی از مدل‌های آناتومی بسیار گران‌تر هستند که به همین دلیل تقریباً کلاس عملی جنین‌شناسی برای دانشجویان برگزار نمی‌شود. درصورتی که بتوان با استفاده از فناوری چاپگر سه‌بعدی مدل‌های جنین‌شناسی را تهیه نمود، آموزش جنین‌شناسی در آزمایشگاه با استفاده از مدل‌های جنینی ارتقا می‌یابد. مدل‌های چاپگر سه‌بعدی یک جایگزین مناسب از نظر تهیه سریع و آسان، تهیه به تعداد زیاد، تنوع تعداد مدل، جابه‌جایی و به‌ویژه از نظر هزینه نسبت به مدل‌های صنعتی بسیار مناسب هستند [۱۱]. برخی از مطالعات نشان داده است که گروه‌های آناتومی که از مدل‌های چاپ سه‌بعدی استفاده کرده‌اند، آن‌ها را جذاب‌تر و برای استفاده در آزمایشگاه مناسب‌تر می‌دانند [۳]. صرفنظر از آموزش آناتومی، در سه دهه گذشته چاپگرهای سه‌بعدی قابلیت‌های ویژه‌ای را در تهیه مدل‌های سه‌بعدی برای کسب مهارت‌های عملی پیش‌جراحی نشان دادند [۱۲-۱۴]. درصورتی که دانشجویان در آزمایشگاه با مدل‌های چاپگر سه‌بعدی کار آزمایشگاهی و کلاس عملی داشته باشند، مهارت و توانمندی بهتری به‌دست می‌آورند. برای تهیه مدل‌های چاپ سه‌بعدی که قابلیت آموزشی داشته باشند، اجرای صحیح و موفق سه مرحله اسکن، دریافت خروجی پردازش‌شده و نیز چاپ سه‌بعدی اهمیت دارد [۱۵]. در این پروژه با توجه به نیاز گروه آناتومی به مدل‌های آناتومی و جنینی به تهیه این مدل‌ها پرداخته و به‌همین منظور برخی از مدل‌های آناتومی و جنینی گروه آناتومی، اسکن سه‌بعدی، پردازش و سپس چاپ سه‌بعدی شده است. مهم‌ترین هدف این پروژه تهیه و تولید انواع مدل‌های ارزان، متنوع، به هر تعداد، در زمان کوتاه و در اندازه‌های مختلف است. با توجه به بررسی انجام‌شده گروه‌های آناتومی دانشکده‌های پزشکی کشور تاکنون اقدام به اجرای هر سه مرحله اسکن، خروجی قابل پردازش و چاپ سه‌بعدی مدل آناتومی و جنینی نداشته‌اند. تولید و تهیه مدل‌های سه‌بعدی می‌تواند نیاز گروه آناتومی به مدل‌های متنوع را با هزینه بسیار کمتر برآورده سازد.

مواد و روش‌ها

انتخاب نمونه‌ها: مدل‌های مختلف موجود در گروه آناتومی دانشگاه علوم پزشکی کاشان با هدف اسکن و چاپ سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. انتخاب مدل‌ها براساس خصوصیات حجمی، سطحی، سه‌بعدی، ویژگی ظاهری، تنوع ساختارهای آناتومی و کاربرد عملی آن‌ها بود. ارزیابی اوّلیه‌ای از مدل‌ها و امکان اسکن آن‌ها از زوایا و جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارزیابی اوّلیه با توجه به امکان اسکن سه‌بعدی، پردازش و چاپ سه‌بعدی دو مدل آناتومی پانکراس و حنجره و دو مدل رویان ۴هفته و ۵ماهه انتخاب گردید.

اسکن سه‌بعدی: نمونه‌های انتخاب‌شده با استفاده از اسکنر مدل EinScan-Pro ساخت کشور چین در گروه آناتومی دانشکده پزشکی دانشگاه علوم پزشکی کاشان اسکن گردید. اسکنر مورد استفاده دارای دو دوربین دیجیتال و یک دوربین رنگی می‌باشد که قبل از تصویربرداری کالیبره شد. در این مرحله با استفاده از اسکن ثابت، مدل موردنظر برای اسکن سه‌بعدی روی صفحه گردان قرار گرفت و با توجه به ویژگی‌های آن نظیر اندازه، بزرگی، وزن و جزئیات، اسکن شد. اسکن ۳۶۰ درجه برای هر مدل انجام شد و در هر ۱۲ درجه یک اسکن صورت گرفت. برای هر نمونه چندبار اسکن ۳۶۰ درجه انجام شد و هر بار مدل‌ها در جهت، زاویه و سطحی متفاوت اسکن گردیدند. فاصله اسکنر تا صفحه گردان تقریباً ۵۰ سانتی‌متر و زاویه دوربین اسکنر نسبت به سطح افق حدود ۴۵ درجه بود که بهترین تصویر را ارائه می‌داد. سپس با مشاهده تصاویر اسکن‌شده در رایانه بهترین تصویر انتخاب گردید. نرم‌افزار EinScan-Proseries_v2.7.0.6 مورد استفاده در این مطالعه، ارزیابی رایانه‌ای مدل‌ها هنگام اسکن را فراهم می‌ساخت.

