

**THEORY
OF ARCHITECTURE**
TEORIA ARCHITEKTURY

WERONIKA KRAUZE

M.Arch.

Cracow University of Technology
Faculty of Architecture
Architect, ARP Manecki Architekci sp. z o.o.
e-mail: weronika.krauze@doktorant.pk.edu.pl
ORCID: orcid.org/0000-0003-1922-3418

MACIEJ MOTAK

Prof. PhD, M.Arch.

Cracow University of Technology
Faculty of Architecture
e-mail: mmotak@pk.edu.pl
ORCID: orcid.org/0000-0002-5223-9895

NEUROSCIENCES IN ARCHITECTURE: APPLIED RESEARCH AND ITS POTENTIAL IN ARCHITECTURAL DESIGN

NEURONAUKI W ARCHITEKTURZE. WYKORZYSTYWANE BADANIA I ICH POTENCJAŁ W PROJEKTOWANIU ARCHITEKTONICZNYM

ABSTRACT

The aim of this paper is to review and introduce neuroscience research whose results offer the possibility or potential possibility for use in the discipline of architecture. This study is a proposal for a substantive introduction to systematics and a detailed description of the use of particular research methods at each stage of the design process. The article discusses necessary definitions and a historical outline of the interdiscipline, which was formed by combining architecture and neuroscience (neuroarchitecture). The most important information concerning the use of particular neuroscience research in architecture are also discussed, such as: observational and experimental methods from the field of environmental psychology, fMRI (functional magnetic resonance imaging), eye tracking, VR (virtual reality) and the EDA wristbands.

Keywords: neuroscience, EEG, fMRI, EDA, neuroarchitecture, architectural design, environmental psychology, inclusive design, neuroscience in architecture

STRESZCZENIE

Celem artykułu jest przegląd i przybliżenie badań z zakresu neuronauk, których wyniki wskazują na możliwość lub potencjał zastosowania ich w architekturze. Niniejsze opracowanie jest propozycją merytorycznego wprowadzenia do systematyki i szczegółowego opisu wykorzystania poszczególnych metod badawczych na każdym etapie procesu projektowego. W artykule omówiono kluczowe definicje i rys historyczny neuroarchitektury — interdyscypliny, która ukształtowała się dzięki połączeniu architektury i neuronauk. Przytoczono również najważniejsze informacje dotyczące wykorzystania poszczególnych metod i narzędzi właściwych neuronaukom w architekturze, takich jak: metody obserwacyjne i eksperymentalne z zakresu psychologii środowiskowej, fMRI (funkcjonalny rezonans magnetyczny), okulografia (eye tracking), VR (virtual reality) oraz opaski EDA.

Słowa kluczowe: neuronauki, EEG, fMRI, EDA, neuroarchitektura, psychologia środowiskowa, projektowanie architektoniczne, projektowanie inkluzywne, neuronauki w architekturze

1. INTRODUCTION AND AIM OF THE WORK

When designing a specific building, architects may not always fully comprehend and understand the needs of its future users, which often makes the design phase a difficult and complicated process, often leaning towards the subjective decisions of the designer rather than the objective needs of the users. Problems arise in particular when contact with future users is to some extent impossible or difficult — such groups include: young children (up to pre-school age) or people with disabilities who are unable to articulate their needs in a direct way. However, these are not the only ‘right’ target groups, as research shows that the brain’s sense of well-being in space is often governed by different laws than the subjective sense of aesthetics and taste, and is not necessarily a reflection of what we currently feel. Therefore, the study group can be any group of people, regardless of age and level of ability to express needs. Such problems are addressed by the interdisciplinary field included under the general term of neuroscience. The aim of this article is to provide an overview and insight into the specifics of research in this field that has the potential to be used in the process of architectural design. This review is a proposal for a substantive introduction to systematics and detailed description of the use of particular research methods in the field of architecture.

2. MATERIALS AND METHODS

The main research methods were a literature review and an analysis of research results published in 2017–2021 on the correlation of neuroscience and architecture. The purpose of the literature review was to find definitions of the concepts in question, to give an idea of their interdependence, and to select types of neuroscience research that have or could potentially have applications in architectural design:

- fMRI (functional magnetic resonance imaging);
- EEG (electroencephalograph) + VR (Virtual Reality);
- research using eye tracking + 3M VAS (Visual Attention Software);
- research using EDA (electrodermal activity) bands.

The next step was to search (using a systematic review method with keywords) for the most recent results of the above-mentioned studies conducted to assess the impact of the designed environment on human well-being and behaviour. When describing each type of research, a specific and most recent

example of its application in the field of architecture was cited, and an attempt was made to assess the applicability of the study in question to the design process.

3. NEUROSCIENCE AND ARCHITECTURE — DEFINITIONS AND BEGINNINGS OF COLLABORATIVE RESEARCH

In order to get a good understanding of the relationship between these two disciplines, it is necessary to cite their most general and simple definitions. Of course, both architecture and neuroscience can be defined in many appropriate ways with considerable degrees of complication, but when exploring the basic relationships it is worth going back to the basics.

Architecture is defined as a discipline *which organizes and shapes space in real forms necessary to satisfy material and spiritual human needs* (‘Architektura’, 2010). In turn, following the most famous treatise *Ten Books on Architecture* by Vitruvius, architecture should also have *durability, convenience and beauty* (Witruwiusz, 1999, p. 32).

Neuroscience, according to the most general definition, is an interdisciplinary of science dealing with the study of the nervous system, mainly the central nervous system (CNS). It lies at the intersection of medical, biological, biochemical, biophysical, informational, and psychological knowledge. It is used mainly in neurology and to a lesser extent also in psychiatry.

The common ground for the above-described disciplines is therefore the issue of human spiritual needs — it corresponds to the category of utility in the case of architecture, and to psychology and CNS research on the part of neuroscience. The application of neurosciences in architecture is a relatively new phenomenon (in the context of sciences in general) and is constantly developed due to the continuous technological progress, expanding possibilities and new methods of research. One of the main centres dealing with the connection of these two disciplines is the Academy of Neuroscience in Architecture (ANFA) based at the Salk Institute for Biological Studies (La Jolla, California, USA).

