

Innovatív megközelítések a gége- és légcsősebészetben, valamint az orvosi oktatásban

**Sebészi technikák, 3D modellezés és oktatás a fej-
nyaksebészetben**

PhD értekezés

Szerző: Dr. Tóbiás Zoltán

Intézmény: SZTE ÁOK

Témavezető: Dr. Csanády Miklós

Doktori Iskola: Klinikai Orvostudományi Doktori Iskola

Programvezető: Prof. Dr. Kemény Lajos

Év: 2025

Helyszín: Szeged

1. Bevezetés

1.1 A cricotrachealis szűkület és az előrehaladott glottikus daganatok klinikai jelentősége

A cricotrachealis szűkület és az előrehaladott gégerák súlyosan rontják a légzést, a hangképzést és a nyelést, és kezelés hiányában életveszélyes szövödményekhez vezethetnek. Az idiopátiás szubglottikus szűkület (iSGS) ritka, ismeretlen eredetű betegség mely a légút progresszív szűküléséhez vezet.

A gégedaganatok – főként a laphámrák – korai stádiumban jól kezelhetők, de előrehaladott esetekben összetett sebészi döntéseket igényelnek. A korszerű megközelítések előnyben részesítik a szervmegtartó műtéteket, melyek célja a funkciók megőrzése az onkológiai eredményesség mellett. A 3D modellezés egyre fontosabbá válik a sebészi tervezésben, lehetővé téve a személyre szabott kezelést és a komplex légúti rekonstrukciókhoz szükséges oktatást.

1.2 Az idiopátiás szubglottikus szűkület (iSGS) patofiziológiája és kezelési stratégiái

Az idiopátiás szubglottikus szűkület (iSGS) ritka megbetegedés, amelyet a szubglottis fokozatos beszűkülése jellemez, leggyakrabban középkorú nőket érintve. A posztintubációs vagy autoimmun eredetű szűkületekkel ellentétben az iSGS ismeretlen eredetű, ami gyakran asztmával vagy COPD-vel történő téves diagnózishoz vezet, késleltetve a megfelelő kezelést.

Jelenleg nem ismert olyan konzervatív terápia, amely képes lenne megállítani vagy visszafordítani a betegséget, így a betegek többsége előbb-utóbb sebészi beavatkozásra szorul. Enyhe-közepes súlyosságú esetekben (Cotton-Myer I–II. fokozat) általában endoszkópos kezeléseket alkalmaznak, mint például ballonos tágítás, CO₂ lézeres kimetszés, szteroid injekció vagy mitomycin-C alkalmazása. Ezek az eljárások azonban gyakran csak átmeneti javulást eredményeznek. Az ismételt beavatkozások következtében a szövetek gyógyulása romlik, a felhalmozódó sérülések miatt nő a hegesedés és a funkcionális romlás kockázata. Súlyosabb szűkület (III–IV. fokozat) esetén nyitott sebészi megoldások, például cricotrachealis resectio (CTR) szükségesek. A CTR hatékonyan helyreállítja a légutak átjárhatóságát, de kockázatokkal jár, mint például sebgyógyulási zavarok, anasztomózisos elégtelenség vagy posztoperatív ödéma. Emellett a cricoarytenoid ízület érintettsége miatt a hangképzés és nyelés is sérülhet. Az endoszkópos és nyitott műtétek után is gyakori a szűkület kiújulása, ami ismételt beavatkozásokat tehet szükségessé.

E korlátok fényében olyan, funkciót megőrző technikák, mint a slide laryngotracheopexia kerültek kidolgozásra. Ez az eljárás helyi trachealis lebeny felhasználásával rekonstruálja a légutat úgy, hogy megőrzi a gyűrűporc integritását, ezzel

csökkentve a kiújulás esélyét, és kiküszöbölve a tartós tracheostoma szükségességét. Eredetileg gyermekgyógyászati esetekben alkalmazták, de az ígéretes eredmények alapján a módszer felnőttkori iSGS kezelésében is értékes lehetőséget kínál, kombinálva a szerkezeti stabilitást és az alapvető gégefunkciók megőrzését.

1.3 Az előrehaladott glottikus tumorok kezelése

A gyűrűporc a gége szerkezeti alappillére, és előrehaladott glottikus daganatok általi érintettsége jelentősen megnehezíti a sebészi döntéshozatalt. Ilyen esetekben a nyelés és a légzés megőrzése különösen nagy kihívást jelent. Míg a korai stádiumú elülső commissura daganatok gyakran hatékonyan kezelhetők transzorális lézeres mikrosebészettel vagy sugárkezeléssel, a pajzsporcba terjedő tumorok már nyitott műtéti megközelítést igényelnek. Hagyományosan a teljes gégeeltávolítás (totális laryngectomy) számított standard eljárásnak az előrehaladott gégedaganatok kezelésében – különösen idősebb betegeknél, ahol a részleges gégeműtétek fokozott funkcionális kockázattal járnak.