پردازش: فایل‌های سه‌بعدی مدل اسکن‌شده در نرم‌افزار Simplify 3D با پروفایل +Sizan2 پردازش گردید. در این برنامه ویژگی‌های کف نمونه اسکن‌شده، موقعیت و جهت قرارگیری آن‌ها برای چاپ، اندازه، میزان و درصد تراکم، نوع تراکم، تعداد لایه‌های خارجی و جزئیات دیگر در نمایشگر ارزیابی گردید. ساختار حمایتی برای قسمت‌های مختلف هر مدل، مورد ارزیابی قرار گرفت. بهترین موقعیت مدل و نیز انتخاب زاویه ۳۰ درجه ساختار حمایتی برای چاپ تأیید گردید. با استفاده از برنامه نرم‌افزاری پس از تراز کردن تصاویر در سطح افق، تصویر نهایی در قالب فایلی با فرمت fix prj دریافت گردید. تصویر نهایی به‌دست‌آمده در نهایت MeSH شد و فایل سه‌بعدی کامل با فرمت سه‌بعدی Obj تهیه گردید. تصویر پردازش‌شده برای هر مدل به‌منظور بررسی چگونگی چاپ با سرعت متفاوت در نمایشگر رایانه‌ای چندین‌بار مشاهده گردید.

چاپ سه‌بعدی: چاپگر مورد استفاده Sizan 4 office از شرکت Sizan کاشان می‌باشد. مواد مورد استفاده در تولید مدل‌های چاپ سه‌بعدی PLA(Polylactic acid) ترموپلاستیک از شرکت Gando و رزین سفید تک‌رنگ می‌باشد. PLA با دمای ۲۰۴ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود و نازل چاپگر با قطر دهانه ۰/۵ میلی‌متر، با ارتفاع ۰/۵ میلی‌متر و با سرعت ۲۴ میلی‌متر بر ثانیه مدل را بر روی یک صفحه شیشه‌ای ۴۰ × ۴۰ سانتی‌متری چاپ می‌کند. تعداد لایه‌های خارجی هر نمونه ۵ لایه و تراکم داخلی ۱۵ درصد از نوع لانه‌زنبوری ۶ ضلعی انتخاب گردید. تعداد لایه‌ها، الگوی تخلخل و درصد تراکم برای تولید مدل‌های موردنظر مناسب است؛ با این‌حال برای تولید هر مدل امکان تغییر آن‌ها وجود دارد. در این پروژه، انتخاب موقعیت قرارگیری نمونه به‌گونه‌ای بود که حداقل میزان PLA برای ساختار حمایتی مصرف گردد.

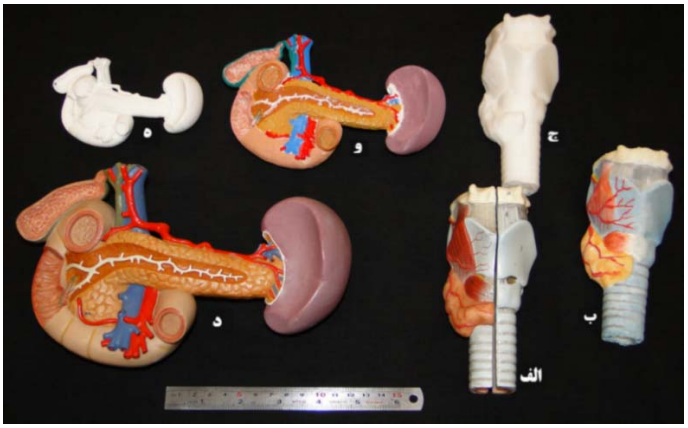
نتایج

ویژگی مدل‌ها: مدل‌های چاپگر سه‌بعدی از نظر مقایسه جزئیات و ساختارهای آناتومی نظیر استخوان، غضروف، موقعیت ماهیچه، مسیر مجاری، عروق و اعصاب در مقایسه با مدل‌های اصلی تفاوت نداشتند. تقریباً تمامی جزئیات اسکن، پردازش و چاپ شده بودند. شکل شماره ۱ نشان می‌دهد که در مدل پانکراس و طحال در هر دو اندازه ۵۰ و ۷۵ درصد موقعیت و جزئیات مربوط به سطوح پانکراس و طحال، موقعیت عروق، مسیر مجاری صفراوی و پانکراسی، مانند مدل اصلی به‌خوبی قابل مشاهده است. در مدل رنگ‌شده جزئیات مجاری و عروق کاملاً مشابه مدل اصلی می‌باشد. در مدل حنجره همه جزئیات مشابه مدل اصلی است، به‌گونه‌ای‌که در تصاویر مدل‌های اصلی و چاپ‌شده تقریباً قابل تفکیک از یکدیگر نیستند. جزئیات مهمّ عروق و اعصاب دقیقاً مشخص و قابل بررسی می‌باشند. امکان مطالعه جزئیات مدل‌های چاپ‌شده سه‌بعدی در اندازه ۷۵ و نیز ۵۰ درصد برای دانشجویان به‌خوبی وجود دارد. مدل پانکراس ۵۰ درصد در ابعاد ۶×۹ سانتی‌متر با وزن ۲۴ گرم و مدل حنجره ۱۰۰ درصد در ابعاد ۶×۱۲ سانتی‌متر با وزن ۵۲ گرم به‌خوبی قابلیت استفاده در همه‌جا را دارد (شکل شماره ۱ و جدول شماره ۱).