ANFA took shape in 2002 as a project of the American Institute of Architects (AIA). It was founded by John Paul Eberhard, for which he was awarded the Latrobe Prize (a biennial award of \$ 100,000 for research that leads to significant advances in architecture), which clearly confirmed the validity of the idea of research in the field between the two disciplines. Also significant for the

development of the Academy was a 2003 speech on architecture and neuroscience by Dr Fred Gage, principal investigator at the Salk Institute for Biological Studies in La Jolla, in which he stressed the importance of the relationship between the two. The location of the Academy in this particular building is also no coincidence, as one of the first and certainly most famous collaborations between an architect and a neuroscientist took place between the designer of the Salk Institute, Louis Kahn (and his team), and Jonas Salk, a biologist who wanted to unleash boundless creativity and open-mindedness in future employees through the design of the building. This idea was certainly realized, as to this day the building, located on a Pacific cliff, is considered an environment conducive to creative activities, and its form — literally and figuratively — opens up the horizon. The interior of the building is also conducive to mental creative work — the idea of open laboratories, symbolizing the blurring of boundaries between individual fields and disciplines and directing scientists towards interdisciplinarity, the reinforced concrete walls flowing with water towards the laboratories, or the finishing of corridors with boards making it possible to write down ideas while using communication — these are only some of the design solutions being the fruit of cooperation in the area of these two fields (ill. 1, 2).

4. NEUROSCIENCE RESEARCH USED IN ARCHITECTURE

Observational, experimental and laboratory studies in environmental psychology

As technology advances and develops, more sophisticated and detailed methods are available for the use of neuroscience research in architecture. The most traditional and, at the same time, those with the longest history are the observational and experimental methods of environmental psychology, usually requiring no specialized equipment. In this case, it was quite natural and obvious to link architecture with environmental psychology due to the fact that this discipline examines human-environment relations, with particular emphasis on the built environment. Much of the research in environmental psychology has been transferred to design applications. Christopher Alexander's major work *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction* (Alexander et al., 2008) is based largely on research into human behaviour and well-being in a given environment, and the influence of developmental psychology and sociology can also be seen there. This discipline is the oldest of all the

neurosciences used in architecture and is still today one of the most important elements when using other sciences during the design process. One of the most comprehensive and thorough textbooks describing the results of research on the human-environment interface is *Environmental Psychology* (Bell et al., 2005). The division into parts of the environment that affect humans and the description of different types of experiments and research conducted in the field of these relationships are a kind of paradigm in their field. Its pioneering nature has broadened the horizons for the next generations of scientists and prompted the multidisciplinary nature of research. In Poland, knowledge of environmental psychology is studied, among others, by Maria Lewicka, author of *Psychology of Place* (Lewicka, 2012) from 2012 and numerous publications on the perception of specific places by humans. Also the publications of Augustyn Bańka are a source of knowledge about this discipline as well as about the psychology of architecture. His publications: *Psychologia środowiskowa jakości życia i innowacji społecznych* (Bańka, 2018) from 2018 and *Behawioralne podstawy projektowania architektonicznego* (Bańka, 2016) are among the most comprehensive and valuable studies on environmental psychology.

FMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging)

Magnetic resonance imaging of the head is a medical imaging technique that uses a magnetic field and computer-generated radio waves. This examination, used mainly in neurology, aims to show potential changes in the structure of the brain, soft tissues, blood vessels, lymph nodes or bone elements. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a method of recording brain activity based on changes in cerebral blood oxygen levels (Gut and Marchewka, 2004, p. 36). Due to its relatively high spatial resolution, it is effective for locating brain areas involved in cognitive tasks (DeYoe et al., 1994). Since its dissemination in the early 1990s, it has been widely used by cognitive neuroscientists in the quest to understand the neural basis of cognition. Several years later, fMRI began to be used in empirical approaches to architectural design. Unfortunately, while there is an extensive literature on fMRI methodologies in neuroscience (Soares et al., 2016, p. 21), it is hardly accessible to researchers at the level of architecture and design due to its specialized and difficult language. Nor does it discuss issues specific to design. The early 2022 article 'Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) in Design Studies:

Methodological Considerations, Challenges, and Recommendations' (Hay et al., 2022) attempted to explain the methodology for conducting the study for the purposes of designers, but it only outlines a framework that may be clarified by researchers in the future. This does not change the fact that the studies conducted so far have shown a high correlation between the reactions taking place in the satisfaction centre (i.e., neural activity in the medial prefrontal cortex) and specific architectural spaces (Coburn, 2020). Alexander Coburn, in his study on the brain's response to building interiors, showed that the aesthetic experience of architectural interiors is based on the same reward systems that are associated with the pleasure of looking at beautiful faces and the satisfaction of primal appetites such as hunger and sex drive (Kowalska, 2021). As Gut and Marchewka stated in their article, *fMRI has proven that an important element of plastic changes in the brain, taking place under the influence of interruption of a particular type of stimuli, is the reorganization of cortical maps both within a given modality and between different modalities* (Gut and Marchewka 2004, p. 40), which suggests, due to the plasticity of the brain, a great importance of stimuli delivered/received by the built (architectural) environment on human mood and behaviour.

In 2017, an fMRI study was conducted on contemplative architecture (monumental, high aesthetic value) and its impact and perception by the human brain (Bermudez et al. 2017). Thirteen healthy men, Caucasian, aged 26–48 (mean age subject was 32), without visual impairment, right-handed, participated in the study. One respondent was removed from the study group based on an exclusion criterion (previous regular practice of meditation). All participants were active architects (average work activity: 5.4 years). Four images for each building were used during the fMRI study to simulate the intense architectural experience. Each image was chosen to capture the phenomenological essence of a particular building and to provide the viewer look from the outside to the inside. Of the ten most frequently cited buildings, five buildings were selected as those that generated an extraordinary architectural experience (Bermudez, 2008; Bermudez, 2009) (ill. 1) — the Pantheon in Rome, Chartres Cathedral in France, the Alhambra in Spain, the Chapel of Notre Dame du Haut in Ronchamp in France, and the Salk Institute in California, USA. The other five were typical buildings for contemporary American urban life: a high school, a downtown office building, a single-family suburban neighbourhood, a shopping mall and an urban multifamily housing complex. The

