UNIVERSITY OF MEDICINE AND PHARMACY
"VICTOR BABEȘ" OF TIMIȘOARA
FACULTY OF MEDICINE
DEPARTMENT OF SURGERY

DAVIDOIU E. ANA-MARIA

DOCTORAL THESIS

Anatomical studies of the vertebrobasilar system

Doctoral supervisor

PROF. DR. PANTEA STELIAN

T i m i ș o a r a
2026

Summary

Introduction

The vertebrobasilar arterial system, formed by the union of the vertebral arteries into the basilar artery, supplies the posterior cerebral circulation and communicates with the carotid system through the arterial circle of Willis. Anatomical variations of these arteries are frequent and can have significant clinical implications. Understanding the variable neurovascular configurations—from anatomical, pathological, surgical, and embryological perspectives—is essential for physicians (neurosurgeons, neurologists, radiologists), since these variations can affect surgical planning and the correct interpretation of imaging investigations.

The vertebrobasilar system presents a wide spectrum of morphological variations: from anomalies of origin or caliber of the vertebral arteries, to variants of basilar artery termination, and variations of its branches (the cerebellar arteries) and of the posterior cerebral artery. Communication between the vertebrobasilar and carotid circulations allows important compensatory mechanisms in the context of arterial occlusions; however, these collateral mechanisms depend on the integrity of the circle of Willis, which is often incomplete or inefficient due to hypoplastic or absent segments.

Advances in imaging techniques—computed tomography angiography (CTA) and magnetic resonance angiography (MRA)—allow detailed visualization (2D and 3D) of the cerebral vascular anatomy in each patient. Large anatomo-imaging studies can reveal rare but clinically relevant variants, which must be recognized to avoid surgical complications and to properly interpret symptoms. Although preoperative imaging provides an anatomical "map" specific to each case, the surgeon must have solid knowledge of potential vascular variations and be able to recognize them independently, thereby increasing operative safety.

In this context, the present research explores in depth the variable anatomy of the vertebrobasilar system. The studies focused on the distal (intradural) segments of the vertebral arteries (the V4 segment), on the basilar artery and its main branches—particularly the posterior inferior cerebellar arteries (PICA) and the superior cerebellar arteries (SCA)—as well as on fetal-type variations of the posterior cerebral artery (PCA). This focus reflects both the high incidence and clinical impact of vertebrobasilar variations and the necessity of rigorously documenting these anatomical variants that had previously been insufficiently studied.

Objectives

The general purpose of the research was a comprehensive exploration of the anatomical variations of the vertebrobasilar arterial system through dissections and imaging studies, highlighting the clinical implications of these variations. The specific objectives included:

- **Intradural course of the vertebral artery at the bulbo-medullary junction**: determining the prevalence of the vertebral artery's ventral (anterior) course in relation to the medulla oblongata and its potential compressive effect on the brainstem.
- **Anatomical substrate of vertebral artery rotational compression syndrome (Bow Hunter's syndrome)**: evaluating arterial configurations that predispose to this syndrome (e.g., hypoplasia of one vertebral artery with contralateral dominance; termination of a vertebral artery in the PICA without contribution to the basilar artery).
- **Variations in the origin of the posterior inferior cerebellar artery (PICA)**: defining and quantifying the types of origin (extradural, transdural at the dural ring, typical intradural) and cases of absence of this artery, including the identification of a bihemispheric PICA (when a single PICA supplies both cerebellar hemispheres).
- **Incidence of the fetal-type posterior cerebral artery (fPCA)**: establishing the prevalence of fetal-type variants, unilateral and bilateral, and correlating them with other concomitant changes of the circle of Willis (e.g., hypoplastic or absent communicating segments).
- **Variations in the termination of the basilar artery and the origin of the superior cerebellar arteries (SCA)**: developing a new classification of SCA origin types (collateral branch of the basilar artery vs. terminal branch of the basilar artery vs. origin from the PCA) and analyzing possible bilateral combinations, including unusual termination patterns of the basilar artery (trifurcations or even quadrifurcations).

Materials and Methods

The study included two major components: (1) observations through anatomical dissections and (2) retrospective analyses of angiography (CTA and MRA), complemented by statistical interpretations.

Anatomical dissections: Dissections of the craniocervical region were performed on formalin-fixed cadavers, highlighting the course of the vertebral arteries at the craniovertebral junction and their relationships with neurovascular structures. The dissections demonstrated the manner in which the vertebral artery penetrates the dural sac at the level of the foramen magnum and its course along the ventrolateral surface of the medulla oblongata. These morphological observations supported the interpretation of imaging findings, illustrating anatomical variants such as abnormal vertebral artery courses or the position of branches (e.g., PICA) relative to cranial nerves IX–XII.

Retrospective imaging studies: Five sub-studies were carried out on archived CT (and in some cases MR) angiograms, as follows:

1. **V4 course at the bulbo-medullary junction**: 170 CT angiograms were analyzed to identify cases in which the intradural vertebral artery had an unusual anteromedial course

relative to the medulla oblongata (passing on its ventral surface and sometimes across the midline). The dominance of each vertebral artery (dominant – D, co-dominant – CD, or non-dominant – ND) was also recorded in these situations.

2. **Caliber of the V4 segment and Bow Hunter's syndrome**: 150 CT angiograms (selected with high-quality images and without lesions that could alter vascular anatomy) were used to measure the diameter of each intradural vertebral artery. A bilateral asymmetry ratio (BAR) was calculated, and a hypoplastic vertebral artery (HVA) was defined as having a diameter ≤2 mm and BAR ≤0.58. Atretic vertebral arteries—thin arteries that do not contribute to the basilar artery, instead terminating as a PICA, spinal, or occipital artery—were also identified. Each V4 artery was classified into an original six-type typology (from normal caliber to various degrees of hypoplasia/abnormal termination). The frequencies of each type were calculated, and bilateral type combinations were analyzed within the same individual.
3. **Variations of PICA origin**: 225 CT angiograms (127 men, 98 women) that included the craniocervical region were reviewed to determine, for each PICA (right/left), its origin according to a four-category classification: Type 0 – PICA absent or not opacified; Type 1 – extradural origin (from the V3 segment, below the dura); Type 2 – transdural origin (at the dural ring at the foramen magnum); Type 3 – intradural origin (the classic course from the V4 segment). The proportions of each PICA type and the bilateral combinations in each patient were recorded (to identify, for example, cases of bihemispheric PICA, in which a single PICA irrigates both cerebellar hemispheres).
4. **Fetal-type posterior cerebral artery (fPCA)**: 139 CT angiograms (adults) were analyzed to detect the presence of a fetal-type posterior cerebral artery—defined by predominant vascularization from the internal carotid artery via the posterior communicating artery (with the P1 segment of the PCA absent or markedly hypoplastic). It was noted whether the variant was unilateral or bilateral, complete (fPCA, absent P1) or partial (pPCA, thin but present P1). For each case with fPCA, the number of concomitant variant arterial segments in the circle of Willis was recorded (e.g., hypoplastic posterior communicating arteries, duplication of the anterior communicating artery, etc.).
5. **SCA origin and basilar termination**: 205 cases (190 CT angiograms and 15 high-quality MR angiograms) were evaluated to classify the origin of the superior cerebellar artery (SCA). An original classification with four types was proposed: Type 0 – absent SCA; Type 1 – collateral terminal origin from the basilar artery (classic anatomy); Type 2 – terminal origin from the basilar artery (SCA arising directly from the basilar bifurcation, alongside the PCA); Type 3 – origin from the PCA (from the ipsilateral P1 segment). The types of SCA on the right and left were recorded, along with the presence of fenestrations (segmentation) or duplications, as well as the bilateral type combinations. These configurations were correlated with the mode of basilar artery termination in each case—for example, the presence of a Type 2 SCA leads to a basilar trifurcation, while bilateral Type 2 SCAs lead to a basilar quadrifurcation (two SCAs + two PCAs at termination).