مدل‌های جنینی نیز با تمام جزئیات قابلیت مقایسه با مدل اصلی را دارند. موقعیت قوس‌ها، شکاف‌های حلقی، سومایت‌ها، حباب بینایی، حباب شنوایی، برآمدگی قلبی و جوانه اندام رویان ۴هفته و ۵ماهه داخل رحم به‌خوبی قابل تفکیک و مشاهده است. امکان مطالعه جزئیات مدل چاپ‌شده جنین ۴ هفته سه‌بعدی ۷۵ درصد در ابعاد ۸×۸ سانتی‌متر با وزن ۵۶ گرم و جنین ۵ ماهه سه‌بعدی ۵۰ درصد در ابعاد ۷×۸ سانتی‌متر با وزن ۲۶ گرم به‌خوبی وجود دارد (شکل شماره ۲ و جدول شماره ۱). تفاوت ظاهری در مدل‌های چاپگر سه‌بعدی در پر بودن برخی از کانال‌های کوچک عصبی و عروقی است. این مشخصه به‌دلیل کوچک بودن کانال‌ها است که در مدل‌های صنعتی نیز کانال‌های کوچک پر هستند. ارزیابی وزنی و کارایی مدل‌های چاپگر سه‌بعدی از نظر وزن نسبت به مدل‌های صنعتی اصلی در اندازه ۱۰۰ درصد حدود یک‌سوم، در اندازه ۷۵ درصد یک‌چهارم تا یک‌پنجم و در اندازه ۵۰ درصد تقریباً نزدیک یک‌دهم از مدل اصلی سبک‌تر هستند و وزن کمتری دارند (جدول شماره ۱). وزن کمتر امکان جابه‌جایی و دسترسی بهتر در استفاده از مدل را برای دانشجویان فراهم می‌سازد. وزن مدل‌ها به درصد و نوع تراکم آن‌ها، تعداد لایه‌های بیرونی و اندازه مدل‌ها بستگی دارد. درصد و نوع تراکم مدل‌ها و لایه بیرونی آن‌ها در جدول شماره ۱ دیده می‌شود. مدل‌های چاپ‌شده با نسبت ۱۰۰ درصد، ۷۵ درصد و ۵۰ درصد مدل اصلی انجام شد و مدل‌ها با تراکم ۱۵ درصد و ساختار درونی ۶ضلعی [لانه‌زنبوری) تهیه می‌شوند. در لایه بیرونی مدل‌ها با هدف استحکام بهتر از ۵ لایه استفاده گردید. در فرآیند پردازش مدل امکان تعیین اندازه مدل به هر اندازه وجود دارد. استفاده از اندازه کوچک‌تر مدل‌های چاپگر سه‌بعدی برای دانشجویان امکان جابه‌جایی بهتر، استفاده در منزل و خوابگاه و ساعت‌های خارج از کلاس را فراهم می‌کند. ارزیابی هزینه مدل‌های چاپگر سه‌بعدی: مدل‌های چاپگر سه‌بعدی هزینه‌ای به مراتب کمتر از مدل‌های صنعتی دارند که اغلب نیازمند هزینه‌های زیاد ارزی هستند. یک حلقه فیلامنت یک کیلویی چاپگر به مبلغ حدود هفتصد هزار تومان –حدود ۲۸ دلار مبنای قیمت هر دلار ۲۵/۰۰۰ تومان– در نظر گرفته شده است. یک مدل چاپگر سه‌بعدی یکصد گرمی حدود هفتاد هزار تومان (۲/۸ دلار) هزینه دارد. وزن مدل‌ها و قیمت تمام‌شده هرکدام با نسبت و تراکم مشخص‌شده در جدول شماره ۱ قابل مشاهده و محاسبه است. این در حالی است که خرید یک مدل صنعتی معمولی و ساده آناتومی نظیر حنجره یا پانکراس با هزینه ارزی کمتر از ۱۰۰ دلار مقدور نیست، مدل‌های جنین‌شناسی معمولاً از مدل‌های آناتومی گران‌تر هستند.

جدول شماره ۱- جزئیات مختلف اندازه، وزن، تراکم و هزینه مدل‌های چاپ سه‌بعدی و مقایسه آن با مدل اصلی. وزن مدل‌های چاپ سه‌بعدی یک‌سوم تا یک‌دهم سبک‌تر. هزینه مدل‌های سه‌بعدی ۱ درصد تا ۳ درصد مدل‌های اصلی می‌باشد.