images were presented at a screen resolution of 1024×768 pixels. The presentation of the photographs was organized as two blocks consisting of ordinary buildings (control block) and contemplation-inducing buildings (experimental block). Before each study, the participant was given the following instruction: *We ask you to relax, be present, and try to imagine yourself being and experiencing the places you will be shown. We are interested in your perceptual, emotional, or intuitive response, not in your critical judgment. Therefore, imagine yourself transported to the buildings shown in the images. Just be present in that place and situation and let the experience be whatever it may be. Please, focus on the image and the image alone.* The fMRI study was also followed by questionnaires and brief interviews about the participants' feelings. Eleven of the twelve respondents were able to fully engage and relax while viewing the buildings assigned to the contemplative group. Nine reported that they were emotionally moved and felt a connection to the object, while describing the experience as intense. Two participants were more emotionally moved by the architecture on display, stating that they experienced a loss of a sense of self and achieved unity with the buildings on display. Only one research participant reported that he was unable to fully engage with the instructions as given and did not feel engaged in observing the images presented. The fMRI study itself identified significant, positive relationships between the sense of depth of experience and regional activations of selected brain areas over the course of the experiment. Significant differences were noted between activation and the buildings observed (different brain areas were activated during the observation of contemplative architecture and others during architecture defined as typical and ordinary) (ill. 4). The study proved that observing contemplative architecture triggers the same brain areas that activate during meditation. This confirmed the theory, that the built environment is able to directly influence a person's emotions and minimize conditions such as stress or fatigue. Weaknesses of the study were reported as the possibility of targeting specific emotions too literally through the instructions given to the test subjects, as well as the potential for familiarity with specific buildings prior to the study (which could result in outcomes correlated with memories of a particular building, rather than perceptions of architecture per se), these factors were cited as aspects to be emphasized in future studies. Despite these limitations, it was felt that this type of research could facilitate further discussion and work in the hitherto underdeveloped field of architectural and environmental knowledge with real potential in design and research work.

EEG (electroencephalography) and VR (Virtual Reality)

The EEG test checks the bioelectrical activity of the brain, and this is done through electrodes attached to the scalp on a special electroencephalograph (test methodology: 19 electrodes — eight electrodes over each hemisphere, three electrodes in the midline) (Glomb et al., 2021 p. 142) The device resembles in appearance a mesh cap to which coloured electrodes are attached (ill. 5, 6).

Pulses transmitted between neurons generate a signal, which the device records and gives an image in the form of a graph. Originally, this test was mainly used to diagnose epilepsy and sleep disorders, but it has never been a diagnostic test in its own right (an EEG result outside the ‘norm’ alone cannot determine the diagnosis). Over the years, the potential of this device began to be exploited in other scientific fields such as cognitive science, psychiatry and psychology. EEG is also used for the so-called BCI (brain-computer interface) and the recently popular bio-feedback training.

VR, or virtual reality, is an image of artificial reality created using information technology. Development on it began in the late 1960s and early 1970s by Myron W. Krueger and has been continuously improved since then. It involves the multimedia creation of a computer vision of objects, spaces and events. Its application is divided into entertainment (computer games, simulators) and specialist (medicine, aviation, astronautics, etc.). It allows us to experience specific events and situations in real time thanks to the image reproduction displayed using a set of goggles or a helmet. To enhance the reality and experience of the user, additional elements such as sound systems, VR gloves, VR seats or, for example, scent synthesizers are often used.

In architecture, it is very common to find applications for two test devices at the same time (EEG + VR). The test has a relatively simple methodology and course, but the reading and analysis of the results must be preceded by an analysis of each person’s brain activity separately (individuality of brain operation). Conducting research with the use of these devices consists in presenting the subject examined with diversified architectural spaces (usually for the same function, all the parameters of the building can be diversified, such as: the height of the room, sunlight level — the size of glazing, colours, materials, etc.) (Zhang et al., 2022) using a VR device and simultaneous recording of brainwave readings by an electroencephalograph. This study allows an objective assessment of the subject’s well-being and level of satisfaction in specific architectural spaces without

the need to build a 1:1 scale mock-up that allows one to experience and test the building under design, its fragment or solution in a life-sized scale and materials or to conduct field studies. It is therefore a study that only checks the perception of architectural space without the use of additional stimuli — when testing in the field, distractors should also be taken into account, i.e., variable factors that can distract attention and affect feelings such as temperature, wind, sunlight, humidity, noise, smells — they often interfere with the objective assessment of the architectural space itself.

In 2021 Kim et al. (2021) published a study on the effects of changes in architectural spaces on human responses on the relaxation-awakening plane based on VR and EEG. The study included private rooms in a postpartum care centre, presented in the form of a VR model. In Korea, where the study was conducted, postpartum mothers are most likely to choose private rooms in special care centres, where they stay for two to four weeks. The authors cited research (Mutua et al., 2020) showing that more than 85% of mothers experienced postpartum depression, emotional fluctuation and mood disorders, and therefore concluded that private rooms in postpartum care centres must be designed to provide psychological comfort to mothers. The participants in this study were 33 women who had used private rooms in postpartum care centres in the past. The main goal of the study was (through analysis of EEG results) to provide scientific guidelines to be considered in actual architectural design. The reason the study was limited to women who had experience using such a space, rather than the general population, was to make sure the results were appropriate for designing a private room for a well-defined target group. The VR model used in the study used varying space proportions, room heights and window sizes as architectural elements relevant to the perceived perception of the space. The designed room was 13 m² according to the standard for rooms of this type of study (ill. 7). The study focused on verifying any statistically significant differences in RAB rates before and after stimulation in response to different types of architectural elements in the VR spaces presented. It also examined whether specific brain lobes were involved in responses on the relaxation-stimulation plane. The study consisted of three parts: pre-test, EEG and post-test. In the first, they answered formal questions, the next was an EEG target study, and the last was a survey of the study spaces. The procedure was designed to capture any differences between the brainwave recordings and the feelings declared by the test subjects through a simple form assessing

excitation/relaxation (on the five-point Likert scale) depending on their virtual experience in a given space. The results of the study proved that the proportions of the space, its height and the size of the windows can have a negative or positive effect on the physiological response of the users, and that the EEG and questionnaires are not entirely consistent, so questionnaires alone should not be the only research method when assessing the quality of a space. Based on the survey results, the following design guidelines were created:

- *First, the recommended heights for room types A and B according to window ratios are 2.3 and 3.0 m for a ratio of 60%, 2.7 and 3.0 m for a ratio of 80%, and 2.7 and 2.3 m for a ratio of 100%.*
- *Second, the combinations of heights for rooms and window ratio that elicited the lowest level of arousal response were 2.3 m and 60% for Type A (1:1.6) and 2.3 m and 100% for Type B (1.6:1), and these combinations are recommended, respectively (Kim et al., 2021) (ill. 7, 8).*