Bár onkológiailag megbízható eredményeket nyújt, a totális laryngectomy maradandó hangvesztéssel és élethosszig tartó tracheostomával jár, amely súlyosan befolyásolja a kommunikációt, az érzelmi jóllétet és az életminőséget – még rehabilitációs eszközök (például hangprotézis vagy elektrolaring) használata mellett is. Válaszul a gégeonkológia egyre inkább a szervmegtartó stratégiák felé fordult, melyek célja volt a gége alapvető funkcióinak megőrzése az onkológiai biztonság kompromittálása nélkül. E megközelítések azonban gyakran súlyos posztoperatív szövődményekhez vezettek, különösen, ha a gyűrűporc is érintett volt. A kedvezőbb eredmények érdekében az újabb rekonstrukciós technikák erekkel ellátott, nyálkahártyával fedett trachealis graftokat alkalmaznak, melyek jobb strukturális megtámasztást és hosszú távú funkciót biztosítanak. Az 1990-es évek végén bevezetett trachealis autotranszplantáció ígéretesnek bizonyult, míg a szintetikus vagy nem erezett graftok gyakran rossz integrációval és magas komplikációs aránnyal jártak.

A modern megközelítések közül az ún. kiterjesztett vertikális hemilaryngectomya rotációs thyrotracheopexiával életképes, funkciót megőrző alternatívát kínál. Ez a technika lehetővé teszi a daganat onkológiailag biztonságos eltávolítását, miközben jól erezett, helyben elérhető tracheaszövettel rekonstruálja a légutakat – így biztosítva annak átjárhatóságát, a fonáció és a nyelés lehetőségét, és válogatott esetekben elkerülhetővé téve a teljes gégeeltávolítást.

1.4 A 3D modellezés szerepe a sebészeti tervezésben

A virtuális és nyomtatott 3D modellek segítik az összetett laryngotrachealis anatómia megértését és a sebészeti tervezést a hagyományos képalkotáson túl. Ezek a modellek segítik a preoperatív műtéti tervezést, próbaműtétek elvégzését és a sebészi technikák oktatását. A

maxillofacialis sebészetben már rutinszerűen elterjedt a 3D preoperatív tervezés, de a gégeszetben is egyre több területen használják ki a technológia adta lehetőségeket. A dolgozatban bemutatott CT és endoszkópos kép alapú 3D modellek segítségével könnyebben vizualizálhatóak a szűkületes vagy gégedaganatos betegek egyéni anatómiai sajátosságai, és a pathológiás folyamat kiterjedése. Segítségükkel komplex műtéteket megelőző sebészi tervezés pontosabbá válhat.

1.5 A disszertáció célkitűzései

Az értekezés az alábbi témákat fejti ki:

1. A slide laryngotracheopexia műtéti megoldás hosszú távú eredményei iSGS esetén.
2. A thyrotracheopexiával egybekötött kiterjesztett hemilaryngectomy posztoperatív onkológiai és funkcionális eredményeinek vizsgálata előrehaladott glotticus tumorok esetében.
3. A CT-alapú 3D modellek szerepe komplex laryngotrachealis műtéteket megelőző preoperatív tervezésben és a sebészeti oktatásban.

2. Anyag és módszerek

2.1 Vizsgálati terv

2.1.1. Betegek kiválasztása idiopátiás subglotticus szűkület (iSGS) esetén

Retrospektív vizsgálatunkba beválogattunk minden olyan felnőtt beteget (≥ 18 év) beválogattunk, akinél idiopátiás, legalább Cotton-Myers II. grádusú subglotticus szűkület állt fenn fokozódó nehézlégzéssel, illetve korábban tracheotomián esett át és tartós kanülviselő. A vizsgálatba olyan beteget válogattunk be, akiknél korábban sikertelen endolaryngealis vagy cricotrachealis reszekció történt, illetve primeren slide laryngotracheopexia műtétet indikáltunk. A diagnózist endoszkópos vizsgálattal erősítettük meg, miközben a többi lehetséges okot – különösen az autoimmun, traumás vagy iatrogén eredetet – anamnesztikus adatok alapján és szerológiai vizsgálatokkal zártuk ki. Minden esetben nagy felbontású komputertomográfiás (HRCT) vizsgálatot végeztünk a szűkület kiterjedésének meghatározására, továbbá a betegkórelőzményében szereplő releváns adatokat, mint korábbi beavatkozásokat és a gastrooesophagealis reflux jelenlétét rögzítettük. Az autoimmun betegségeket ANCA-tesztel (PR3 és MPO), valamint IgG4-szint meghatározással zártuk ki.

2.1.2. Betegek kiválasztása rotációs thyrotracheopexiával egybekötött kiterjesztett hemilaryngectomy eseteiben

Ebbe a csoportba olyan felnőtt betegeket válogattunk be, akiknél kiterjedt, előrehaladott állapotú T3 stádiumú, szövettanilag verifikált rosszindulatú gégedaganat elérte az elülső commissurára valamint ráterjedt a subglotticus régióra. Minden korábbi onkológiai kezelést és műtétet rögzítettünk. A diagnózist mikrolaryngoscopia során végzett szövettani mintavétel, valamint képalkotó vizsgálatok alapján állítottuk fel.

2.1.3. Betgbeválasztás a CT alapú 3D gégemodell előzetes vizsgálatába

Vizsgálatunkba minden olyan betegeket bevontunk, akik gége- vagy cricotrachealis szűkület, illetve gégedaganat miatt komplex laryngotrachealis műtéten estek át. Azokat a betegeket zártuk ki, akiknél jelentős képalkotási artefaktum, korábbi nyitott gégeműtét vagy tracheotomia szerepelt a kórelőzményben, hogy biztosítsuk a szegmentálás pontosságát. Ez az előzetes tanulmány a modellezési munkafolyamat validálására irányult, és a jövőben tervezzük további vizsgálatok folytatását.