مدل	اندازه نسبت‌به مدل اصلی	وزن مدل / گرم		تراکم		ساختار حمایتی			هزینه به دلار	
		چاپ سه‌بعدی	اصلی	درصد	نوع	ضخامت / میلی‌متر	زاویه / درجه	مدل اصلی	چاپ سه‌بعدی	هزینه نسبت‌به مدل اصلی
حنجره	٪۱۰۰	۵۲	۱۸۲	٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰	۱۰۰	۱/۴۵	٪۱/۴۵
پانکراس	٪۷۵	۵۱	۲۶۹	٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰	۱۵۰	۱/۴۲	٪۰/۹۴
	٪۵۰	۲۴		٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰		۰/۶۷	٪۰/۴۴
جنین ۴هفته	٪۷۵	۵۶	۱۹۵	٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰	۱۲۰	۱/۵۶	٪۱/۳
جنین ۵ماهه	٪۱۰۰	۱۰۳	۳۶۲	٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰	۱۲۰	۲/۸۸	٪۲/۴
	٪۵۰	۲۶		٪۱۵	۶ضلعی	۴	۳۰		۰/۷۲	٪۰/۶



شکل شماره ۱- مدل حنجره در اندازه ۱۰۰ درصد، الف: مدل اصلی، ب: مدل چاپ سه‌بعدی رنگ‌شده، ج: مدل چاپ سه‌بعدی تک‌رنگ مدل پانکراس و طحال د: مدل اصلی، و: مدل ۷۵ درصد چاپ سه‌بعدی رنگ‌شده، ه: مدل ۵۰ درصد چاپ سه‌بعدی تک‌رنگ. تمام جزئیات، نظیر: استخوان، غضروف، ماهیچه، عروق، مجاری و دیگر ساختارهای آناتومیک به‌خوبی دیده می‌شود. تقریباً تفاوتی بین مدل اصلی و مدل رنگ‌شده چاپ سه‌بعدی دیده نمی‌شود.

شکل شماره ۲- جنین ۴هفته الف: مدل اصلی، ب: مدل ۷۵ درصد چاپ سه‌بعدی رنگ‌شده، ج: مدل ۷۵ درصد چاپ سه‌بعدی تک‌رنگ جنین ۵ماهه د: مدل اصلی، و: مدل ۱۰۰ درصد چاپ سه‌بعدی رنگ‌شده، ه: مدل ۵۰٪ چاپ سه‌بعدی تک‌رنگ. تمام جزئیات جنینی، نظیر: قوس‌ها، شکاف‌های حلقی، سومایت‌ها، حباب بینایی، حباب شنوایی، برآمدگی قلبی و جوانه اندام مدل اصلی در مدل‌های سه‌بعدی قابل مشاهده است. مدل رنگ‌شده جنین ۴هفته (ب) بسیار مشابه مدل اصلی (الف) است.

بحث

مدل‌های چاپگر سه‌بعدی در مقایسه با مدل‌های صنعتی آناتومی و جنینی، تفاوت خاصّی در جزئیات، نظیر ویژگی‌های آناتومی استخوان، غضروف، ماهیچه‌ها، مجاری، عروق و اعصاب و ساختارهای جنینی، نظیر قوس‌ها، شکاف‌های حلقی، سومایت‌ها، حباب بینایی، حباب شنوایی، برآمدگی قلبی و جوانه اندام نداشتند. از ویژگی‌های مدل‌های چاپ سه‌بعدی؛ تنوع اندازه، وزن کم، دسترسی ساده‌تر، سهولت جابه‌جایی، استحکام، ایمنی، هزینه بسیار