Eye tracking (oculography)

Eye tracking is one of the relatively less complicated research methods, apart from medicine, used mainly in the consumer market (e.g., when arranging displays in shopping malls, arrangement of products on shelves, etc.) (ill. 9, 10). It is often called an *eye-tracking method, which is nevertheless not actually the main purpose of the method, which is the information about the visual 'path' created during the eye tracking of the viewed image, object — or generally speaking — during vision* (Duchowski, 2007, p. 51, transl. by W. Krauze). The operation of eye trackers in the case of most modern models is based on a method called corneal reflection, which consists in detecting and tracking the position and movements of the eyeballs. A high-resolution camera detects the position of the pupils, which are illuminated by infrared light invisible to humans. The infrared light bounces off the eyes, creating reflections that are clearly visible reflections in the pupils, by means of which it is possible to identify where the subject is looking at any given moment (Garczarek-Bąk, 2016, pp. 57–58). A typical eye-tracking measurement is based on the analysis of two basic activities of the organ of vision — the movement of the eyeballs (saccades) and their immobility (fixation):

- fixation — eye movements that stabilize the retina over a stationary object (they last between 100 and 600 ms);
- saccades — the rapid transfer of vision from one focus point to another (they take 20 to 40 milliseconds);

- total and average time spent looking at the material;
- number of revisits — looking at given elements again (Duchowski, 2007, cited in Kocki et al., 2018, p. 120).

The history of oculography dates back to the late 19th century, when the method used was the observation of the eye movement of the subject. Due to the low accuracy, over the years, devices performing very precise measurements (direction of gaze, duration of gaze at one point, duration of search for specific information, etc.) began to be used. In architecture, this method is used, e.g., in the evaluation of the accuracy and quality of visual identification (eye-catching) in buildings, but it has also found application in the critical assessment of the spatial order of urban streets. Such research has been conducted in Poland, among others, by Tomasz Dworek from the Poznań University of Technology, where the quality of space was assessed at Gwarna Street in Poznań (Głaz and Dworek, 2022). The study was based on finding the tailor's sign among other signs, billboards, advertisements and messages (ill. 11). The sample consisted of young people, who were classified as having a high level of perceptiveness. The average time to find a signboard was about 6 s, which was considered a long time to find a specific sign in a single photo. In addition, face reading (reading emotions from the subject's facial expressions) and EEG were also used to determine the emotions involved in the search. Increasing frustration was noticeable in the charts, while finding was accompanied by satisfaction and joy (ill. 12). The iMotions data integration platform was used to collect information from all these sources. The most comprehensible and unambiguous result of the research was a graphic with 'heat maps' (a term related to thermal imaging camera research due to the similar graphical depiction of the research results) which, precisely thanks to the eye-tracking method, shows what and how long the researcher focused on, or what was the 'gaze plot', which is a graph of the direction the eyes followed. The results of the study showed that positive emotions occur after seeing something already familiar and also that visual order helps in accurately reading the message and arousing positive emotions. Chaos leads to a longer search for specific information, as well as to a sense of confusion and disorientation which is an undesirable feature in urban spaces.

Also popular and more accessible to mass users has become the use of 3M's VAS method, based on more than three decades of analysis of eye tracking studies where a certain code was discovered

that defines five factors used by the human brain to pre-select the most ‘catchy’ visual information visible at ‘first glance’. 3M VAS uses knowledge of these biological brain shortcuts to simulate how viewers will view content.

In 2021, the journal *Architectural Science Review* published an article on the results of a study using the 3M VAS method (Hollander et al., 2021). In the introduction, the researchers pointed out that there are a number of paradigms in environmental psychology proclaiming that well-designed building facades, skilfully created edges and linearity of the street create spaces that are welcoming and perceived positively, but none of these studies showed how these aspects actually affect human behaviour biologically — there was no empirical evidence as to why a facade appearance is so important. Citing Mallgrave’s (2018) thesis proclaiming that it is not only compliance with building design regulations that is important in the design phase, but also consideration of the needs of people in their local community, the researchers decided to conduct a study of how the human brain perceives urban spaces. Using eye-tracking software, the study tracked people’s unconscious reactions to new urban spaces focused more on car traffic than pedestrians. The study was conducted in US suburban areas focusing on the facades of single-family homes. The study used a relatively new ready-to-use tool, which is the 3M Visual Attention Software (VAS), launched in 2011 (used to measure people’s unconscious visual responses to presented new streets and apartments in Devens, Massachusetts). The study focused on several areas in Devens and its surrounding communities, where the team of researchers spent several days photographing the neighbourhoods. The team focused on seventeen units of one- and two-family homes on Chance Street (ill. 13), taking 228 photos with strict rules (including that each photographer was instructed to stand at the curb and point the camera across the street, and to angle the lens to capture as much of the facade of the building opposite as possible from a distance of 5–12 m — all images were captured at a minimum resolution of 300 dpi). After being analysed by the VAS program, the researchers proved that by using this method they could determine what kind of architecture attracts the eye and what is overlooked by the human brain or treated more superficially. Diagrams of areas of interest showed how particular elements attract attention — including the front porches of the new houses with white columns and a symmetrical arrangement of windows, which captured the most attention, while garages that were

devoid of detail and simpler and located in an alley/parking lane did not cause eye fixation, which may be in line with the developer’s intention to provide privacy in this area. Areas highlighted in red are likely to be the most viewed (eyesight focus ranges from 74 to 98%) while areas highlighted in yellow will attract moderate attention (58 to 63%) (ill. 14). Areas marked in blue, such as rooftops of buildings or areas of empty roadway, are most likely to be ignored within the first 3 to 5 s. According to the researchers, eye-tracking software appears to have potential for architectural design and planning in urban areas. Designers, by visualizing their building, can quickly use VAS software to find out where the most eye-focused points are in the buildings they design, adjust them and evaluate their effectiveness. The resulting data can then be used in the design, making it evidence-based. However, the researchers in the article note that VAS successfully estimates where we will look when processing a given image, but the software cannot tell us the emotional nature of a person’s response or how people feel about buildings or landscapes. As a complementary method, they suggest that it is possible to combine eye tracking with other biometric data, including EEG, facial expression analysis (‘face reading’) and heart rate monitoring (e.g., EDA wristbands) to obtain this information. You can also rely on self-reports or surveys of subjects on how they feel when receiving a given stimulus. Eye tracking and tools such as VAS remain effective also because they help us see immediately how much of our response to the environment is determined unconsciously (Hollander et al., 2021).