2.2 Műtéti technikák

2.2.1. Slide laryngotracheopexia iSGS esetén

A slide laryngotracheopexiát a gyűrűporc magasságában végzett horizontális nyaki metszéssel kezdtük, hozzáférve a gége és a trachea felső szakaszához. Supralaryngealis release során átvágtuk a membrana thyrohyoideaát és a felső pajzsmirigy-szarvakat. Körkörös preparálással szétválasztottuk a cricotrachealis átmenetet, majd ennél a lépésnél átintubálást végeztünk. A pajzsporc lamináján laryngofissiot végeztünk, megőrizve az elülső commissurát. A gyűrű elülső ívének átvágását követően hátsó laminotomiát végeztünk. Ezt követően tompa preparálással dilatáltuk a gyűrűporcot, valamint a heges állományt eltávolítottuk, majd supramediastinalis release technikával atraumatikusan mobilizáltuk a tracheát. A pars membranacea-t óvatosan lefejtettük a nyelőcső elülső faláról, majd a nyálkahártyán bemetszést ejtettünk, úgy, hogy a tracheafal megfelelően illeszkedjék a gyűrűporc hátulsó éléhez. Ennél a lépésnél nasogastricus tápszondát vezettünk le. Amennyiben korábban pCTR műtét történt, a reszekált gyűrűporc helyén lévő elülső falon végeztünk incisiot és tágítást. Ezt követően a végeztük el a trachea mobilizálását különösen figyelve a nervus laryngeus recurrens lefutására. Az elülső fal rekonstrukcióját interpozicionált trachea porcokkal végeztük elliptikusan kialakított, folyamatos, csomókkal megszakított külső öltésekkel rögzített anasztomózással. A műtéti terület védelme és a nyakmozgás minimalizálása érdekében Redon-drain-t és kompressziós kötést alkalmaztunk.

2.2.2. Rotációs crico-thyrotacheopexia (RCTT) glottikus daganatok esetén

Az eljárás mikrolaryngoscopus vizsgálattal kezdődött intravénás anesztézia és jet ventiláció mellett. Ezt követően a gyűrűporc szintjében horizontális nyaki metszést ejtettünk, majd azonos oldali módosított radikális nyaki dissectiót (I–IV. és VI. régió) és kétoldali paratrachealis dissectiót végeztünk. A gégeváz mobilizálását követően a daganatot kiterjesztett hemilaryngectomy során eltávolítottuk. Ennek során prelaryngealis izmokat leválasztottuk a pajzsporc felső éle mentén, majd supralaryngealis release technikával mobilizáltuk a géget. Ezt követően a pajzsporcon laryngofissio-t végeztünk és látótérbe hoztuk a daganatot. A kimetszés során eltávolítottuk az összes érintett gégestruktúrát, beleértve az azonos oldali valódi- és álhangszalagot, az aryporcot, a teljes paraglotticus térséget, valamint a gyűrűporc érintett szakaszát. Amennyiben a daganat a hátsó commissurát valamint cricoarytenoidalis ízületet is elérte, az interary területen végzett posteroir laminotomia-t követően kiterjesztettük a reszekciót. Műtét közben fagyasztott szövettani metszetekkel ellenőriztük a sebészi szél tisztaságát. A kimetszést követően átintubálás valamint nasogastricus tápszonda levezetés történt. A rekonstrukciót megelőzően supramediastinalis release technikával a tracheát a 4-5 C porc magasságáig mobilizáltuk különösen figyelve a nervus laryngeus recurrens lefutására. A rekonstrukció során a mobilizált disztális tracheát 90 fokkal elforgattuk. Az elforgatás irányát a daganat oldalisága határozta meg: jobboldali elváltozásnál óramutató járásával megegyezően, baloldalinál ellentétesen. A pars membranacea felső szélének bemetszését követően a tracheát a megmaradt pajzs- és gyűrűporchoz rögzítettük, majd Montgomery T-tubus behelyezését követően az anasztomózt folytonos, csomókkal megszakított öltésekkel kialakítottuk.

2.3 A 3D modellezés alkalmazása a műtéti tervezésben

A műtét előtti és utáni HRCT-felvételeket DICOM formátumban dolgoztuk fel, és ITK-SNAP szoftverrel szegmentációt végeztünk, mely során elkülönítettük az anatómiai és kóros struktúrákat. A szegmentálást manuálisan végeztük az axiális, coronalis és sagittalis síkokon jelölt referenciapontok alapján, a pontosság érdekében radiológus bevonásával. Az anatómiai jelölések között szerepelt a nyelvcsont, a pajzsporc, a gyűrűporc, a trachea, a gége, epiglottis, supraglottis és a pathológiás terület. A kóros terület pontos megítélésére endoszkópos felvételek anyagát használtuk fel. A szegmentálást MacBook Pro számítógépen végeztük, Wacom táblagép segítségével.

2.3.1. Finomítás 3D digitális szobrással

A szegmentálás után a modellt STL-fájlként exportáltuk, majd Nomad Sculpt szoftverben digitális finomítást végeztünk. A finomítást a háló simításával illetve olyan apró

részletek módosításával végeztük, amelyek a képalkotási korlátok miatt nem voltak egyértelműek. Ehhez anatómiai atlaszok segítségével támaszkodtunk, hogy az alapvető struktúra megtartása mellett olyan részleteket dolgozzunk ki, mint a nyelvcsont elülső felszínének domborzata, vagy a membrana thyrohyoidea rostozatának textúrája, növelve ezáltal a modell valóságosságát. Az érintett területeket – például daganatokat és szűkületeket – eltérő színekkel jelöltük a jobb vizualizáció érdekében. A modellezést iPad Pro készüléken Apple Pencil-lel végeztük.