کم و امکان ساخت مجدد در صورت آسیب می‌باشد [۱۶]. در کلاس‌های عملی آناتومی، دانشجویان اغلب به‌دلیل محدودیت تعداد مدل، مشاهده‌گر هستند. در بهترین شرایط حضور ۱۰ تا ۱۵ دانشجو در کلاس عملی امکان‌پذیر است. برای برگزاری کلاس عملی فعال، حداقل از هر مدل ۱۵ عدد لازم است. برای مثال: ۱۵ عدد حنجره و یا پانکراس برای کار عملی دانشجویان موردنیاز می‌باشد. معمولاً از یک ساختار آناتومی به تعداد دو تا سه عدد مدل در گروه‌های آناتومی وجود دارد. در این شرایط امکان انجام کار عملی مبتنی‌بر فعالیت دانشجو با چند مدل محدود برای همه دانشجویان وجود ندارد. چاپ سه‌بعدی از مدل‌های آناتومی می‌تواند برای برگزاری کلاس‌های عملی مبتنی‌بر فعالیت دانشجو بسیار مفید باشد. در این پروژه مدل‌های سه‌بعدی تهیه‌شده از نظر جزئیات، مشابه مدل‌های صنعتی و طبیعی بودند که تولید انبوه آن‌ها امکان تهیه مدل به تعداد کافی برای کار عملی را در اختیار دانشجویان قرار می‌دهد. در مطالعه‌ای که Cai و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از مدل‌های چاپ سه‌بعدی انجام دادند، این کار را برای تجسم فضایی بهتر ساختارهای آناتومی در دانشجویان سال اوّل پزشکی بسیار مفید دانستند [۱۷]. Wu و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۸ مدل‌های چاپ سه‌بعدی را برای یادگیری تجسم فضایی موارد بالینی، نظیر شکستگی‌های استخوانی مؤثر دانستند [۱۸]. مدل‌های تهیه‌شده چاپگر، مفاهیم سه‌بعدی ساختارهای آناتومی را به‌خوبی نشان می‌دهند و با توجه به تشابه با مدل‌های اصلی، قابلیت استفاده در کلاس عملی را دارند. مدل‌های موجود در گروه‌های آناتومی، اغلب مدل‌های صنعتی هستند که همه در یک اندازه تهیه می‌شوند. این مدل‌ها اغلب در اندازه بزرگ تولید شده‌اند که در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. جابه‌جایی و حمل‌ونقل این مدل‌ها محدود است و دانشجویان قادر نیستند به‌دلایل مختلف به‌جز ساعت‌های کلاس این مدل‌ها را در اختیار داشته باشند. مدل‌های چاپ سه‌بعدی در اندازه متفاوت، سبک‌تر و قابل‌حمل هستند و دانشجویان می‌توانند آن‌ها را به‌راحتی در خانه و خوابگاه مطالعه کنند. نمونه‌های طبیعی، نظیر استخوان نیز به‌دلایل مختلف بهداشتی و احتمال آسیب به‌خاطر استفاده مکرر، امکان مطالعه خارج از دانشکده را ندارند. تهیه مدل‌های چاپ سه‌بعدی از نمونه‌های طبیعی، نظیر استخوان، امکان استفاده مکرر برای دانشجویان در شرایط مختلف را فراهم می‌کند. تجربه موفق سه مرحله اسکن صحیح، دریافت خروجی پردازش مدل و چاپ سه‌بعدی صحیح از مدل‌های صنعتی این امکان را برای گروه آناتومی فراهم می‌کند تا از نمونه‌های طبیعی تهیه‌شده از جسد نیز اسکن و مدل موردنظر را چاپ نماید. در یک پروژه تهیه مدل‌های چاپ سه‌بعدی توسط Smith و همکاران در سال ۲۰۱۹ و نیز تهیه مدل‌های مختلف آناتومی در اندازه‌های ۴۰ تا ۱۰۰ درصد با هزینه چاپ سه‌بعدی مدل‌ها موردبررسی قرار گرفت. هزینه مدل‌های آن‌ها برای ریه‌ها ۳/۳۳ دلار و برای استخوان‌های کوچک ۱/۰۹ دلار به‌دست آمد [۱۹]. هزینه‌های تحقیق حاضر نیز برای مدل پانکراس در اندازه ۷۵ درصد مدل اصلی ۱/۴۵ دلار و برای مدل جنینی در اندازه ۱۰۰ درصد مدل اصلی ۲/۸۸ دلار بود که از نظر هزینه مطابق دیگر پروژه‌ها و حتی ارزان‌تر امکان تولید دارند (جدول شماره ۱). درصورتی که قیمت یک کیلو فیلامنت PLA حدود ۲۸ دلار در نظر گرفته شود، می‌توان حداقل ۲۰ مدل ۵۰ گرمی در ابعاد ۱۰۰ درصد تا ۷۵ درصد مدل اصلی را تهیه نمود. این تعداد مدل برای برگزاری یک کلاس عملی با حدود ۲۰ دانشجو که همگی مدل مناسب در اختیار داشته باشند، کافی است. چاپ مدل سه‌بعدی درصورتی که چاپگر در گروه موجود باشد، به دو صورت امکان‌پذیر است: از طریق خرید فایل پردازش‌شده مدل که در اینترنت می‌توان تعداد محدود و ساده از فایل‌های چاپ سه‌بعدی را رایگان تهیه نمود، اما این فایل‌ها اغلب جنبه تبلیغاتی دارند و کمتر برای آموزش استفاده می‌شوند. درحالی که برای تهیه فایل‌های پردازش‌شده مدل‌های سه‌بعدی پیچیده‌تر که برای آموزش مفید باشند، باید فایل آن‌ها را به‌صورت ارزی خریداری نمود. شیوه دیگر امکان اسکن سه‌بعدی، پردازش و سپس چاپ سه‌بعدی است که بسیار کم هزینه است و امکان فروش ریالی و ارزی آن نیز وجود دارد. موفقیت در اسکن، پردازش و چاپ مدل سه‌بعدی، امکان اسکن و چاپ نمونه‌های طبیعی آناتومی، ساخت مدل‌ها و سپس اسکن و چاپ مدل‌های خاص را نیز مقدور می‌سازد. قابلیت اسکن، پردازش و چاپ مدل در مقایسه با خرید فایل مدل از نظر هزینه نه‌تنها بسیار مقرون‌به‌صرفه است، بلکه امکان درآمدزایی نیز دارد [۱۲]. در یک مقایسه هزینه یک مدل صنعتی آناتومی و مدل چاپگر سه‌بعدی با توجه به نوع، اندازه و کیفیت مدل، هزینه تهیه مدل چاپگر سه‌بعدی یک‌پنجم تا یک‌بیستم مدل صنعتی می‌باشد [۲۰]. با توجه به این‌که در ایران تهیه مدل‌ها با هزینه زیاد ارزی همراه است، تهیه مدل‌های چاپگر سه‌بعدی آناتومی بسیار باصرفه‌تر است. مدل‌های صنعتی حتی برای کشور سازنده نیز اغلب گران هستند. به‌همین دلیل برخی از دانشگاه‌های دنیا به‌سمت خودکفایی و تهیه مدل‌های سه‌بعدی رفته‌اند. استفاده از چاپگر سه‌بعدی این قابلیت را دارد که از نمونه‌های جسد، اسکن و از آن‌ها نمونه‌های چاپی تهیه می‌کند که کاملاً مشابه نمونه واقعی باشند و امکان درآمدزایی برای تهیه‌کنندگان را نیز فراهم نماید [۲۱]. ویژگی دیگر مدل‌های چاپ سه‌بعدی، وضوح و شفافیت آن‌ها است. استفاده از فیلامنت PLA شفاف به‌خوبی ساختارهای داخلی را از نمای بیرونی نشان می‌دهد. برای مثال امکان مشاهده حفره‌های داخلی قلب از نمای بیرونی امکان‌پذیر است و این از ویژگی‌های خاصّ مدل‌های چاپگر سه‌بعدی است که یادگیری و تجسم فضایی