EDA wristbands

Electrodermal activity (EDA; sometimes called galvanic skin response or GSR) refers to changes in the electrical conductivity of the skin in response to perspiration (often in small amounts). Its history dates back to the second half of the 19th century when Marie Gabriel Romain Vigouroux (1831–1911) carried out a simple study to discover the variation in tension on the hands in relation to hand movements. Charles Féré (1852–1907) proved that the resistance of the skin to an electric current is variable and dependent on the emotional state of the subject and the stimuli applied (he was interested in involuntary movements during an attack of hysteria). Féré is considered to be the discoverer of the skin-galvanic reflex, which means a temporary change in skin resistance caused by an external stimulus (e.g., noise) or an internal one (thoughts, emotions). Subsequent studies extended

these theories and found applications in psychological and psychiatric experiments. There has even been an hypothesis, supported by research (Wincewicz-Cichecka and Nasierowski, 2020, p. 1142), which states that electrodermal activity can be a biomarker of suicidal tendencies, suggesting that this factor can carry a lot of relevant information.

As can be seen from the above description, testing with this device tests responses to particular stimuli, which can also serve in studying responses to the architectural (urban) environment. An analysis of the literature shows that EDA wristbands are rarely used as a stand-alone measurement device, most often accompanied by additional research methods. In 2020, a study was presented at the Anthropologic: Architecture and Fabrication in the cognitive age conference at the Technical University of Berlin, on a cybernetic approach to virtual emotional spaces — precisely to adaptive space (adaptive architecture is defined as buildings that can change their function depending on the needs of users) activated by electrodermal activity. The research project, which was discussed by the authors of the study at the conference, concerned *the development of a system that adapts the environment (virtual environment) to its occupants based on the predefined emotional needs of the building's audience* (Maghool et al., 2020, transl. by W. Krauze). The researchers pointed out that there are a number of solutions in which the building adapts to changes in the environment, such as weather or sunlight, while there are no studies by which the building changes according to the human factor, i.e., the emotional needs of the users, among others. In their project, the researchers wanted to develop a method for automatically adjusting a building to a person's emotional state through the use of VR apparatus and EDA wristbands. The starting point was current theories of emotions: *While there is no clear definition of emotion, dominant theories — including James-Lange theory, Cannon-Bard theory and Schachter-Singer theory — emphasize that emotional responses are closely related to autonomic physiological responses. Regardless of all the differences between these relationships, it is constant that the experienced emotions never precede physiological reactions* (Maghool, Homolja and Schnabel, 2020, p. 539; transl. by W. Krauze). Such an understanding of emotions gives great opportunities to measure and quantify them by measuring and quantifying physiological responses. Researchers emphasized that the use of specialized equipment allows to achieve much less subjective results than, for example, surveys, because physiological

reactions, which are an integral part of emotions, are mostly the result of unconscious processes related to the autonomic nervous system and the sympathetic nervous system.

In the context of architecture, the goal of an architectural adaptive system may be, depending on the object, to maximize emotional arousal (for memorial buildings, amusement parks, religious buildings, etc.) or to minimize the level of emotional arousal (e.g., for health centres). This suggests that there is no ultimate goal in terms of a building's emotionality without considering its context and programme. For the purposes of their study, Maghool, Homolja and Schnabel proposed an 'abstract architectural emotional goal', which is to maintain the emotional neutrality of users in a virtual architectural space (ill. 11). Based on the literature, five interior design features were selected to manipulate the level of emotional arousal in a virtual environment: 1. Colour; 2. Geometry (linear and non-linear); 3. Size; 4. Biophilic; 5. Sound (Maghool, Homolja and Schnabel, p. 541). For each of these five characteristics, two extremes were created and named stress-inducing and stress-reducing conditions. Architectural spaces corresponding to two extremes and one in the morphing type (where it is possible to smoothly transition from one extreme to the other) were created, and then, using Blender and Unreal Engine 4 software, models for use in VR apparatus were generated. To measure the emotional state, EDA bands were used, and information was transmitted via Bluetooth to a custom Python 3 module. The study, due to its pilot nature, was conducted on four adults and therefore lowered the level of empirical evidence, but was the initial data set needed to see if the system worked and a meaningful galvanic skin response (GSR) could be obtained. The findings suggest that the VR setup created is capable of operating with the level of emotional arousal measured by the GSR signal. However, to accurately determine this, the researchers stressed that more scientific research is needed, as well as consideration of other testing apparatus such as an EEG or facial expression measurement device.

5. CONCLUSIONS

The above list of research methods and a description of the research carried out in the field of neuroscience in architecture provide reliable evidence that by combining these two disciplines, it is possible to obtain innovative and, above all, objective data. The neuroarchitecture created in this way has significant potential in the context of the idea of conscious,

inclusive and modern design. As it results from the described fMRI study, a specific type of architecture may influence the stimulation of particular brain structures, causing specific emotional states, comparable to those generated by engaging mentally engaging activities, e.g., meditation. This suggests that the built environment has a real influence on how our body functions by evoking or enhancing individual feelings. It also proves that thanks to the appropriate design of the space, it is possible to minimize such feelings as stress or fatigue, which is of particular importance in buildings whose function can generate extreme emotions.

The VR and EEG study on private room designs for postnatal care centres showed that there are many correlations between a room (its proportions, height and glazing) and well-being that the subjects were not fully aware of and could not name, and only brain wave measurement was able to determine these sensations. This study confirmed that specific architectural treatments affect the level of relaxation in the studied group of women, which enabled the formulation of design guidelines that suggested parameters desired in this type of room.

Research using eye tracking and VAS based on it shows how sensitive the human brain is to certain stimuli and to what extent it can ignore certain factors. These studies, particularly helpful in assessing the quality of space, proved that urban or architectural space can be manipulated in such a way as to highlight certain parts of the built environment or deliberately make them ignored. Designing elements that build a common space in a legible, clear and orderly manner causes people to perceive, for example, street spaces or residential buildings more positively, it is easier for them to find each other and feel safer. On the other hand, moving the object back to the background and the lack of details mean that the human eye does not focus on such objects and 'goes further', which is helpful in designing private spaces that are not to arouse the interest of strangers. On the other hand, the study using EDA bands can be primarily used as an additional research method, supplementing questionnaires or the VR method. The ability to record stress levels using such a simple device will allow for more accurate test results and the indication of specific places that generate

voltage. This seems to be particularly useful in studies of urban space, where it is sometimes difficult to identify a specific problem of a given place on the basis of questionnaires.