2.3.2. 3D nyomtatás és modellek felhasználása

A vizsgálat során két nyomtatási technikát alkalmaztunk fizikai modellek létrehozásához. A MEX (Material Extrusion) technikával hőre lágyuló poliuretánt (TPU) alkalmaztunk Voxelab Aquila nyomtatóval, míg a VAT fotopolimerizáció (VPP) Form3 nyomtatóval, Flexible 80A gyantával történt. Mindkét eljárást dedikált szeletelő- és nyomtatószoftveres (Preform és 3D Sprint) előkészítés előzte meg.

2.4 Eredmények értékelés és statisztikai analízis

2.4.1. Műtét utáni klinikai és funkcionális eredmények értékelés slide laryngotracheopexia után

A funkcionális eredményeket a műtét után hat hónappal értékeltük. A légzési munkátt spirometriával, a belégzési csúcsáramlás (PIF) meghatározásával mértük. A betegek Voice Handicap Index (VHI) és az M.D. Anderson Dysphagia Inventory (MDADI) kérdőíveket töltötték ki a hang- és nyelési funkció értékelésére. Standardizált életminőség kérdőívet (QoL) alkalmaztunk a következő szempontokat vizsgálva: nehézlégzés, hangképzési nehézségek, nyeléspanaszok, köhögés, zajos légzés valamint általános elégedettség. A légút további megítélésére 70-fokos merev laryngoscopus felvételt készítettünk. Amennyiben szövödmény merült fel, további képalkotó vizsgálatok valamint direkt laryngoscopia történt. A statisztikai elemzést JASP szoftverrel végeztük.

2.4.2. Funkcionális értékelés kiterjesztett részleges laryngectomy és rotációs thyrotracheopexia után

Tekintve, hogy az onkológiai kezelés további funkcionális romlást eredményezhet, az értékelést minden esetben az utánkövetési idő végén végeztük el. A hangminőséget az Európai Gégészeti Társaság irányelvei alapján elemeztük Praat szoftver segítségével, amely akusztikai paramétereket, például fonációs időt, alapfrekvenciát és zavarindexeket mért. A betegek VHI és MDADI kérdőívet töltötték ki. A légzési funkciót PIF-méréssel értékelték, valamint egy

standardizált életminőség-kérdőív (QoL) segítségével gyűjtöttünk szubjektív visszajelzést a posztoperatív funkcióról (hangképzés, légzés, nyelés) és az általános elégedettségéről.

3. Eredmények

3.1 Slide laryngotracheopexia műtéti és funkcionális eredményei

2016 decembere és 2022 decembere között tizenhárom felnőtt páciensnél végeztünk el slide laryngotracheopexiát idiopátiás subglotticus szűkület (iSGS) esteiben. A betegek többsége nő volt, átlagéletkoruk megközelítőleg 59 év (2 férfi és 11 nő; átlagéletkor 59.3 ± 16.7 év). Több páciens korábban már átesett endoszkópos beavatkozáson vagy részleges cricotrachealis resectión, és 7 beteg tracheosztómával érkezett a műtetre. A nagy felbontású CT-felvételek szerint a szűkület átlagos hossza 17.2 ± 7.2 mm volt. 4 beteg korábban átesett endolaryngealis lézeres reszekción, vagy ballon dilatáción, két beteg esetében korábban részleges cricotrachealis reszekció történt.

Valamennyi beteget közvetlenül a műtét után extubáltuk, és egyikük sem igényelt intenzív ellátást. A műtéti drainsöveket átlagosan az 5-ik, a nasogastricus szondát a 11-ik posztoperatív napon távolítottuk el. Egy beteg (#11) esetében észleltünk nehézlégzést kifejezett légúti pörkképződés miatt, mely miatt átmeneti tracheotomia-t végeztünk, de ezt követően a beteget 5 nappal később sikeresen dekanüláltuk. Nem fordult elő jelentős szövődmény, mint anasztomózisos nekrosis, a betegek átlagos kórházi tartózkodása 14 nap volt. A követés során három betegnél endoszkópos CO2 lézeres műtetre volt szükség kifejezettebb granulációs szövet megjelenése miatt, főként azoknál, akik más intézményben korábban tracheotomian estek át. Egy betegnél (#6) korán felismert, az anasztomózis magasságában észlelt granuláció miatt helyi mitomycin-C kezelést alkalmaztuk, melyet követően további beavatkozásra nem volt szükség.

A funkcionális eredmények kedvezőek voltak. Nervus laryngeus recurrens sérülést nem észleltünk. Az átlagos PIF érték $2,76 \pm 0,83$ volt, a VHI átlagos értéke $18,69 \pm 13,35$, míg az MDADI átlagos érték $95,61 \pm 4,335$ volt. Az életminőség kérdőív átlagos értéke $9,0 \pm 2,16$ volt. Az átlagos követési időszak 41 hónap volt (min: 12 max: 84 hónap) Ezidő alatt ismételt nyitott nyaki műtetre, tracheotomiára nem kerül sor. A per os táplálásra való áttérés gyorsan megtörtént a szonda eltávolítása után, és az utánkövetési idő végére valamennyi beteg megfelelő légzési és táplálkozási funkcióval rendelkezett.