All imaging studies used anonymized data from the clinical archive, with institutional approval and in accordance with the Declaration of Helsinki. The collected data were processed statistically (proportions, means, comparisons) and compared with values from the literature to highlight potential differences or novel findings

Main Results

- **Intradural pre-bulbar course of the vertebral artery**: Almost one-fifth of cases (19.8%) presented an intradural vertebral artery with an abnormal anterior course relative to the bulbo-medullary junction. In 32 of 162 angiograms, usually the left vertebral artery (often of dominant caliber), the vessel angled anteromedially immediately after entering the subarachnoid space, passing on the ventral surface of the medulla oblongata (sometimes slightly across the midline) before forming the basilar artery together with the contralateral vertebral artery. In most of these cases, the ventrally coursing artery was of large caliber (14 dominant, 12 co-dominant, and only 6 non-dominant). This trajectory brings the artery into direct contact with the ventral surface of the brainstem, potentially compressing the medulla oblongata. The finding indicates that a pre-bulbar course of the vertebral artery is not rare (as previously believed), suggesting that in patients with signs of lower medullary involvement, the trajectory of the vertebral arteries should be evaluated by imaging to detect a possible neurovascular conflict.

- **Caliber variations of the vertebral artery (V4) and Bow Hunter's syndrome**: Of 274 vertebral arteries analyzed, ~82.5% were classified as type 1 (normal caliber), while ~17.5% showed reduced caliber (types 2–6 in our classification, representing different degrees of hypoplasia or atypical terminations). No case of type 3 (a rare, theoretical type not identified in this cohort) was found. Approximately 8.7% of all vertebral arteries studied did not unite with the contralateral vessel to form the basilar artery but instead terminated by supplying the PICA territory (essentially "terminal" vertebral arteries ending as PICA). At the individual level, only ~65% of patients had both vertebral arteries of type 1 (bilaterally normal). In the remaining ~35% of cases, caliber asymmetries were observed: most frequently, type 1 on one side combined with type 4 on the other (~21% of patients). Other asymmetric combinations included type 1 with type 2 (~4%), type 1 with type 5 (~3.7%), type 1 with type 6 (~5.8%), etc. No cases of severe symmetric bilateral hypoplasia were recorded. These results demonstrate that caliber asymmetries between vertebral arteries are very common, with basilar circulation often depending on a single dominant vessel. The identified configurations support the mechanism of Bow Hunter's syndrome: for example, in ~9% of cases only one vertebral artery formed the basilar artery (the other terminating as PICA). Thus, a head rotation compressing that single artery could produce vertebrobasilar ischemia. Imaging identification of a hypoplastic or atretic vertebral artery is therefore essential, as such variations may predispose to vertebrobasilar insufficiency or brainstem infarction if the dominant artery is compromised.

- **Origin of the posterior inferior cerebellar artery (PICA)**: Only ~58% of analyzed PICAs had the typical intradural origin (Type 3). A surprisingly high proportion of PICAs were absent or not opacified (Type 0) – ~36% of cases. Extracranial origins of the PICA were relatively rare but notable: ~5.6% of arteries had a transdural origin (Type 2, at the dural ring) and ~0.4% had a low extradural origin (Type 1, from the cervical V3 segment). Overall, more than 40% of patients had at least one PICA origin variation. Bilaterally, ~40.4% had both PICAs intradural (the "normal" situation on both sides), while ~18.7% had no PICA at all on either side (bilateral absence). In the rest, mixed combinations were encountered (e.g., one absent + one intradural in ~30.7% of cases; absent + transdural in ~3.1%, etc.). Four cases (1.8% of patients) were identified in which a single

PICA supplied both cerebellar hemispheres (true bihemispheric PICA, usually when the contralateral PICA was absent). This wide anatomical variability of the PICA highlights the necessity of preoperative recognition of a potential low origin: a PICA crossing the foramen magnum (type 1 or 2) may be injured or cause massive hemorrhage during lateral suboccipital/foramen magnum surgery. Moreover, the absence of a PICA implies that its territory is perfused through collaterals (either from the contralateral PICA or PCA branches), an important aspect in the evaluation of cerebellar ischemia.

- **Fetal-type posterior cerebral artery (fPCA)**: Thirteen cases of fetal-type PCA were identified among 139 patients (~9.4%). Most were unilateral variants (10 cases, ~7.2% of all patients), while bilateral fPCA was rarer (3 cases, ~2.2%). In 8 of the unilateral cases, the fetal PCA was complete (fPCA, absent P1 segment on that side), while in 2 cases it was partial (pPCA, thin but present P1). Of the 3 bilateral variants, two were bilateral fPCA, and one combined fPCA on one side with pPCA on the other. A remarkable finding was that the fetal PCA was often part of a globally variant circle of Willis: in more than half of cases (~54% of patients with fPCA), at least two other abnormal arterial segments coexisted (e.g., hypoplastic contralateral posterior communicating artery, duplicated anterior communicating artery, etc.). This suggests that the presence of an fPCA may indicate an overall incomplete circle of Willis, with possible clinical implications. For instance, a patient with an fPCA may be more vulnerable to ischemia in the occipital territory in case of ipsilateral internal carotid artery occlusion, as posterior collateral circulation is deficient. Therefore, identification of a fetal-type PCA on imaging should be followed by careful evaluation of the entire arterial circle of Willis to detect additional variations that may affect cerebral circulation.

- **Origin of the superior cerebellar artery (SCA) and termination of the basilar artery**: Classic anatomy (both SCAs originating as collateral branches from the basilar artery before its bifurcation) was encountered in ~58.5% of patients. In the remaining ~41.5%, variants were observed: in ~13.2% of cases, one SCA arose as a direct terminal branch of the basilar artery (Type 2 on one side, resulting in basilar trifurcation with the two PCAs), while the contralateral SCA had a normal origin (bilateral asymmetric model). In ~9.8% of patients, both SCAs had terminal origins (bilateral Type 2), producing a basilar quadrifurcation (two SCAs + two PCAs at termination) or modified trifurcations if a concomitant fPCA was present. Situations where the SCA arose from the PCA (Type 3) were rare (<5% of analyzed arteries), usually associated with an ipsilateral fetal PCA. Course variants were also noted: duplication of the SCA (two superior cerebellar arteries supplying the same hemisphere) in ~2.4% of cases, and segmental fenestration of the SCA in ~0.5%. Bilateral combinations of SCA types showed a tendency toward symmetry (same type on both sides) in ~70% of cases, while ~30% of patients displayed asymmetric configurations (different origins on right and left). These variations directly influence the termination of the basilar artery: a Type 2 SCA adds an extra branch to the basilar bifurcation, and two Type 2 SCAs generate a four-branch termination. Recognition of these configurations is of major clinical importance. Angiographically, a normal basilar trifurcation must be distinguished from the presence of an aneurysm (a third branch could be mistaken for an aneurysmal sac if the existence of an additional SCA is unknown). Furthermore, in neurosurgery, prior knowledge of an unusual origin or duplication of an SCA allows preservation of all arterial branches during surgery, preventing postoperative superior cerebellar ischemia.

Discussions

The present study confirms and expands current knowledge on the anatomical variability of the vertebrobasilar system, bringing important clarifications and new clinical perspectives. The results underline that many variations previously considered rare in older literature actually have a notable incidence, justifying increased attention to their identification in practice.

Regarding the course of the vertebral artery, we found a much higher frequency of the prebulbar course (≈20%) compared to earlier isolated reports (which suggested exceptional cases). This discrepancy may stem from differing definitions or from the increased sensitivity of modern imaging. The clinical implication is that a significant number of patients may present vascular compression of the medulla oblongata due to an abnormally situated vertebral artery, without necessarily having malformations or tumors. Thus, CT/MR angiographic evaluation of the bulbomedullary junction should be included in the diagnostic protocol for patients with unexplained bulbar symptoms, in order to exclude or confirm a vascular-neural conflict at this level.