According to the authors, the studies described in the article have particular potential not only among the groups in which they were conducted, but also among people with limited ability to contact or express emotions and preferences (young children, people with disabilities). The possibility of using a number of advanced studies that give knowledge of the human brain carries great potential in architectural design, making the whole process more holistic and focused on specific needs. Especially the functional magnetic resonance imaging (fMRI) method and the combination of VR and EEG methods introduce a new quality to the objective assessment of specific design solutions. When analysing the research results, it can be assumed that the application of these methods at the concept stage may reduce the probability of functional or aesthetic errors in the design. The most optimal solution would be to conduct this type of research on a group consisting of future users (or model future users) so that the architecture meets the specific needs of a given audience, not relying only on existing assumptions or design guidelines, which are often too general. In conclusion, there is a great need to continue and expand research in the field of neuroarchitecture, as it may bring about positive changes that we might never have been aware of without the results of this research. Advances in technology are resulting in the development of newer and newer research methods (or improvement of current ones, as is done, for example, by Elon Musk's Neuralink company, which deals with implantable brain-machine interfaces), and research conducted in many countries is uncovering new possibilities for the application of neuroscience research methods in architecture. Over the past few years, there has been a significant increase in interest in these topics, which has simultaneously had the positive consequence of the creation of numerous publications, conferences or research groups working closely on the above issues. The areas of research described in the article seem to carry great potential and the possibility of reorganizing and enriching the design process as we know it so far.



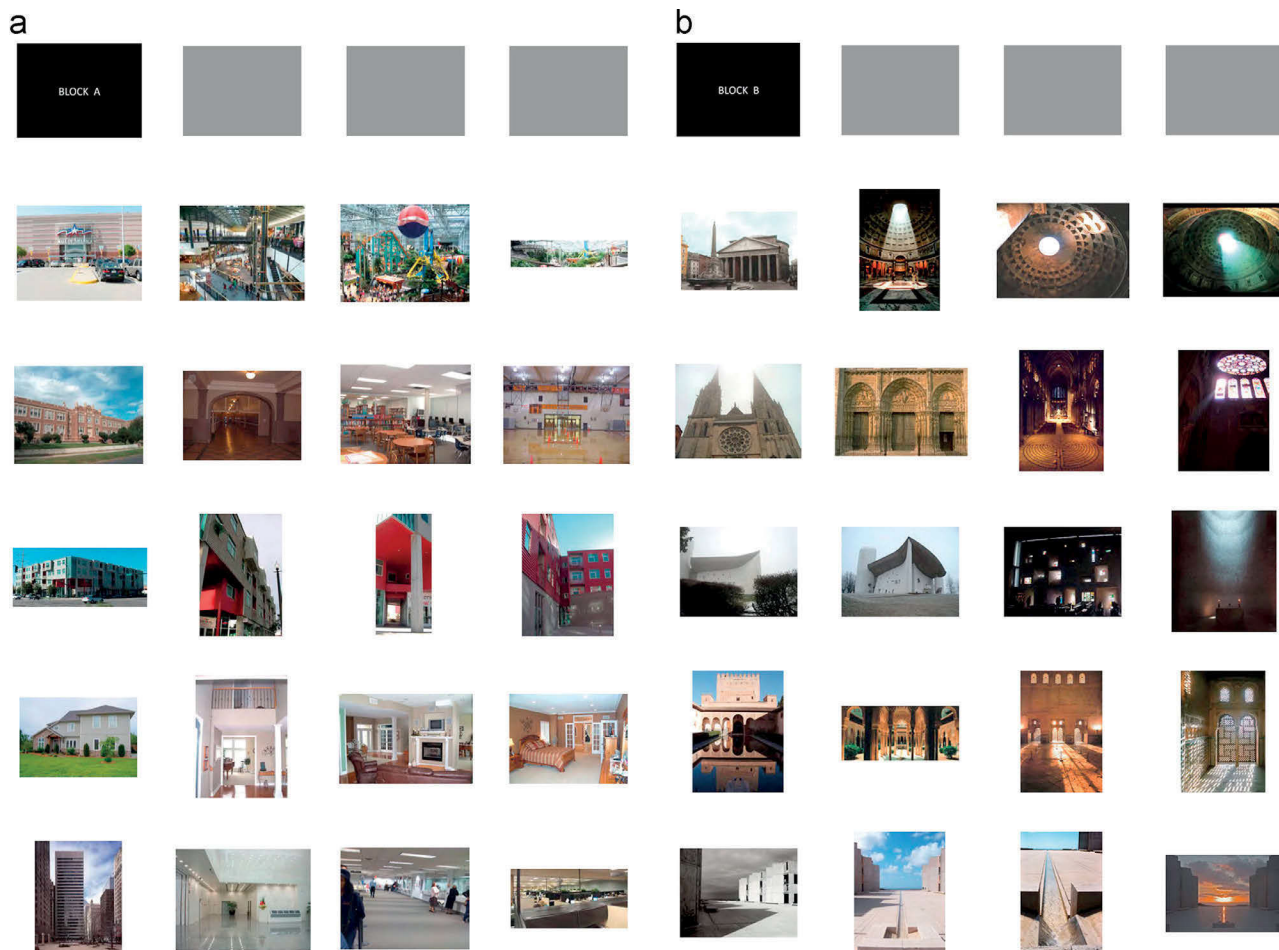
III. 1. Salk Institute for Biological Studies, La Jolla (San Diego, California, USA). Photo by W. Krauze, 2022.