3.2 A rotációs thyrotracheopexiával egybekötött kiterjesztett hemilaryngectomia posztoperatív és funkcionális eredményei

Nyolc betegnél, akiknél előrehaladott glottikus tumor érintette az elülső commissurát és a subglottikus régiót, rotációs thyrotracheopexiával egybekötött kiterjesztett hemilaryngectomiát végeztünk. A beteget (6 férfi és 2 nő) átlagéletkora 58 év volt. Minden beteg esetében fennállt egy, vagy kétoldali hangszalag mozgás korlátozottság. Az #1, #3 valamint #5 beteg esetében a hátsó commissurát is eltérte a folyamat, illetve az #1, #2, és #7 betegek esetében ellenoldali terjedés is megfigyelhető volt. 4 esetben supraglotticus terjedés is igazolódott, illetve a #4 beteg esetében az első 2 tracheaporcot is involválta a folyamat. A kiterjedést CT és MRI vizsgálatokkal igazoltuk. 2 beteg esetében (#1 és #2) korábban type III lézer cordectomy történt. A #3 és #4 beteg esetében preoperatív tracheotomia és laser debulking vált szükségessé súlyos fokú dyspnoe miatt. A szövettani vizsgálatok többségében laphámrákot igazoltak, de két esetben ritkább tumorformákat is azonosítottak: leiomyosarcomát és Hürthle-sejtes carcinomát.

Posztoperatív szövödményt nem észleltünk. A Montgomery T-tubust átlagosan a 6–13. nap között távolítottuk el, melyet követően 5 esetben közvetlenül ezt követően sikeresen dekanüláltuk a beteget, a maradék esetekben 4 napon belül sikerült véglegesen dekanülálást végeznünk. A per os táplálás a műtétet követő 1–3 héten belül újraindult, a tracheosztómas nyílások spontán gyógyultak.

A szövettani vizsgálatok minden esetben komplett tumorreszekciót, negatív sebési széleket igazoltak. A betegek többsége adjuváns sugárkezelésben részesült, egy kivétellel (#4 beteg), ahol ez nem volt indokolt. Két betegnél (#4 és #8) az elülső commissuránál synechia alakult ki, amit CO₂ lézerrel oldottunk. További légúti beavatkozásra a többi esetben nem volt szükség.

Egy betegnél (#1) tüdőáttétek alakultak ki, de lokális kiújulás nem fordult elő az utánkövetés 51 hónapja alatt.; egy páciens (#4) szívinfarktus következtében hunyt el, a boncolás során nem igazolódott lokális recidiva. A többi beteg (#2, #3, #5, #6, #7, #8) utánkövetési ideje 11 és 50 hónap között volt. Funkcionálisan a legtöbb beteg társadalmilag elfogadható hangképzést nyert vissza. A per os táplálkozás, diétás megszorítás nélkül, minden esetben helyreállt, egy páciens kivételével (#7), akinél perkután gastrostoma (PEG) beültetésére volt szükség. A hosszú távú kontroll során megfelelő légzési funkciók, elfogadható akusztikai paramétereket és jó életminőséget regisztráltunk.

3.3 A CT alapú laryngotrachealis 3D modellek alkalmazása és hatása a műtéti tervezésre

Három reprezentatív klinikai eset szolgált a CT-alapú 3D modellezés és nyomtatás metodikájának kidolgozására és finomítására. Ezek között két előrehaladott glottikus carcinoma és egy idiopátiás subglotticus szűkület esete szerepelt.

Az első esetben CT alapú digitális modellezést végeztünk, hogy virtuális környezetben reprezentáljuk egy T3 gégecarcinoma miatt rotációs thyrotracheopexiával egybekötött kiterjesztett hemilaryngectomian átesett betegünk műtét előtti és utáni állapotát. Ezt a modellt oktatási célokra használtuk 5. éves magyar és angol orvostanhallgatók, valamint gégessebészeti kurzusok során. A modell sikeresen demonstrálta a virtuális 3D eszközök potenciálját a sebészeti tervezés és az orvostanhallgatók és kollégák képzése terén.

A második eset jelentette az első fizikai 3D nyomtatási próbálkozást. Egy slide laryngotracheopexián átesett beteg esetében 1:1 arányú modellt hoztunk létre termoplasztikus poliuretánból (TPU), anyagextrúziós (MEX) technológiával. Bár a modell jól reprezentálta a légúti anatómiát, a korlátozott felbontás és az anyag merevsége csökkentette az alkalmazhatóságát szimulációs célokra. Ennek ellenére a modellt egy szilikonnal bevont gyakorlóbábuba integrálva műtéti lépéseket szimuláltunk, mely során a resectiot sikeresen elvégeztük, a varratpróbák biztatóak voltak,

A második esetben észlelt hiányosságok kiküszöbölésére egy harmadik páciens modelljét VAT fotopolimerizációs technikával (VPP) és rugalmas gyantával (Flexible 80A) nyomtattuk ki. Ez a nagy felbontású modell kiváló anatómiai pontosságot és tapintási visszajelzést biztosított, lehetővé téve a sebészi lépések – például a metszés, varrás és reszekció – valósághű szimulációját. A modellt tesztelő sebészek szerint az anyag kezelése erősen hasonlított az élő szövetekéhez, megerősítve annak jelentőségét a sebészi felkészülésben és oktatásban.