Vertebral artery hypoplasia (VAH) and caliber asymmetries are confirmed to be common, and our six-type classification provides a standardized method of description. The incidence of severe hypoplasia (~17.5% of arteries) falls within the ranges reported in literature (variably between 2% and 26%, depending on definitions). We also reconfirmed the tendency toward left-side caliber dominance in most populations. More importantly, analysis of bilateral combinations highlighted that a significant proportion of individuals effectively rely on a single vertebral artery for basilar supply. This finding explains the susceptibility to Bow Hunter's syndrome and to transient vertebrobasilar insufficiency in cases where that dominant artery is compressed or occluded. In discussion, we argued that advanced imaging (CTA/MRA) plays a crucial role in diagnosing these syndromes: not only detecting dynamic stenoses, but also recognizing hypoplasia or abnormal vertebral artery termination can guide diagnosis. For example, a patient with vertigo episodes during head rotation should also be evaluated for possible contralateral vertebral hypoplasia, not only for mechanical compression of the other vessel.

Variations in the origin of the posterior inferior cerebellar artery (PICA) represent a notable contribution of this study, since we distinguished between transdural and extradural origins—an aspect often unclearly specified in other works. We showed that ~5% of PICAs arise at the dural ring, expanding embryological understanding of the vessel (suggesting a persistent anastomosis between intracranial and extracranial systems). Although true extradural origin is very rare (<1%), the existence of a transdural category explains why some PICAs may be injured during foramen magnum surgery even when they appear "normal" at first glance—their course actually traverses the dura and marginal sinus. The high incidence of absent PICA on one side (~36%) and even bilaterally (~19%) exceeds some earlier autopsy data, likely due to population differences or detection limitations in those studies. In any case, this result suggests that posterior cerebellar circulation may be ensured by vascular alternatives in more cases than previously thought. Our discussion emphasizes the importance of recognizing these variants: for example, the presence of a bihemispheric PICA means that injury to that artery (trauma, surgery) would affect both cerebellar hemispheres, a rare but very severe situation. Therefore, radiologists and surgeons must be vigilant in identifying a single dominant PICA when the contralateral one is absent on imaging. Analysis of the fetal-type posterior cerebral artery (fPCA) confirmed expected prevalence (~9% of patients), but highlighted a novel finding: fPCA frequently occurs within a more complex

"variant circle of Willis." We observed that many patients with fPCA also had other concomitant anomalies (e.g., absent contralateral posterior communicating artery, duplicated anterior communicating segment, etc.). This common embryologic context of variations suggests that development of the circle of Willis is interdependent—if one segment is altered (such as the PCA drawing its flow from the carotid), other segments may compensate or remain underdeveloped. The practical implication is significant: in ischemic events, an incomplete circle of Willis may limit collateral circulation. For instance, in an individual with unilateral fPCA and thin posterior communicating arteries, ipsilateral carotid occlusion would compromise both anterior and posterior cerebral territories. Our discussion noted that such configurations may explain some atypical patterns of mixed (anterior + posterior) infarcts reported in the literature, and that recognition of fPCA should prompt full evaluation of the circle of Willis to anticipate such risks.
Variations of the superior cerebellar artery (SCA) and of basilar termination, though rarer, were systematized here for the first time. Our data partially agree with autopsy studies (e.g., ~93% of SCAs arising from the basilar in a classic series vs. ~94% of SCAs in our cohort being either type 1 or duplicated). However, defining the "terminal" type of SCA (Type 2) brings clarity in identifying basilar trifurcations. In practice, neuroradiologists occasionally encounter images with three branches at the basilar bifurcation, and it is essential to discern whether this represents a normal variant (two SCAs and one PCA) or a lesion (aneurysm). The proposed classification facilitates this distinction while also providing the necessary language to describe bilateral configurations (e.g., "model F1" for basilar quadrifurcation, introduced in this thesis). In surgery, prior knowledge of an SCA duplication or of an SCA arising from the PCA allows the operative strategy to be adjusted: for example, in treating a basilar aneurysm, the surgeon will know that two SCAs must be preserved separately on one side, not a single one as expected. Thus, although SCA variations are less frequent than those of the PICA, they can have significant consequences in individual cases, and this work contributes to their awareness and understanding.

Overall, the discussions highlight the necessity of integrating knowledge of these vascular variations into current medical practice. By the breadth of its data and the new classifications proposed, this study contributes to shifting from a uniform approach based on classical anatomy toward an individualized approach, grounded in the actual anatomy of each patient.

Conclusions

- The pre-bulbar course of the vertebral artery at the bulbo-medullary junction has a notable incidence (~20% of cases). This trajectory brings the vertebral artery into direct contact with the ventral surface of the medulla, predisposing to brainstem compression. In patients with neurological signs of lower bulbar involvement, CT/MR angiographic evaluation of the vertebral artery course is required to identify a possible neurovascular conflict at this level.
- The arterial circle of Willis shows significant individual variations that are difficult to anticipate without investigation. Personalized angiographic evaluation of the circle of Willis is therefore mandatory in every patient (especially preoperatively), to establish whether it is complete or has hypoplastic/absent communicating segments (e.g., fetal-type PCA, duplications or absence of communicating arteries). These aspects may influence

clinical prognosis and intraoperative risk, since an incomplete circle limits collateral circulation in arterial occlusions.

- Routine imaging assessment of the vertebrobasilar system should include evaluation of the caliber of intradural vertebral arteries. Identifying a hypoplastic or atretic vertebral artery (very thin V4 segment or ending in PICA) has major clinical significance, since such a configuration predisposes to rotational compression syndrome (Bow Hunter's) and vertebrobasilar insufficiency. Radiologists should explicitly report the presence of severe vertebral hypoplasia, and clinicians should correlate these findings with symptoms (vertigo on head rotation, drop attacks, etc.), to ensure correct diagnosis and management.
- A low origin of the posterior inferior cerebellar artery (PICA)—extradural or transdural—represents an important risk factor in foramen magnum surgery. The dural ring of the vertebral artery lies adjacent to the marginal venous sinus; a PICA arising in this area may be injured or cause uncontrollable hemorrhage during cranio-cervical junction procedures. Preoperative knowledge of the existence of a low-origin PICA (present in ~5% of patients in this study) is therefore vital to prevent vascular complications in surgical approaches to the foramen magnum.
- A bihemispheric posterior inferior cerebellar artery (a single PICA supplying both cerebellar hemispheres) may have intradural or transdural origin and often forms loops descending below the posterior arch of the atlas. Such a variant may be exposed to cervical trauma or to interventional procedures at C1–C2 (e.g., suboccipital punctures, cervical nerve blocks). Although rare (~1.8% of cases), the possibility of a bihemispheric PICA should be considered when angiography shows absence of the PICA on one side—under such circumstances, the contralateral PICA may supply the entire posterior cerebellar territory.
- The superior cerebellar artery (SCA) displays multiple origin variants, and the termination of the basilar artery may vary accordingly. Besides the classic origin (preterminal collateral from the basilar), the SCA may arise as a direct terminal branch of the basilar (creating trifurcation) or even from the posterior cerebral artery (P1 segment). Fenestrations or duplications of the SCA may also occur. These variants appear in various bilateral combinations, so the exact mode of basilar termination—normal bifurcation or with additional branches—must be evaluated individually for each patient. Awareness of these particularities has diagnostic implications (avoiding misinterpretation of a trifurcation as an aneurysm) and therapeutic implications (ensuring preservation of all SCA branches during surgery to prevent superior cerebellar infarction).

In conclusion, this work highlights the high degree of variability of the vertebrobasilar system and emphasizes the importance of integrating this knowledge into medical practice. Recognition and understanding of vertebrobasilar anatomical variants enable more accurate neurovascular diagnosis, safer surgical planning, and ultimately, improved care for patients with posterior cerebral circulation disorders.

Original Contributions

- **Demonstration of the significant frequency of the pre-bulbar course of the vertebral artery:** Through a prevalence study on 170 CT angiograms, it was shown that the intradural vertebral artery may take a ventral course relative to the medulla in ~19.75% of

cases—far more than previously believed. This original finding supports including vertebral artery trajectory evaluation at the bulbo-medullary junction in imaging protocols for patients with signs of upper medullary compression, thus contributing to earlier diagnosis of neurovascular compression syndromes of the brainstem.