بهتری را برای دانشجویان در کار عملی فراهم می‌سازد. پژوهشگران اظهار داشتند که در برخی از مدل‌ها نظیر استخوان بهتر است که از چاپگر تک‌رنگ استفاده شود تا مدل تهیه‌شده به واقعیت بیشتر نزدیک باشد [۲۲]. چاپگرهای چندرنگ، هم از نظر هزینه اوّلیه و هم از نظر مواد مورد استفاده هزینه بیشتری دارند. در این مطالعه مدل‌های تک‌رنگ توسط دانشجویان علاقمند رنگ شدند و این کار هم انگیزه و علاقه دانشجویان را بیشتر کرد و هم هزینه تمام‌شده تهیه مدل‌ها کمتر شد. در مطالعه Chen و همکاران در سال ۲۰۲۰ که به تأثیر یادگیری مدل‌های چاپ سه‌بعدی در دانشجویان در برگزاری کلاس اینترنتی پرداختند، استفاده از این مدل‌ها را برای یادگیری نواحی و ساختارهای پیچیده آناتومی بسیار مؤثر دانستند [۲۳]. مدل‌های سه‌بعدی قابلیت بهتر تجسم سه‌بعدی را دارند، درک سه‌بعدی آناتومی از مهم‌ترین چالش‌های دانشجویان در یادگیری آناتومی است [۲۴]. پژوهشگران اظهار می‌دارند که استفاده از ابزار سه‌بعدی سبب درک بهتر آناتومی تجسمی و فضایی می‌شود، هنگامی که با شیوه‌های آموزش سنتی مقایسه گردد [۳]. در مطالعه‌ای توسط Adams و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای آموزش حفره کاسه چشم، از نمونه پلاستینیشن حفره کاسه چشم، ساختارهای مختلف کره چشم، ماهیچه‌ها و اعصاب، اسکن و چاپ سه‌بعدی تهیه شد که از نظر کاربران بسیار مناسب بود [۱۴]. مدل‌های پلاستینینه‌شده از جسد بسیار گران، محدود و به تعداد یک نمونه از هر ساختار در برخی از گروه‌های آناتومی ممکن است موجود باشد که نمی‌تواند توسط دانشجویان به‌جز مشاهده مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. پژوهشگران ویژگی مدل‌های چاپگر سه‌بعدی را دوام بهتر، سرعت تولید، تهیه نمونه از نواحی پیچیده آناتومی و دستکاری بهتر می‌دانند. این ویژگی‌ها از مزیت‌های بسیار مهمّ چاپگر سه‌بعدی است. دانشجویان برای فراگیری و انجام فعالیت نیاز دارند با مدل‌های آناتومی فعالیت دستی داشته باشند. دیگر مدل‌های سالن تشریح، نظیر مدل‌های پلاستینینه‌شده اغلب برای مشاهده هستند و امکان کار عملی را ندارند [۲۶]. نمونه‌های تولیدشده در گروه آناتومی در مقایسه با نمونه‌های اصلی حتی در نمونه‌های چاپ‌شده کوچک در جزئیات تفاوتی نداشتند و دانشجویان به‌راحتی می‌توانند آن‌ها را هر تعداد روز در خارج دانشکده در اختیار داشته باشند. دانشجویان می‌توانند در کلاس‌های عملی با در اختیار داشتن مدل چاپگر سه‌بعدی توجه بهتری به کلاس داشته باشند و کلاس‌های عملی را با علاقه و انگیزه بیشتری دنبال نمایند. اهمیت و ضرورت مدل‌های چاپ سه‌بعدی در آموزش آناتومی و نیز در کسب تجربه لازم برای اجرای روش‌های جراحی در چند سال گذشته در دانشگاه بسیار مورد توجه بوده است. وقت آن رسیده است که هر گروه آناتومی برای خود چاپگر سه‌بعدی داشته باشد [۲۰]. به‌همین دلیل لازم بود که در گروه آناتومی دانشکده پزشکی اقدامی برای اجرای موفقیت‌آمیز هر سه مرحله اسکن، پردازش و چاپ سه‌بعدی این مدل‌ها که قابلیت آموزشی داشته باشند، انجام شود. تجربه تولید مدل‌ها در روش‌های جراحی دامپزشکی نیز مورد توجه می‌باشد [۲۷]. Reis در سال ۲۰۱۹ از مدل‌های چاپگر سه‌بعدی در تهیه استخوان‌ها برای دانشجویان دامپزشکی استفاده نمود؛ وی هیچ تفاوت معنی‌داری بین استخوان‌های اسکن و چاپ شده با استخوان‌های اصلی پیدا نکرد [۹]. قابلیت تهیه مدل چاپگر سه‌بعدی از قطعات تشریحی نشان داد که تفاوت ویژه‌ای بین قطعات تشریحی جسد که اسکن و چاپ سه‌بعدی شده بودند، با نمونه‌های اصلی وجود نداشت [۲۵]. برخی از نمونه‌های بیوپسی و اتوپسی آسیب‌شناسی بسیار کمیاب هستند و اغلب ممکن است درصورتی که بسیار خوب نگهداری می‌شوند، پس از مدت‌زمانی به‌دلیل استفاده مکرر توسط دانشجویان دچار آسیب شوند. چاپ سه‌بعدی از این نمونه‌ها می‌تواند جایگزین نمونه‌های اصلی شود. چاپگر سه‌بعدی در آناتومی و جراحی، مسیر جدیدی را برای یادگیری، ارتقا، نوآوری تولید محصولات و پروتزها فراهم آورده است. تهیه هر نمونه آناتومی جنینی و بافتی، ویژگی مدل‌های چاپگر سه‌بعدی است. این مدل‌ها در زمان کوتاه چندساعته با هزینه کمتر در اندازه‌های مختلف قابل تهیه هستند [۲۸].