Az esetek során gyűjtött tapasztalataink alátámasztják a 3D nyomtatási technológiák növekvő értékét a komplex légúti sebészetben. Az alapmodellektől a rugalmas, fejlett prototípusokig tartó fejlődés tükrözi azt az iteratív folyamatot, amely a klinikai gyakorlatba való integrációhoz szükséges. A végleges modellek nemcsak az operatív tervezésben bizonyultak hasznosnak, hanem növelték az intraoperatív magabiztosságot és támogatták az oktatási célokat is.

4. Megbeszélés

4.1 Idiopátiás szubglottikus szűkület: patogenezis, diagnózis és sebészi kezelés

Az idiopátiás szubglottikus szűkület (iSGS) ritka légúti betegség, melyet a szubglottikus régió progresszív beszűkülése jellemez. Diagnózisa más ismert okok – például autoimmun betegségek, trauma, daganatok vagy intubáció utáni sérülések – kizárásán alapul. Bár esetenként kimutathatók c-ANCA antitestek, egységes autoimmun összefüggés nem bizonyított. Hasonlóképpen, bár az iSGS nem számít örökletes állapotnak, családi halmozódást is leírtak, ami genetikai hajlam lehetőségét veti fel. Az iSGS patogenezisében rendellenes fibroblaszt-aktivitás és extracelluláris mátrix-felhalmozódás játszik szerepet, amit elsősorban az IL-23 és IL-17A jelátviteli utak közvetítenek. Ezek a citokinek serkentik a TGF- β és MMP9 működését, elősegítve a fibrotikus elváltozásokat a légutakban.

Az intubáció utáni szűkületekkel összehasonlítva az iSGS esetében magasabb interferon-gamma szintek figyelhetők meg, ami eltérő immunválasz-profilra jelez. Ennek ellenére jelenleg nincs elfogadott gyógyszeres kezelés az iSGS-re. A betegség leggyakrabban középkorú vagy idősebb nőket érint. Bár felmerült a hormonális tényezők szerepe is, a szövetmintákban nem mutattak ki emelkedett ösztrogén- vagy progeszteronreceptor-szinteket. A betegek jelentős hányadánál gastrooesophagealis reflux betegség (GERD) is jelen van, ami arra utal, hogy a pepszin által okozott nyálkahártya-károsodás szerepet játszhat a betegség kialakulásában.

Mechanikai szempontból az iSGS kapcsolatba hozható az ún. „teleszkóp-jelenséggel”, amikor ismételt köhögés során fellépő tracheális frikció krónikus mechanikai stresszt gyakorol az első tracheagyűrűre és a cricoid porcra. Ez vénás pangást, gyulladást és progresszív fibrózist idézhet elő. A gyűrűporc régió egyedi érhalózata tovább fokozhatja a sérülékenységet. A slide laryngotracheopexia megoldást kínál azáltal, hogy az elliptikusan kialakított anasztomózis egységnyi pontjára eső terhelés egyenletesen oszlik el így védve a gyűrűporcot a közvetlen terheléstől, ezáltal csökkentve a fibrózis kiújulásának esélyét.

Jelenleg nincs egységes kezelési protokoll az iSGS-re. Endoszkópos módszerek – például ballonos tágítás és CO₂ lézeres eltávolítás – korai stádiumban hatékonyak, de előrehaladott esetekben a magas restenois aránya miatt kevésbé eredményesek. Innovatív megközelítések, mint a Maddern-eljárás (nyálkahártya-átültetéssel és ideiglenes sztenteléssel) ígéretesek, de további vizsgálatokat igényelnek. Közepes vagy súlyos szűkületek esetén a többszöri endoszkópos beavatkozás másodlagos deformitást és szövetsérülést is okozhat.

A nyitott sebészi beavatkozások, például a cricotrachealis resectio, hosszú távon jobb eredményeket hoznak, de nagyobb funkcionális és perioperatív kockázattal járnak. A slide

laryngotracheopexia egy új megközelítést kínál, amely a hagyományos anasztomózis-geometriát módosítva igyekszik megőrizni a légút szerkezeti és funkcionális integritását. Az end-to-side anasztomózis képzése során a lehető legtöbb porcot megőrizzük, így őrizve meg a gégeváz integritását adó strukturális elemek jó részét. A trachea saját légúti hámja elősegíti az optimális mucociliaris működést a kritikus, subglotticus területen. Az elliptikus anasztomózis-orientáció továbbá egyenletesebben oszlatja el a feszülést, így csökkenti a dehiscencia kockázatát. Fontos, hogy ez az eljárás megőrzi a cricoid hátsó részének és az arytenoidoknak a mozgását, ezáltal megtartva a légúti védekezéshez és fonációhoz szükséges fiziológias mechanizmusokat.

Vizsgálatunk eredményei (QoL, PIF, VHI) alapján a beavatkozás biztonságos, jó klinikai és funkcionális eredményekkel jár, a betegek elégedettek. A nyelési funkció kedvező volt, amit a MDADI pontszámok is igazoltak, a hangminőség szintén jó maradt a kulcsfontosságú gégestruktúrák megtartásának köszönhetően. Bár a posztoperatív ellátás hasonló volt a hagyományos CTR-hez, a korábban tracheotomián átesett vagy többszörös endolaryngealis műtéten átesett betegek körében magasabb volt a komplikációk aránya – vélhetően a gyengébb szöveti regeneráció és a lokális mikrobiom zavara miatt. Ennek ellenére az endoszkópos vizsgálatok és a spirometria igazolták a tartós légúti átjárhatóságot, magas volt a betegelégedettség, és nem fordult elő recurrens idegsérülés.