- **New classification of caliber variations of the V4 vertebral artery and bilateral analysis:** An original six-type classification was proposed for the caliber and termination patterns of intradural vertebral arteries, applied to 150 CT angiograms. This classification, together with strict definitions of hypoplasia (≤2 mm) and atresia, represents a novelty that standardizes the description of vertebral hypoplasias. Combined bilateral analysis revealed that only ~65% of individuals have both vertebral arteries normal, the rest showing asymmetries (for example, ~8.7% of vertebral arteries end in PICA instead of forming the basilar). These data expand understanding of the anatomic substrate of Bow Hunter's syndrome and vertebrobasilar insufficiency, highlighting how unilateral dominance or absence of one vertebral artery may compromise basilar circulation.
- **Original anatomo-imaging study of PICA origin and definition of transdural/extradural types:** The first large-scale study (225 CTA) dedicated to classifying PICA origin into four types (0, 1, 2, 3) was conducted. The results—absent PICA in ~36%, transdural origin in ~5.6%, extradural origin in ~0.4%, intradural in ~58%—represent new reference data. Particularly, the recognition that ~5% of PICAs originate at the dural ring (transdural) is a significant contribution, clarifying a poorly explored area. Bilateral analysis also allowed the first report of the incidence of bihemispheric PICA (~1.8%). These findings improve understanding of PICA variability and underline its surgical implications (risks at the foramen magnum, cerebellar collateral perfusion).
- **Detailed analysis of fetal-type PCA in the context of the circle of Willis:** In 139 CTA scans, a prevalence of ~9.4% of fetal PCA (mostly unilateral) was documented, distinguishing complete vs. partial subtypes. The original contribution lies in showing that fetal PCA rarely occurs in isolation—in more than half of cases, it co-exists with other variations of the circle of Willis (≥2 segments altered simultaneously). This integrative perspective brings new understanding of how variations associate embryologically and how they may influence patterns of stroke. Identification of fetal PCA should thus prompt full evaluation of the entire circle to detect other anomalies.
- **Introduction of an original classification for SCA origin and comprehensive description of variable basilar terminations:** Types 0–3 of SCA origin were defined for the first time and bilateral combinations were analyzed in 205 angiographic cases. Detailed statistical data were obtained for each type (e.g., bilateral normal origin in ~58.5% of patients; unilateral terminal SCA in ~13.2%; bilateral terminal SCAs in ~9.8%; PCA-derived variants <5%, etc.), and very rare situations were identified, such as basilar quadrifurcation. This innovative systematization provides a common language for describing SCA and basilar fork variants, facilitating their recognition on imaging and avoiding confusion with pathology (e.g., distinguishing normal trifurcation from aneurysm). At the same time, awareness of these variants guides surgeons in preserving arterial branches in atypical cases (e.g., protecting two separate SCAs on one side).
- **Correlation of anatomical findings with practical clinical recommendations:** Beyond factual contributions, the work has an original interdisciplinary character, translating anatomical discoveries into concrete suggestions for medical practice. Each variation

described is discussed in clinical context—from recommending specific imaging (e.g., checking vertebral course in bulbar syndromes) to operative precautions (e.g., attention to low-origin PICA in foramen magnum approaches, or correct interpretation of basilar trifurcation on angiograms). This approach ensures immediate application of acquired knowledge, increasing the safety of medical practice in posterior circulation pathology.

In sum, the thesis *"Anatomical Research on the Vertebrobasilar System"* enriches the literature with new data on the prevalence and typology of vertebrobasilar arterial variations, introducing useful classifications and concepts. The originality of the results and the established clinical correlations contribute to a better understanding of neurovascular anatomy and to optimizing the management of patients with posterior cerebrovascular disorders, providing a solid bridge between anatomical research and clinical practice.

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ŞI FARMACIE
„VICTOR BABEŞ” DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MEDICINĂ
DEPARTAMENTUL CHIRURGIE

DAVIDOIU E. ANA-MARIA

TEZĂ DE DOCTORAT

Cercetări anatomice ale sistemului vertebrobazilar

Conducător de doctorat

PROF. DR. PANTEA STELIAN

T i m i ș o a r a
2026

Rezumat

Introducere

Sistemul arterial vertebrobazilar, format prin unirea arterelor vertebrale în artera bazilară, deservește circulația cerebrală posterioară și comunică cu sistemul carotidian prin poligonul arterial al lui Willis. Variațiile anatomice ale acestor artere sunt frecvente și pot avea implicații clinice semnificative. Înțelegerea configurațiilor neurovasculare variabile – din perspectivă anatomică, patologică, chirurgicală și embriologică – este esențială pentru medici (neurochirurgi, neurologi, radiologi), întrucât aceste variații pot afecta planificarea intervențiilor și interpretarea corectă a investigațiilor imagistice. Sistemul vertebrobazilar prezintă un spectru larg de variații morfologice: de la anomalii de origine sau calibru ale arterelor vertebrale, la variante de terminare ale arterei bazilare și variații ale ramurilor sale (arterele cerebeloase) și ale arterei cerebrale posterioare. Comunicarea circulației vertebrobazilare cu cea carotidiană permite compensări importante în contextul ocluziilor arteriale; totuși, aceste mecanisme colaterale depind de integritatea poligonului lui Willis, care adesea este incomplet sau ineficient din cauza unor segmente hipoplazice sau absente.

Progresele tehnicilor imagistice – angiografia prin tomografie computerizată (angio-CT) și prin rezonanță magnetică (angio-RM) – permit vizualizarea detaliată (2D și 3D) a anatomiei vasculare cerebrale la fiecare pacient. Studiile anatomo-imagistice pe serii extinse pot descoperi variante rare, dar relevante clinic, care trebuie cunoscute pentru evitarea complicațiilor chirurgicale și interpretarea adecvată a simptomelor. Deși examenele imagistice preoperatorii oferă o „hartă" anatomică specifică fiecărui caz, chirurgul trebuie să aibă cunoștințe solide despre potențialele variații vasculare și să le poată recunoaște independent, sporind siguranța actului operator.

În acest context, prezenta cercetare abordează în profunzime anatomia variabilă a sistemului vertebrobazilar. Studiile s-au concentrat pe segmentele distale (intradurale) ale arterelor vertebrale (segmentul V4), pe artera bazilară și pe principalele sale ramuri – în special arterele cerebeloase posterioare inferioare (ACPI) și arterele cerebeloase superioare (ACS) – precum și pe variațiile de tip fetal ale arterei cerebrale posterioare (ACP). Acest focus reflectă atât incidența ridicată și impactul clinic al variațiilor vertebrobazilare, cât și necesitatea de a documenta riguros aceste variante anatomice insuficient studiate anterior.

Obiective

Scopul general al cercetării a fost explorarea comprehensivă a variațiilor anatomice ale sistemului arterial vertebrobazilar prin disecții și studii imagistice, evidențiind implicațiile clinice ale acestor variații. Obiectivele specifice au inclus:

- **Traiectul intradural al arterei vertebrale la joncțiunea bulbo-medulară:** determinarea prevalenței cursului ventral (anterior) al arterei vertebrale față de bulbul rahidian și potențialul compresiv al acestuia asupra trunchiului cerebral.
- **Substratul anatomic al sindromului de compresie rotațională a arterei vertebrale (Bow Hunter):** evaluarea configurațiilor arteriale care predispun la acest sindrom (de exemplu, hipoplazia unei artere vertebrale contralaterale cu dominanța celeilalte; terminarea unei artere vertebrale în ACPI fără contribuție la bazilară).
- **Variațiile de origine ale arterei cerebeloase posterioare inferioare (ACPI):** definirea și cuantificarea tipurilor de origine (extraduralã, transduralã la nivelul inelului dural, intraduralã tipicã) și a cazurilor de absență a acestei artere, inclusiv identificarea arterei ACPI biemisferice (când o singură ACPI vascularizează ambii hemisferi cerebeloși).
- **Incidența arterei cerebrale posterioare de tip fetal (ACP fetală):** stabilirea prevalenței variantelor de tip fetal, unilateral și bilateral, și corelarea acestora cu alte modificări concomitente ale poligonului Willis (de ex. segmente comunicante hipoplazice sau absente).
- **Variațiile de terminare ale arterei bazilare și originea arterelor cerebeloase superioare (ACS):** elaborarea unei clasificări noi a tipurilor de origine ale ACS (ramură colaterală din bazilară vs. ramură terminală a bazilarei vs. origine din ACP) și analizarea combinațiilor bilaterale posibile, incluzând situațiile de terminație neobișnuită a arterei bazilare (trifurcații sau chiar cvadrifurcații).