II. 1. Instytut Salka, La Jolla (San Diego, Kalifornia, USA). Fot. W. Krauze, 2022.



III. 2. Salk Institute for Biological Studies, La Jolla (San Diego, California, USA). Photo by W. Krauze, 2022.

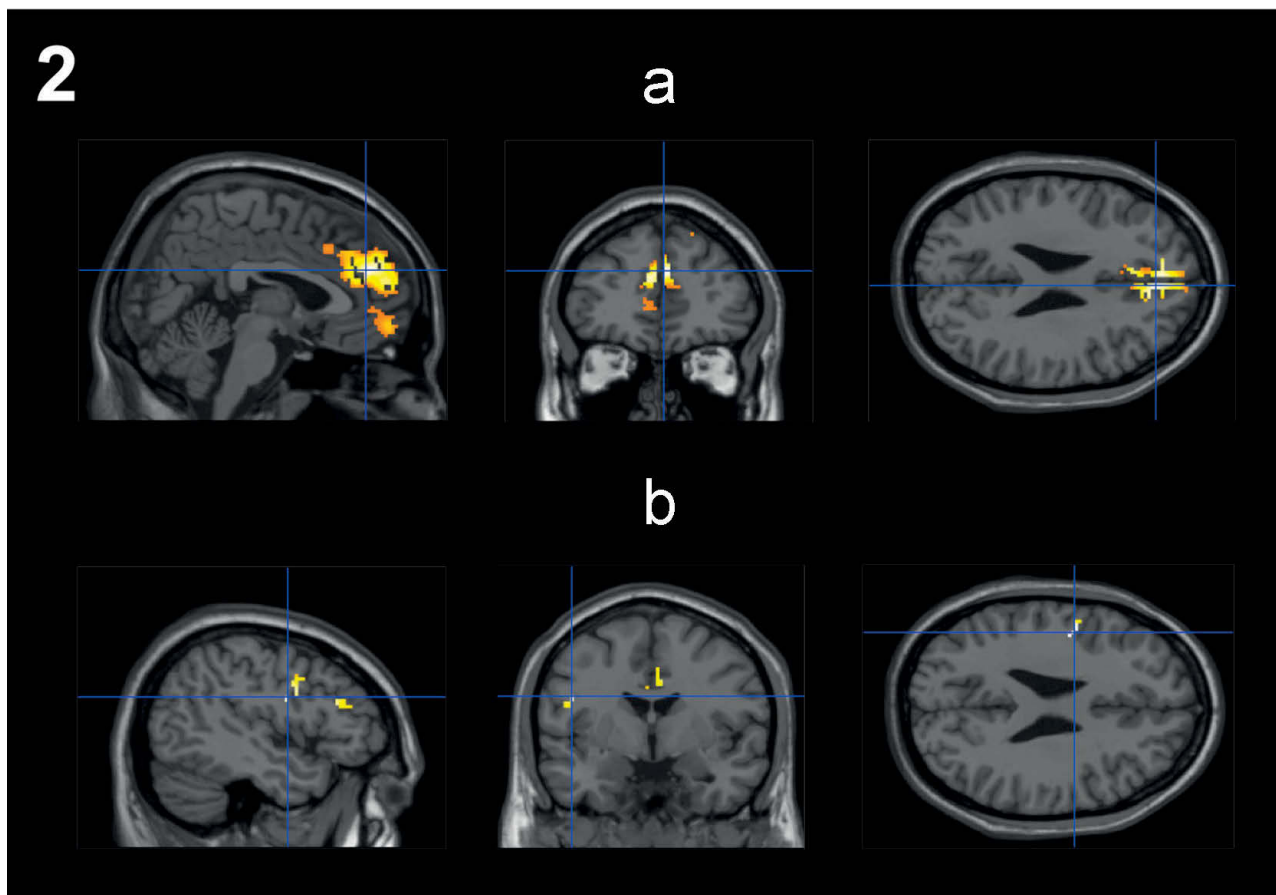
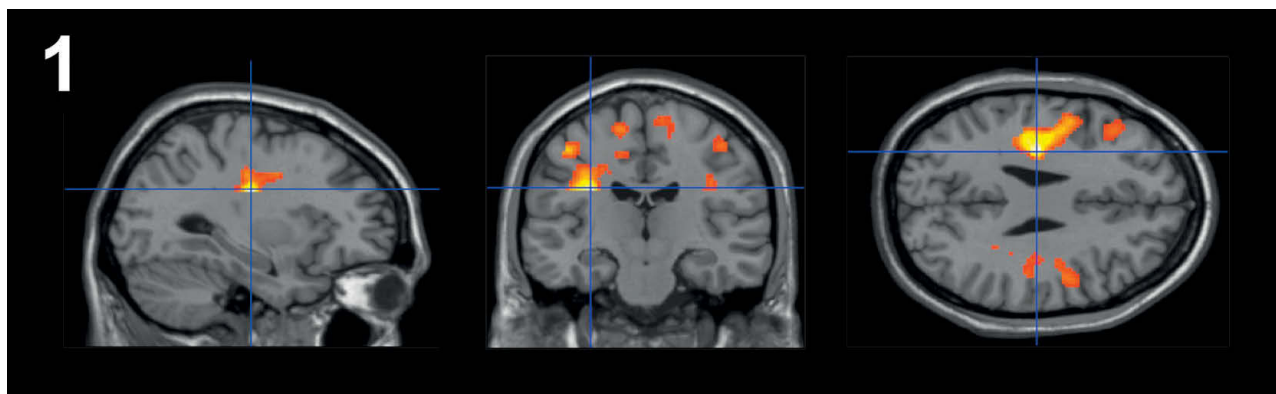
II. 2. Instytut Salka, La Jolla (San Diego, Kalifornia, USA). Fot. W. Krauze, 2022.



III. 3. All forty building images shown to the subjects (4 photos per building, 10 buildings). 20 images were presented in Block A (Control) and twenty in Block B (Experimental).

II. 3. 40 fotografii budynków pokazanych badanym (10 budynków, po 4 zdjęcia każdego). 20 obrazów zaprezentowano w bloku A (kontrolnym), 20 w bloku B (eksperymentalnym).

Source/źródło: (Bermudez et al., 2017).



III. 4 fMRI — brain activation contrast between normal (control) and contemplative (experimental) buildings.

II. 4. fMRI — kontrast aktywacji mózgu między budynkami zwykłymi (kontrolnymi) i kontemplacyjnymi (eksperymentalnymi).

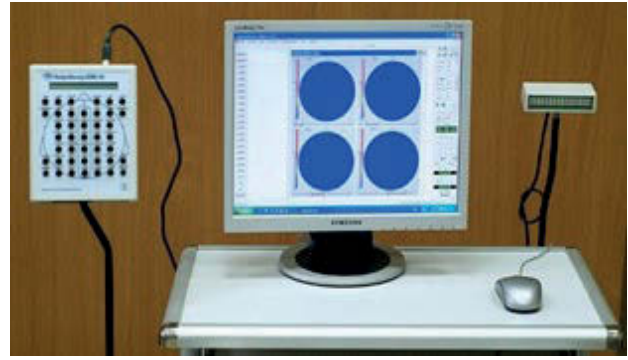
Source/źródło: (Bermudez et al., 2017).