Összességében a slide laryngotracheopexia ígéretes, funkciót megőrző sebészi lehetőség az iSGS kezelésére. Szerkezeti stabilitást, jó hangképzési és nyelési funkciókat biztosít.

4.2 Az előrehaladott gége- és szubglottikus daganatok sebészi kezelése: kihívások és rekonstrukciós megközelítések

Az előrehaladott glottikus–szubglottikus daganatok jelentős terápiás kihívást jelentenek, mivel hajlamosak olyan szerkezetileg és funkcionálisan kritikus területekbe terjedni, mint az elülső commissura, a pajzsporc, a gyűrűporc és a szubglottikus régió. Ezen anatómiai zónák sérülékenysége, a magas nyiroksűrűség, valamint a védelmet biztosító perichondrium hiánya elősegíti a tumor terjedését és bonyolítja a sebészi beavatkozást. Ilyen esetekben gyakran a teljes gégeeltávolítás jelenti a végleges kezelést, különösen akkor, ha a tumor térfogata vagy az érintett anatómiás struktúrák megakadályozzák a szervmegtartást.

Válogatott esetekben azonban az ún. kiterjesztett vertikális hemilaryngectomia életképes alternatívát jelenthet. Amennyiben a szervmegőrző beavatkozások sikertelenek vagy szövődmények, például sipoly vagy aspiráció lép fel, narrow-field vagy definitív teljes gégeeltávolítás válhat szükségessé. A hatékony rekonstrukció több kulcsfontosságú tényezőt

kell, hogy lefedjen: a defektus zárását, a szerkezeti helyreállítást és a funkcionális nyálkahártyaborítás biztosítását, amely csökkenti a szűkület kialakulásának kockázatát és elősegíti a váladék kiürülését.

Legalább egy mobilis arytenoid és a hátsó glottis megtartása elengedhetetlen a biztonságos nyeléshez és fonációhoz, mivel ezen területek gazdag szenzoros beidegzéssel rendelkeznek. Az elegendő anteroposterior átmérő biztosítása szintén kulcsfontosságú a megfelelő légzéshez. A rekonstrukcióhoz használt szövet kiválasztása létfontosságú. A trachealis porc természetes görbülete, mechanikai szilárdsága és alacsony metabolikus igénye miatt előnyös választás, mivel sugárkezelés mellett is hosszú távon megőrzi integritását. Ugyanakkor korlátozott érhálózata fokozott kockázatot jelent rekonstrukció során. A rotációs crico-thyrotacheopexia során a szegmentális tracheoesophagealis erek gyakran áldozatul esnek, így a perfúzió biztosítása a megmaradó kisebb artériákra hárul. A túlzott feszülés vagy kiterjedt mobilizáció fokozhatja az ischaemia vagy az anasztomotikus elégtelenség kockázatát.

Ezen kockázatok mérséklésére több, mobilizálást szolgáló sebészi technikát alkalmaztunk. A jelen tanulmányban a supralaryngealis és supramediastinalis release technika, valamint a megfelelően elhelyezett húzóöltések kombinációja elegendőnek bizonyult a feszülésmentes anasztomózis kialakításához. Anasztomózis elégtelenség nem lépett fel. A műtét után rövid távon alkalmazott Montgomery T-cső segítette az ödéma csökkentését és a légutak párásítását, miközben elkerülte a hagyományos tracheostomát. A nyelési funkció kiemelt jelentőséggel bír az ilyen típusú beavatkozások után. A graftok lefelé irányuló húzása akadályozhatja a gége emelkedését, míg a n. recurrens potenciális sérülése fokozhatja az aspiráció kockázatát.

Jelen tanulmányban a reszekciós margók gondos megtervezésére törekedtünk, és a nyelvcsontot is megtartottuk a gége mobilitásának támogatására. Az epiglottis és az aryepiglotticus redők szintén megmaradtak, hogy javítsák a légúti védekezést és a proprioceptív visszajelzést. Az MDADI pontszámok minimális nyelési károsodást jeleztek, és a betegek többsége visszatért a korlátozás nélküli per os táplálkozáshoz. Egy beteg enterális táplálásra szorult szilárd ételek intoleranciája miatt. A szubjektív hangértékelések társadalmilag elfogadható fonációt mutattak a teljes betegcsoportban. A hangrehabilitáció tovább javítható például lipoaugmentációval.

A megfelelő betegkiválasztás kulcsfontosságú a sikeres eredményekhez. Ellenjavallatot jelent az előrehaladott nyaki nyirokcsomó-érintettség, rossz általános állapot, valamint anatómiai korlátozottság. Ennek ellenére a kiterjesztett vertikális hemilaryngectomia rotációs

rekonstrukcióval életképes, funkciót megőrző alternatívát kínál a teljes gégeeltávolítással szemben, gondosan kiválasztott esetekben.