Materiale și metode

Studiul a cuprins două componente majore: (1) observații **prin disecții anatomice** și (2) **analize retrospective de angiografie** (angio-CT și angio-RM), completate de interpretări statistice.

Disecții anatomice: S-au realizat disecții ale regiunii craniocervicale pe cadavre formolizate, evidențiind traiectul arterelor vertebrale la joncțiunea cranio-vertebrală și raporturile lor cu structurile neurovasculare. Disecțiile au arătat modul de pătrundere a arterei vertebrale prin sacul dural la nivelul foramenului magnum și traiectul său pe fața ventrolaterală a bulbului rahidian. Aceste observații morfologice au sprijinit interpretarea constatărilor imagistice, ilustrând variante anatomice precum traiecte anormale ale arterei vertebrale sau poziția ramurilor (de ex. ACPI) față de nervii cranieni IX–XII.

Studii imagistice retrospective: Au fost derulate cinci sub-studii pe loturi de angiograme CT (și în unele cazuri RM) arhivate, după cum urmează:

1. **Traiectul V4 la joncțiunea bulbo-medulară:** 170 de angio-CT au fost analizate pentru a identifica acele cazuri în care artera vertebrală intraduralã are un traiect anteromedial neobișnuit față de bulbul rahidian (trecând pe fața ventrală a acestuia și eventual peste linia mediană). S-a notat, de asemenea, dominanța calibrului fiecărei artere vertebrale (dominantă – D, co-dominantă – CD sau non-dominantă – ND) în aceste situații.
2. **Calibrul segmentului V4 și sindromul Bow Hunter:** 150 de angio-CT (selectate cu imagini de înaltă calitate și fără leziuni ce ar putea altera anatomia vasculară) au fost folosite pentru a măsura diametrul fiecărei artere vertebrale intradurale. S-a calculat un raport de asimetrie bilaterală (RAB) și s-a definit artera vertebrală hipoplazică (AVH) ca

având diametrul ≤2 mm și RAB ≤0,58. De asemenea, s-au identificat arterele vertebrale atretice – acele artere subțiri care nu contribuie la bazilară, terminându-se în schimb ca ramură PICA, arteră spinală sau occipitală. Fiecare arteră V4 a fost încadrată într-o tipologie originală (6 tipuri, de la calibru normal la diferite grade de hipoplazie/terminare anormală). S-au calculat frecvențele fiecărui tip și s-au analizat combinațiile bilaterale de tipuri la același individ.

3. **Variațiile de origine ale ACPI:** 225 de angio-CT (127 bărbați, 98 femei) care includeau zona craniocervicală au fost revizuite pentru a determina, pentru fiecare arteră ACPI (dreapta/stânga), tipul de origine conform unei clasificări în 4 categorii: Tip 0 – ACPI absentă sau neopacifiată; Tip 1 – origine extraduralĂ (din segmentul V3, sub dură); Tip 2 – origine transduralĂ (la nivelul inelului dural de la foramen magnum); Tip 3 – origine intraduralĂ (traseul clasic din segmentul V4). S-au înregistrat proporțiile fiecărui tip de ACPI și combinațiile bilaterale la fiecare pacient (pentru a identifica, de exemplu, cazurile de ACPI biemisferică, în care o ACPI unică irigă ambii emisferi cerebeloși).
4. **Artera cerebrală posterioară de tip fetal:** 139 de angio-CT (adulți) au fost analizate pentru a depista prezența unei artere cerebrale posterioare (ACP) de tip fetal – definită prin vascularizația predominantă din artera carotidă internă via artera comunicantă posterioară (segmentul P1 al ACP fiind absent sau foarte hipoplazic). S-a notat dacă varianta era unilaterală sau bilaterală, completă (f-ACP, segment P1 absent) sau parțială (p-ACP, segment P1 subțire dar prezent). Pentru fiecare caz cu ACP fetală s-a consemnat numărul altor segmente arteriale variante concomitente în poligonul Willis (ex. comunicante posterioare hipoplazice, dublarea comunicantei anterioare etc.).
5. **Originea ACS și terminația bazilarei:** 205 cazuri (190 angio-CT și 15 angio-RM de calitate optimă) au fost evaluate pentru a clasifica originea arterei cerebeloase superioare (ACS). S-a propus o clasificare originală cu 4 tipuri: Tip 0 – ACS absentă; Tip 1 – origine colaterală finală din bazilară (anatomie clasică); Tip 2 – origine terminală din bazilară (ACS izvorând direct din furca bazilară, alături de ACP); Tip 3 – origine din ACP (din segmentul P1 ipsilateral). S-au notat tipurile de ACS pe dreapta și stânga, prezența eventualelor fenestrații (segmentare) sau duplicări ale ACS, precum și combinațiile bilaterale de tipuri. S-a corelat aceste configurații cu modul de terminare al arterei bazilare în fiecare caz – de exemplu, prezența unei ACS de Tip 2 duce la trifurcația bazilară, iar de Tip 2 bilateral la cvadrifurcația bazilară (două ACS + două ACP la terminare).

Toate studiile imagistice au folosit date anonimizate din arhiva clinică, cu aprobarea instituțională și în acord cu declarația de la Helsinki. Datele colectate au fost prelucrate statistic (proporții, medii, comparații) și comparate cu valorile din literatură pentru a evidenția eventuale diferențe sau noutăți.

Rezultate principale

- **Traiectul intradural prebulbar al arterei vertebrale:** Aproape o cincime din cazuri (19,8%) au prezentat o arteră vertebrală intraduralĂ cu traiect anterior anormal față de joncțiunea bulbo-medulară. În 32 din 162 de angiograme, de obicei artera vertebrală stângă (adesea calibru dominant), s-a angulat antero-medial imediat după intrarea subarahnoidiană, trecând pe fața ventrală a bulbului rahidian (uneori ușor peste linia

mediană) înainte de a forma bazilara împreună cu cealaltă vertebrală. În majoritatea acestor cazuri, artera cu traiect ventral era de calibru mare (14 dominante, 12 co-dominante și doar 6 non-dominante). Această variație de traiect aduce artera în contact direct cu suprafața ventrală a trunchiului cerebral, putând comprima bulbul rahidian. Descoperirea indică faptul că un traiect prebulbar al arterei vertebrale nu este rar (cum se credea anterior), ceea ce sugerează că la pacienții cu semne de afectare a bulbului rahidian inferior trebuie examinat imagistic și traiectul arterelor vertebrale, pentru a depista un posibil conflict neuro-vascular.