نتیجه‌گیری

اجرای صحیح و موفق اسکن، پردازش فایل خروجی و چاپ سه‌بعدی مدل‌های صنعتی در گروه آناتومی امکان تولید انبوه، سریع، قابل دسترس و به‌ویژه ارزان هر مدل با کیفیت مناسب برای آموزش را فراهم نموده است. دانشجویان برای کلاس عملی و نیز خارج از کلاس با در اختیار داشتن نمونه‌های چاپ سه‌بعدی، انگیزه و علاقه بیشتری برای یادگیری آناتومی خواهند داشت. چاپ سه‌بعدی مدل‌ها هزینه تهیه و تولید را به میزان بسیار زیاد کاهش می‌دهد، همچنین زمینه کارآفرینی برای فارغ‌التحصیلان رشته‌های آناتومی و دیگر رشته‌های وابسته را فراهم می‌کند.

تشکر و قدردانی

هزینه مواد مصرفی برای چاپ و رنگ‌آمیزی مدل‌های سه‌بعدی از طرف دانشکده پزشکی تأمین شده است. بدین‌وسیله از مسؤولان دانشکده پزشکی و از مدیر گروه آناتومی بابت تأمین مواد و نیز امکان استفاده از اسکنر و چاپگر سه‌بعدی تشکر و قدردانی می‌شود. نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تعارض منافع در مقاله ندارند.

References:

[1] Turney BW. Anatomy in a modern medical curriculum. ***Ann R Coll Surg Engl*** 2007; 89(2): 104-7.

[2] Davis CR, Bates AS, Ellis H, Roberts AM. Human anatomy: let the students tell us how to teach. ***Anat Sci Educ*** 2014; 7(4): 262-72.

[3] Triepels CP, Smeets CF, Notten KJ, Kruitwagen RF, Futterer JJ, Vergeldt TF, et al. Does three-dimensional anatomy improve student understanding? ***Clin Anat*** 2020; 33(1): 25-33.

[4] Silius-Ahonen E, Gustavson M. To learn and not to learn–that is the question. ***Procedia Soc Behav Sci*** 2011; 29: 809-18.

[5] Tedesco-Schneck M. Active learning as a path to critical thinking: Are competencies a roadblock? ***Nurse Educ Pract*** 2013; 13(1): 58-60.

[6] Brooks WS, Woodley KTP, Jackson JR, Hoesley CJ. Integration of gross anatomy in an organ system-based medical curriculum: Strategies and challenges. ***Anat Sci Educ*** 2015; 8(3): 266-74.