A tanulmány rávilágít arra, mennyire fontos az onkológiai biztonság és a funkcionális rehabilitáció egyensúlyának megőrzése. Az érellátás biztosítása, a varratfeszültség minimalizálása és strukturált posztoperatív protokollok alkalmazása mind hozzájárultak a kedvező kimenetelhez. A jövőbeli fejlődés a sebészi modellezésben és anyagtudományban tovább finomíthatja ezeket a megközelítéseket, javítva azok pontosságát és kiszámíthatóságát.

4.3 A 3D modellezés integrálása a rekonstrukciós gége–trachea sebészetbe

A rekonstrukciós gége–trachea sebészet gondos tervezést igényel, mivel az érintett anatómiai régió összetett, és a szerkezeti módosítások jelentős funkcionális következményekkel járhatnak. Hasonlóan más sebészeti területekhez, például az ortopédiához vagy a szívsebészethez, a 3D modellezés egyre fontosabb eszközzé válik a műtét előtti tervezés, sebészképzés és betegkommunikáció terén. A 3D modellezés fül-orr-gégészeti alkalmazásai folyamatosan bővülnek, többek között a hangszalagbénulás és gyermek légúti sebészet terén. E fejlődés ellenére a 3D tervezés még mindig alulhasznált a komplex gégesebészetben, főként a lágyszövet-képzés nehézségei és az anatómiai bonyolultság miatt. A pontos modellkészítés interdiszciplináris együttműködést és a radiológiai adatok gondos értelmezését igényli. A mesterséges intelligencia legújabb fejlődései javították a szegmentálási folyamatot, lehetővé téve az automatizáltabb és következetesebb modellgenerálást. A mélytanulási technikák ígéretesnek bizonyultak a légúti struktúrák azonosításában, csökkentve az operátori függőséget és növelve a pontosságot. Ennek ellenére a manuális szegmentálás továbbra is az arany standard a részletes, esetspecifikus modellek előállításában.

A digitális szobrászat fontos szerepet játszik a modellek finomításában és a szegmentálási hibák korrigálásában. Kapacitív táblagépek és stylus tollak használata növeli a pontosságot. Ezek a finomítások biztosítják, hogy a modellek anatómiaiailag pontosak legyenek, és alkalmasak nyomtatásra vagy virtuális manipulációra.

Az anyagválasztás alapvetően meghatározza a 3D nyomtatott modellek hasznosságát. Bár a kezdeti próbálkozások termoplasztikus poliuretán (TPU) anyaggal megfelelő szerkezeti integritást mutattak, ezek a modellek nem rendelkeztek a reális sebészi szimulációhoz szükséges rugalmassággal. Az áttérés a VAT fotopolimerizációs nyomtatásra, rugalmas gyantával, élethűbb modelleket eredményezett, melyek lehetővé tették a metszést, varrást és anatómiai manipulációt, ezáltal igazolva alkalmazhatóságukat a sebészképzésben és a műtét előtti szimulációban.

A sebészi hasznosításon túl a 3D modellek értékes eszközt jelentenek a betegek oktatásában is. Az, hogy a páciensek kézzelfogható vagy virtuális reprezentációt kapnak saját anatómiájukról, segíti őket állapotuk és a tervezett beavatkozás megértésében, ezáltal javítva a tájékozott beleegyezést és a beteg-elköteleződést. A pre- és posztoperatív modellek összehasonlítása tovább fokozza a betegek tudatosságát a műtéti eredményekről. Összességében a 3D modellezés integrálása a gége–trachea sebészetbe számos előnnyel jár: javítja a sebészi precizitást és képzést, valamint fokozza a betegkommunikációt. A jövőbeli kutatások célja a nyomtatási anyagok optimalizálása, az AI-alapú szegmentálás automatizálása, és a személyre szabott modellek szélesebb körű elérhetővé tétele a komplex légúti műtétekhez.

5. Korlátok és jövőbeli irányok

A jelen vizsgálat korláta közé tartozik a kis esetszám, a retrospektív, egyközpontú adatgyűjtés és az iSGS ritka előfordulása. A rotációs thyrotracheopexiával végzett hemilaryngectomia kizárólag szelektált esetekben alkalmazható. Az új sebészi technikák hosszú távú hatékonyságának értékeléséhez multicentrikus, prospektív és összehasonlító vizsgálatok szükségesek. A szegmentálás jelenleg időigényes, de a mesterséges intelligencia várhatóan javítja a folyamat hatékonyságát.

6. Következtetések

Az idiopátiás szubglottikus szűkület progresszív jellege miatt sebészi beavatkozást igényel. A slide laryngotracheopexia egy innovatív nyaki feltárásból végzett eljárás, amely helyi trachealis lebenyt használva rekonstruálja a gége elülső falát, megőrizve annak szerkezeti és funkcionális integritását. Eredményei alapján életképes alternatívát jelent, de további vizsgálatok szükségesek.

Előrehaladott, subglotticus régiót érintő gégedaganatoknál a thyrotracheopexiával kombinált kiterjesztett hemilaryngectomia szervmegtartó lehetőséget kínál, jó funkcionális és onkológiai eredményekkel. A jól érzett helyi trachealis szövet biztosítja a légzés, a hangadás és a nyelés megőrzését.

A CT-alapú 3D modellezés pontos, betegspecifikus tervezést tesz lehetővé, segíti a sebészi döntéshozatalt, a képzést és a betegkommunikációt. A jövőben az anyaghasználat finomítása és az AI-integráció tovább növelheti a technológia jelentőségét.