- **Variațiile de calibru ale arterei vertebrale (V4) și sindromul Bow Hunter:** Din 274 de artere vertebrale analizate, ~82,5% s-au încadrat ca tip 1 (calibru normal), iar ~17,5% au prezentat calibru redus (tipuri 2–6 în clasificarea noastră, reprezentând diferite grade de hipoplazie sau terminații atipice). Nu a fost întâlnit niciun caz de tip 3 (un tip rar teoretizat, dar neidentificat în acest lot). Aproximativ 8,7% din toate arterele vertebrale studiate nu se uneau cu cea contralaterală pentru a forma bazilara, ci se terminau alimentând teritoriul ACPI (practic artere vertebrale "terminale" în PICA). La nivelul indivizilor, doar ~65% dintre pacienți au avut ambele artere vertebrale de tip 1 (normale bilateral). În restul ~35% din cazuri s-au observat asimetrii de calibru: cel mai frecvent, combinația *tip 1 pe o parte + tip 4 pe cealaltă* (~21% din pacienți). Alte combinații asimetrice au inclus tip 1 cu tip 2 (~4%), tip 1 cu tip 5 (~3,7%), tip 1 cu tip 6 (~5,8%) etc. Nu s-au înregistrat situații de hipoplazie severă bilaterală simetrică. Aceste rezultate demonstrează că asimetriile de calibru între arterele vertebrale sunt foarte comune, circulația bazilară bazându-se adesea pe un singur vas dominant. Configurațiile identificate susțin mecanismul sindromului Bow Hunter: de pildă, în ~9% din cazuri numai o arteră vertebrală forma bazilara (cealaltă fiind terminată în ACPI), deci o rotație a capului care comprimă acea arteră unică poate produce ischemie vertebrobazilară. Identificarea imagistică a unei artere vertebrale hipoplazice sau atretice este, așadar, esențială, aceste variații putând predispune la insuficiență vertebrobazilară sau infarct de trunchi cerebral dacă artera dominantă este compromisă.
- **Originea arterei cerebeloase posterioare inferioare (ACPI):** Doar ~58% dintre arterele PICA analizate au avut originea intradurală tipică (Tip 3). Într-un procent surprinzător de mare, ACPI a lipsit sau nu a fost opacifiată (Tip 0) – ~36% din cazuri. Originea extracraniană a PICA a fost relativ rară, însă notabilă: ~5,6% din artere au avut origine transdurală (Tip 2, la nivelul inelului dural) și ~0,4% origine extradurală joasă (Tip 1, din segmentul V3 cervical). Per ansamblu, peste 40% dintre pacienți au prezentat cel puțin o variație de origine PICA. Bilateral, ~40,4% au avut ambele ACPI intradurale (situație „normală" pe ambele părți), în timp ce ~18,7% nu au avut deloc PICA pe niciuna dintre părți (absență bilaterală). În rest, s-au întâlnit combinații mixte (ex: o parte absentă + cealaltă intradurală în ~30,7% cazuri; absentă + transdurală ~3,1% ș.a.). S-au identificat 4 cazuri (1,8% dintre pacienți) în care o singură ACPI vascularizа ambii emisferi cerebeloși (ACPI biemisferică veritabilă, de obicei când PICA contralaterală lipsea). Această varietate anatomică extinsă a ACPI evidențiază necesitatea recunoașterii preoperatorii a unei eventuale origini joase: o PICA care traversează foramenul magnum (tip 1 sau 2) poate fi lezată sau poate produce hemoragii masive în timpul chirurgiei de șanț lateral/foramen magnum. De asemenea, absența unei PICA implică faptul că teritoriul său este perfuzat prin colaterale (fie de PICA contralaterală, fie de ramuri ale ACP), un aspect important în evaluarea ischemiei cerebeloase.

- **Artera cerebrală posterioară de tip fetal (ACP fetală):** S-au identificat 13 cazuri de ACP de tip fetal din 139 pacienți (~9,4%). Majoritatea au fost variante unilaterale (10 cazuri, ~7,2% din totalul pacienților), în timp ce ACP fetală bilaterală a fost mai rară (3 cazuri, ~2,2%). În 8 dintre cazurile unilaterale, ACP fetală a fost completă (f-ACP, segmentul P1 absent pe acea parte), iar în 2 cazuri a fost parțială (p-ACP, segment P1 subțire). Dintre cele 3 variante bilaterale, două au fost f-ACP pe ambele părți, iar una a combinat f-ACP pe o parte cu p-ACP contralateral. Un aspect remarcabil este că ACP fetală a fost adesea parte a unui poligon al lui Willis global variant: în peste jumătate din cazuri (≈54% dintre pacienții cu ACP fetală) au coexistat cel puțin două alte segmente arteriale anormale (de ex. comunicanta posterioară contralaterală hipoplazică, comunicanta anterioară dublă etc.). Această constatare sugerează că prezența unei ACP fetale poate indica un poligon Willis incomplet per ansamblu, cu posibile implicații clinice. De pildă, un pacient cu ACP fetală poate fi mai vulnerabil la ischemie în teritoriul occipital în cazul ocluziei arterei carotide interne ipsilaterale, deoarece circulația colaterală posterioară este deficitară. Prin urmare, identificarea unei ACP de tip fetal la imagistică trebuie urmată de o evaluare atentă a întregului poligon arterial cerebral pentru a depista și alte variații ce pot afecta circulația cerebrală.
- **Originea arterei cerebeloase superioare (ACS) și terminația arterei bazilare:** Anatomia clasică (ambele ACS originând ca ramuri colaterale din artera bazilară înainte de bifurcația acesteia) a fost întâlnită la ~58,5% dintre pacienți. La restul de ~41,5% s-au observat variante: în ~13,2% din cazuri, o ACS s-a născut ca ramură terminală directă a bazilarei (Tip 2 pe o parte, determinând trifurcația bazilară împreună cu cele două ACP), cealaltă ACS având origine normală (model bilateral asimetric). În ~9,8% din pacienți, ambele ACS au avut origine terminală (Tip 2 bilateral), ceea ce a dus la cvadrifurcația bazilarei (două ACS + două ACP separate la terminare) sau la trifurcații modificate dacă concomitent ACP era de tip fetal pe vreo parte. Situațiile în care ACS provine din ACP (Tip 3) au fost rare (<5% din arterele analizate), de obicei asociate cu prezența unei ACP fetale ipsilateral. S-au notat și variante de traiect: duplicarea ACS (două artere cerebeloase superioare irigând același emisfer) în ~2,4% din cazuri și fenestrația segmentară a ACS ~0,5%. Combinațiile bilaterale de tipuri ACS au arătat tendința de simetrie (același tip pe ambele părți) în ~70% din cazuri, însă ~30% din pacienți prezentau configurații asimetrice (diferența de origine între dreapta și stânga). Aceste variații influențează direct modul de terminare al arterei bazilare: o ACS de tip 2 adaugă o ramură în plus la furca bazilară, iar două ACS de tip 2 generează o furcă în patru ramuri. Recunoașterea acestor configurații are importanță clinică majoră. Angiografic, o trifurcație bazilară normală trebuie diferențiată de prezența unui anevrism (o a treia ramură poate fi confundată cu un sac aneurismal dacă nu se știe că există o ACS suplimentară). În plus, în neurochirurgie, cunoașterea prealabilă a originii neobișnuite sau a duplicării unei ACS permite conservarea tuturor ramurilor arteriale în timpul operației (evitând ischemia cerebeloasă superioară postoperatorie).

Discuții

Prezentul studiu confirmă și extinde cunoștințele despre variabilitatea anatomică a sistemului vertebrobazilar, aducând clarificări importante și noi perspective clinice. Rezultatele obținute subliniază că multe variații considerate rare în literatura veche au, de fapt, o incidență notabilă, justificând o atenție sporită la identificarea lor în practică.

În privința traiectului arterei vertebrale, am constatat o frecvență mult mai mare a cursului prebulbar (≈20%) comparativ cu rapoartele anterioare izolate (care sugerau cazuri excepționale). Această discrepanță poate deriva din criteriile diferite de definire sau din sensibilitatea crescută a imagisticii moderne. Implicația clinică este că un număr semnificativ de pacienți pot prezenta compresie vasculară asupra bulbului rahidian din cauza unei vertebrale anormal situate, fără a avea neapărat malformații sau tumori. Astfel, evaluarea prin angio-CT/RM a joncțiunii bulbo-medulare ar trebui inclusă în protocolul pacienților cu simptome bulbare de cauză neelucidată, pentru a exclude sau confirma un conflict vaso-nervos la acest nivel.