[7] Lochner L, Wieser H, Waldboth S, Mischo-Kelling M. Combining traditional anatomy lectures with e-learning activities: how do students perceive their learning experience? ***Int J Med Educ*** 2016; 7: 69.

[8] Garas M, Vaccarezza M, Newland G, McVay-Doornbusch K, Hasani J. 3D-Printed specimens as a valuable tool in anatomy education: A pilot study. ***Ann Anat*** 2018; 219: 57-64.

[9] Reis D, Gouveia B, Junior J, Assis Neto A. Comparative assessment of anatomical details of thoracic limb bones of a horse to that of models produced via scanning and 3D printing. ***3D Print Med*** 2019; 5(1): 13.

[10] Drake RL, Pawlina W. An addition to the neighborhood: 3D printed anatomy teaching resources. ***Anat Sci Educ*** 2014; 7: 419.

[11] Bücking TM, Hill ER, Robertson JL, Maneas E, Plumb AA, Nikitichev DI. From medical imaging data to 3D printed anatomical models. ***PLoS One*** 2017; 12(5): e0178540.

[12] Powers MK, Lee BR, Silberstein J. Three-dimensional printing of surgical anatomy. ***Curr Opin Urol*** 2016; 26(3): 283-8.

[13] Chen S, Pan Z, Wu Y, Gu Z, Li M, Liang Z, et al. The role of three-dimensional printed models of skull in anatomy education: a randomized controlled trail. ***Sci Rep*** 2017; 7(1): 1-11.

[14] Adams JW, Paxton L, Dawes K, Burlak K, Quayle M, McMenamin PG. 3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry. ***Br J Ophthalmol*** 2015; 99(9): 1162-7.

[15] Ogden KM, Aslan C, Ordway N, Diallo D, Tillapaugh-Fay G. Factor affecting Dimensional accuracy of 3D printed anatomical structures drived from CT data. ***J Digit Imaging*** 2015; 28(6): 654-63.

[16] Fredieu JR, Kerbo J, Herron M, Klatte R, Cooke M. Anatomical models: a digital revolution. ***Med Sci Educ*** 2015; 25(2): 183-94.

[17] Cai B, Rajendran K, Bay BH, Lee J, Yen CC. The effects of a functional three-dimensional (3D) printed knee joint simulator in improving anatomical spatial knowledge. ***Anat Sci Educ*** 2019; 12(6): 610-8.

[18] Wu AM, Wang K, Wang JS, Chen CH, Yang XD, Ni WF, et al. The addition of 3D printed models to enhance the teaching and learning of bone spatial anatomy and fractures for undergraduate students: a randomized controlled study. ***Ann Transl Med*** 2018; 6(20).

[19] Smith CF, Tollemache N, Covill D, Johnston M. Take away body parts! An investigation into the use of 3D-printed anatomical models in undergraduate anatomy education. ***Anat Sci Educ*** 2018; 11(1): 44-53.

[20] Balestrini C, Campo-Celaya T. With the advent of domestic 3-dimensional (3D) printers and their associated reduced cost, is it now time for every medical school to have their own 3D printer? ***Med Teach*** 2016; 38(3): 312-3.

[21] AbouHashem Y, Dayal M, Savanah S, Štrkalj G. The application of 3D printing in anatomy education. ***Med Educ Online*** 2015; 20(1): 29847.

[22] Wilhite R, Wölfel I. 3D Printing for veterinary anatomy: An overview. ***Anat Histol Embryol*** 2019; 48(6): 609-20.

[23] Chen Y, Qian C, Shen R, Wu D, Bian L, Qu H, et al. 3D printing technology improves medical Interns' understanding of anatomy of Gastrocolic trunk. ***J Surg Educ*** 2020; 77(5): 1279-84.

[24] Radzi S, Tan HKJ, Tan GJS, Yeong WY, Ferenczi MA, Low-Beer N, et al. Development of a three-dimensional printed heart from computed tomography images of a plastinated specimen for learning anatomy. ***Anat Cell Biol*** 2020; 53(1): 48.

[25] McMenamin PG, Quayle MR, McHenry CR, Adams JW. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. ***Anat Sci Educ*** 2014; 7(6): 479-86.

[26] Mogali SR, Yeong WY, Tan HKJ, Tan GJS, Abrahams PH, Zary N, et al. Evaluation by medical students of the educational value of multi-material and multi-colored three-dimensional printed models of the upper limb for anatomical education. ***Anat Sci Educ*** 2018; 11(1): 54-64.

[27] Thomas DB, Hiscox JD, Dixon BJ, Potgieter J. 3D scanning and printing skeletal tissues for anatomy education. ***J Anat*** 2016; 229(3): 473-81.

[28] Baskaran V, Štrkalj G, Štrkalj M, Di Ieva A. Current applications and future perspectives of the use of 3D printing in anatomical training and neurosurgery. ***Front Neuroanat*** 2016; 10: 69.