Hipoplazia arterei vertebrale (AV) și asimetriile calibrului sunt confirmate ca fiind comune, iar clasificarea noastră în 6 tipuri oferă un mod standardizat de descriere. Incidența hipoplaziilor severe (~17,5% din artere) se încadrează în intervalul literaturii (raportată variabil între 2% și 26%, în funcție de definiții). Am reconfirmat tendința unei dominanțe a calibrelor pe partea stângă la majoritatea populației. Mai important, analiza combinațiilor bilaterale a evidențiat că o proporție semnificativă de oameni depinde practic de o singură arteră vertebrală pentru vascularizația bazilară. Această constatare explică susceptibilitatea la sindromul Bow Hunter și la insuficiență vertebrobazilară tranzitorie în cazul comprimării sau ocluziei acelei artere dominante. În discuție, am argumentat că imagistica avansată (CTA/MRA) are un rol crucial în diagnosticul acestor sindroame: nu doar identificarea stenozelor dinamice, ci și recunoașterea unei hipoplazii sau terminații anormale de arteră vertebrală pot orienta diagnosticul. De exemplu, un pacient cu episoade de vertij la rotația capului trebuie investigat și pentru posibila hipoplazie a unei vertebrale contralaterale, nu doar pentru compresia mecanică a celeilalte.

Variațiile de origine ale arterei PICA (ACPI) reprezintă o contribuție notabilă a studiului, deoarece am reușit să distingem între originea transdurală și cea extradurală – aspect adesea neprecizat clar în alte lucrări. Am arătat că ~5% dintre ACPI se desprind la nivelul inelului dural, ceea ce extinde cunoașterea embriologică a vasului (sugerează o anastomoză persistentă între sistemul intracranian și extracranian). Deși originea extradurală autentică este foarte rară (<1%), existența categoriei transdurale explică de ce unele PICA pot fi lezate în chirurgia foramenului magnum chiar dacă par "normale" la prima vedere – practic traseul lor trece prin dura și sinusul marginal. Incidența ridicată a absenței PICA pe o parte (~36%) și chiar bilateral (~19%) depășește unele date din autopsii mai vechi, posibil datorită diferențelor de populație sau limitărilor de detecție în acele studii. Oricum, acest rezultat sugerează că circulația cerebeloasă posterioară poate fi asigurată prin alternative vasculare în mult mai multe cazuri decât s-a crezut. Discuția noastră subliniază importanța recunoașterii acestor variante: de exemplu, prezența unei PICA biemisferice semnifică faptul că o leziune pe acea arteră (traumă, chirurgie) ar afecta ambii emisferi cerebeloși, situație rară dar deosebit de gravă. Prin urmare, radiologii și chirurgii trebuie să fie vigilenți în a identifica o eventuală ACPI unică dominantă pentru ambele părți atunci când pe imagini lipsește PICA contralaterală.

Analiza arterei cerebrale posterioare de tip fetal (ACP fetală) a confirmat prevalențele așteptate (~9% dintre pacienți), însă a evidențiat un aspect nou: ACP fetală apare frecvent într-un

"poligon Willis variant" mai complex. Am observat că mulți pacienți cu ACP fetală prezentau și alte anomalii concomitente (ex. lipsa comunicantei posterioare contralaterale, segment comunicant anterior duplicat etc.). Acest context embriologic comun al variațiilor sugerează că dezvoltarea poligonului lui Willis are un grad de interdependență – dacă un segment se modifică (cum ar fi ACP preluând fluxul din carotidă), alte segmente compensează sau rămân nedezvoltate. Implicația practică este semnificativă: în evenimente ischemice, un poligon Willis incomplet poate limita colateralizarea. De exemplu, la un individ cu ACP fetală unilaterală și comunicante posterioare subțiri, ocluzia carotidiană ipsilaterală ar compromite atât teritoriul cerebral anterior, cât și posterior pe acea parte. Discuțiile noastre au menționat că aceste configurații pot explica unele modele atipice de infarct mixt (anterior + posterior) raportate în literatură și că recunoașterea ACP fetale ar trebui să determine evaluarea întregului poligon pentru a anticipa astfel de riscuri.

Variațiile arterei cerebeloase superioare (ACS) și ale terminației bazilarei, deși mai rare, au fost sistematizate pentru prima dată în această lucrare. Datele noastre concordă parțial cu studiile autoptice (de exemplu, ~93% dintre SCA provenind din bazilară raportat de un studiu clasic vs. ~94% dintre arterele ACS de părți laterale fiind fie tip 1, fie duplicate în studiul nostru). Totuși, definirea tipului "terminal" al ACS (Tip 2) aduce claritate în identificarea trifurcațiilor bazilare. În practică, neuroradiologii întâlnesc ocazional imagini cu trei ramuri la furca bazilară și este esențial să discearnă dacă este vorba de o variantă normală (două ACS și o ACP) sau de o leziune (anevrism). Clasificarea propusă facilitează acest discernământ, oferind totodată limbajul necesar pentru a descrie configurarea bilaterală (ex. "model F1" pentru cvadrifurcație bazilară, introdus în teză). În chirurgie, cunoașterea preexistentă a unei duplicări de ACS sau a unei ACS provenite din ACP permite ajustarea strategiei operatorii: de exemplu, la tratarea unui anevrism de bazilară, chirurgul va ști că trebuie să protejeze două vase ACS separate pe o parte, nu unul singur cum ar fi normal. Astfel, deși variațiile ACS sunt mai puțin frecvente decât cele ale PICA, ele pot avea consecințe semnificative în cazurile individuale, iar lucrarea de față contribuie la conștientizarea și înțelegerea lor.

În ansamblu, discuțiile evidențiază necesitatea integrării cunoștințelor despre aceste variații vasculare în practica medicală curentă. Studiul de față, prin amploarea datelor și noile clasificări propuse, își aduce contribuția la trecerea de la o abordare uniformizată bazată pe anatomia clasică la o abordare individualizată, bazată pe anatomia reală a fiecărui pacient.

Concluzii

- **Traiectul prebulbar al arterei vertebrale** la joncțiunea bulbo-medulară are o incidență apreciabilă (~20% din cazuri). Acest traiect aduce artera vertebrală în contact cu fața ventrală a bulbului rahidian, predispunând la compresia trunchiului cerebral. În prezența semnelor neurologice de afectare bulbară inferioară, este necesară evaluarea angio-CT/RM a traiectului arterelor vertebrale pentru a identifica un posibil conflict neuro-vascular la acest nivel.
- **Poligonul arterial al lui Willis prezintă variații individuale semnificative**, dificil de anticipat fără investigații. Se impune evaluarea angiografică personalizată a poligonului Willis la fiecare pacient (mai ales preoperator), pentru a stabili dacă acesta este complet sau prezintă segmente comunicante hipoplazice/aplazice (de ex. ACP de tip fetal, dublări sau absențe de comunicante). Aceste aspecte pot influența prognosticul clinic și riscul

intraoperator, deoarece un poligon incomplet limitează circulația colaterală în caz de ocluzii arteriale.

- **Evaluarea imagistică de rutină a sistemului vertebrobazilar trebuie să includă aprecierea calibrului arterelor vertebrale intradurale.** Identificarea unei artere vertebrale hipoplazice sau atretice (segment V4 foarte subțire ori terminat în PICA) are semnificație clinică majoră, întrucât o asemenea configurare favorizează sindromul de compresie rotațională (Bow Hunter) și insuficiența vertebrobazilară. Radiologul ar trebui să raporteze explicit prezența unei hipoplazii severe de arteră vertebrală, iar clinicianul să coreleze aceste constatări cu simptomatologia pacientului (vertij la rotația capului, drop-attacks etc.), pentru un diagnostic corect și o management adecvat.
- **Artera cerebeloasă posterioară inferioară (ACPI) cu origine joasă (extraduralș sau transdurală)** reprezintă un factor de risc important în chirurgia regiunii foramenului magnum. Inelul dural al arterei vertebrale este adiacent sinusului venos marginal; o ACPI care se desprinde în această zonă poate fi lezată sau poate produce o hemoragie dificil de controlat în timpul intervențiilor la joncțiunea cranio-cervicală. Prin urmare, cunoașterea preoperatorie a existenței unei ACPI cu traiect jos (prezentă la ~5% dintre pacienți conform studiului) este vitală pentru prevenirea complicațiilor vasculare în abordările chirurgicale ale găurii occipitale.
- **Artera cerebeloasă posterioară inferioară biemisferică (o singură ACPI vascularizând ambii lobuli cerebeloși)** poate avea origine intraduralș sau transdurală și adesea realizează bucle care coboară sub arcul posterior al atlasului. O astfel de variantă poate fi expusă la traumatisme cervicale sau la proceduri intervenționale C1–C2 (de ex. puncții suboccipitale, blocuri nervoase cervicale). Deși rară (~1,8% din cazuri), posibilitatea existenței unei ACPI biemisferice trebuie avută în vedere atunci când angiografia arată absența PICA pe o parte – în asemenea situații, cealaltă PICA ar putea prelua întregul teritoriu cerebelos posterior.
- **Artera cerebeloasă superioară (ACS) prezintă numeroase variante de origine, iar terminația arterei bazilare poate varia corespunzător.** Pe lângă originea clasică (colaterală preterminală din bazilară), ACS poate lua naștere ca ramură terminală a bazilarei (determinând trifurcația acesteia) sau chiar din artera cerebrală posterioară (segmentul P1). De asemenea, pot exista fenestrații sau duplicări ale ACS. Aceste variante apar în diverse combinații bilaterale, astfel că detaliile despre modul exact de terminare al arterei bazilare – bifurcație normală sau cu ramuri suplimentare – trebuie evaluate individual la fiecare pacient. Cunoașterea acestor particularități are implicații diagnostice (evitarea interpretării eronate a unei trifurcații ca leziune aneurismală) și terapeutice (protejarea tuturor ramurilor SCA în timpul chirurgiei, pentru a preveni infarctul cerebelos superior).

În concluzie, lucrarea de față evidențiază gradul înalt de variabilitate al sistemului vertebrobazilar și subliniază importanța integrării acestor cunoștințe în practica medicală. Recunoașterea și înțelegerea variantelor anatomice vertebrobazilare permit un diagnostic neurovascular mai precis, o planificare chirurgicală mai sigură și, în ultimă instanță, îmbunătățirea îngrijirii pacienților cu afecțiuni ale circulației cerebrale posterioare.

Contribuții originale

- **Evidențierea frecvenței semnificative a traiectului prebulbar al arterei vertebrale:** Printr-un studiu de prevalență pe 170 de angio-CT, s-a demonstrat că artera vertebrală intradurală poate avea un traiect ventral față de bulbul rahidian în ~19,75% din cazuri – mult peste ceea ce se credea anterior. Această constatare originală sugerează includerea evaluării traiectului arterei vertebrale la nivelul joncțiunii bulbo-medulare în protocolul imagistic al pacienților cu semne de compresie medulară superioară, contribuind la diagnosticarea mai promptă a sindroamelor de compresie neuro-vasculară a trunchiului cerebral.
- **Clasificare nouă a variațiilor de calibru ale arterei vertebrale V4 și analiza bilaterală:** S-a propus o tipologie originală în 6 tipuri pentru calibru și patternul de terminare al arterelor vertebrale intradurale, aplicată pe 150 de angio-CT. Această clasificare, împreună cu definiții stricte pentru hipoplazie (≤2 mm) și atrezie, reprezintă o noutate care standardizează descrierea hipoplaziilor arterei vertebrale. Analiza combinată bilateral a arătat că doar ~65% dintre indivizi au ambele vertebrale normale, restul prezentând asimetrii (de exemplu, ~8,7% din arterele vertebrale se termină în PICA în loc să formeze bazilara). Aceste date extind cunoașterea substratului anatomic al sindromului Bow Hunter și al insuficienței vertebrobazilare, evidențiind modul în care dominanța unilaterală sau absența unei vertebrale poate compromite circulația bazilară.
- **Studiu anatomo-imagistic original privind originea ACPI și definirea tipurilor transdural/extradural:** S-a realizat primul studiu amplu (225 CTA) dedicat clasificării originii arterei cerebeloase posterioare inferioare în patru tipuri (0, 1, 2, 3). Rezultatele obținute – ACPI absentă în ~36%, origine transdurală în ~5,6%, origine extradurală în ~0,4%, intradurală ~58% – constituie date de referință noi. În special, recunoașterea faptului că ~5% dintre PICA au origine la nivelul inelului dural (transdurală) este o contribuție semnificativă, clarificând o zonă puțin explorată. De asemenea, analiza combinațiilor bilaterale a permis raportarea în premieră a incidenței ACPI biemisferice (~1,8%). Aceste constatări îmbunătățesc înțelegerea variabilității PICA și subliniază implicațiile sale chirurgicale (riscuri la foramen magnum, perfuzie colaterală cerebeloasă).
- **Analiza detaliată a ACP de tip fetal în contextul poligonului Willis:** Pe 139 CTA s-a documentat o incidență de ~9,4% a ACP fetale (mai ales unilaterală) și s-au diferențiat subtipurile complete vs. parțiale. Contribuția originală constă în evidențierea faptului că ACP fetală rar apare izolat – în peste jumătate din cazuri ea co-există cu alte variații ale poligonului Willis (≥2 segmente modificate concomitent). Această perspectivă integrativă asupra poligonului arterial aduce o nouă înțelegere a modului în care variațiile se asociază embriologic și a modului în care ele pot influența patternul accidentelor vasculare cerebrale. Identificarea unei ACP fetale impune, astfel, examinarea întregului poligon pentru depistarea altor anomalii colaterale.
- **Introducerea unei clasificări originale pentru originea ACS și descrierea comprehensivă a terminațiilor bazilare variabile:** S-au definit în premieră tipurile 0–3 de origine ale arterei cerebeloase superioare și s-au analizat combinațiile bilaterale pe 205 cazuri angiografice. S-au obținut date statistice detaliate privind frecvența fiecărui tip (ex.: origine normală bilaterală ~58,5% pacienți; prezența unei ACS terminale în ~13,2%; ACS terminale bilaterale în ~9,8%; variante din ACP <5% etc.) și s-au identificat situații foarte

rare, precum cvadrifurcația arterei bazilare. Această sistematizare inovatoare oferă un limbaj comun pentru descrierea variantelor ACS și ale furcii bazilare, ușurând recunoașterea lor pe imagini și evitând confuzia cu patologia (de ex., distingerea trifurcației normale de un anevrism). Totodată, cunoașterea acestor variante ghidează chirurgii în conservarea ramurilor arteriale în cazurile atipice (ex.: protejarea ambelor ramuri ACS separate pe o parte).

- **Coroborarea constatatărilor anatomice cu recomandări clinice practice:** Pe lângă aportul factual, lucrarea are un caracter interdisciplinar original, traducând descoperirile anatomice în sugestii concrete pentru practica medicală. Fiecare variație descrisă este discutată în context clinic – de la recomandarea examinării imagistice specifice (ex.: verificarea traiectului vertebral în sindroame bulbare) până la precauții operatorii (ex.: atenție la PICA joasă în abordul foramenului magnum, sau la interpretarea corectă a trifurcației bazilare pe angiograme). Acest demers asigură aplicarea imediată a cunoștințelor dobândite, contribuind la creșterea siguranței actului medical în patologia circulației posterioare.

În ansamblu, teza **„Cercetări anatomice ale sistemului vertebrobazilar”** îmbogățește literatura de specialitate cu date noi despre prevalența și tipologia variațiilor arteriale vertebrobazilare, introducând clasificări și concepte utile. Originalitatea rezultatelor și corelațiile clinice stabilite contribuie la o mai bună înțelegere a anatomiei neurovasculare și la optimizarea managementului pacienților cu afecțiuni cerebro-vasculare posterioare, asigurând o punte solidă între cercetarea anatomică și practica clinică.