III. 5. Young boy during an electroencephalogram (EEG) examination.

II. 5. Młody chłopiec podczas badania elektroencefalografem (EEG).

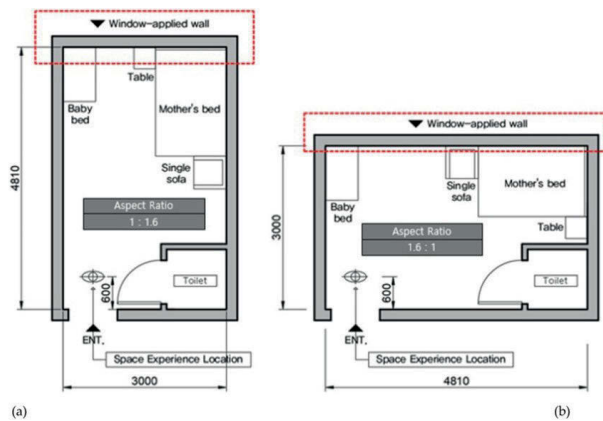
Source/źródło: <https://www.medme.pl/cogninet/artykuly/badanie-ecg-glowy-dziecka-wskazania-i-przebieg,67435.html> (accessed: 20.04.2022).



III. 6. An electroencephalogram machine (EEG).

II. 6. Elektroencefalograf (EEG).

Source/źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektroencefalograf#/media/Plik:Electroencefalograph_Neurovisor-BMM_40_\(close_view\).jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektroencefalograf#/media/Plik:Electroencefalograph_Neurovisor-BMM_40_(close_view).jpg) (accessed: 20.04.2022).



III. 7. A and B types of space (floor plan).

II. 7. Typ przestrzeni A i B (rzut).

Source/źródło: (Kim, Park and Choo, 2021).



(a)



(b)

III. 8. A and B types of space (VR space 360° 3D image example).

II. 8. Typ przestrzeni A i B (przykładowy obraz w przestrzeni VR 3D).

Source/źródło: (Kim, Park and Choo, 2021).



Ill. 9. Commercial eye tracking study.

Il. 9. Badanie komercyjne za pomocą okularów eyetrackingowych.

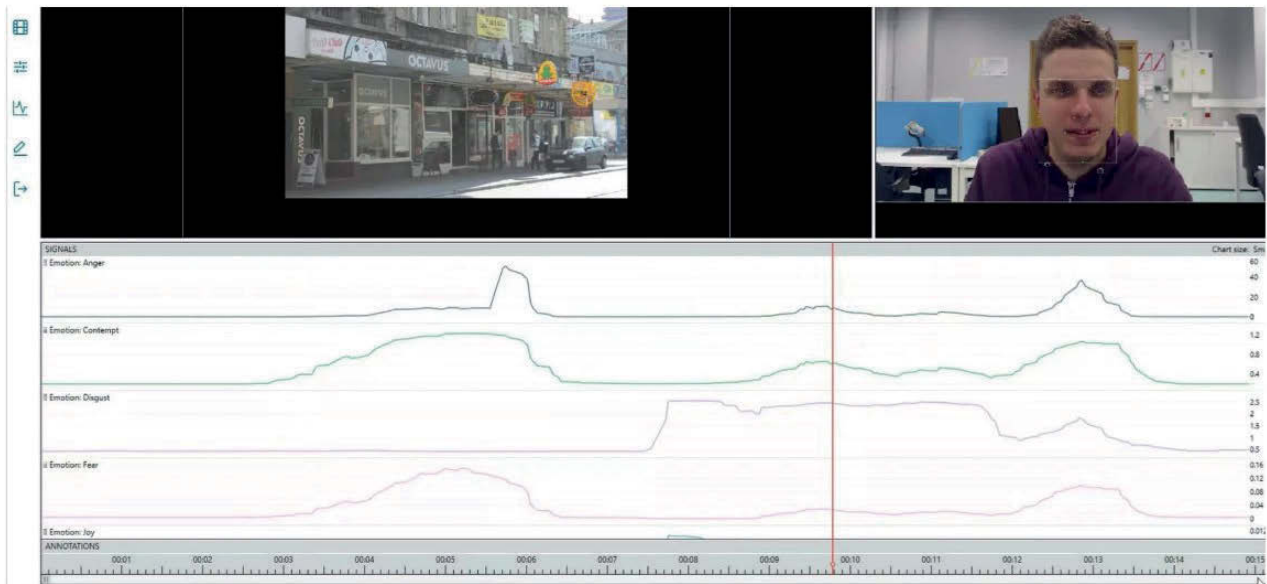
Source/źródło: <https://www.flickr.com/photos/nestle/5908207586/in/photostream/> (accessed: 20.04.2022).



Ill. 10. Eye tracking device.

Il. 10. Sprzęt służący do wykonania badania eyetrackingowego.

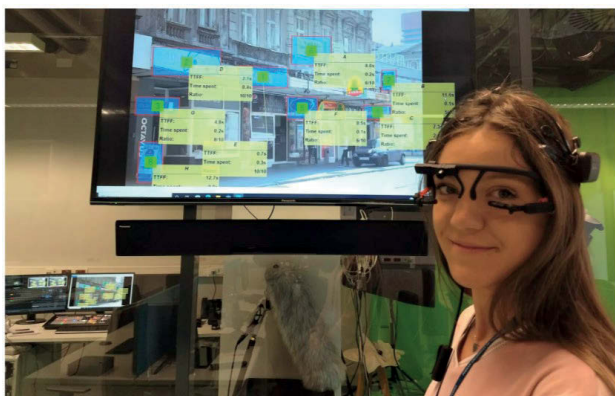
Source/źródło: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EyeTrackingDevice.jpg> (accessed: 20.04.2022).



Ill. 11. Study of the assessment of the space of Gwarna Street using biofeedback and face reading.

Il. 11. Badanie oceny przestrzeni ulicy Gwarnej przy pomocy face readingu i metody biofeedback.

Source/źródło: (Głaz and Dworek, 2022).



Ill. 12. Study of the assessment of the space of Gwarna Street using EEG and eye tracking.

Il. 12. Badanie oceny przestrzeni ulicy Gwarnej przy pomocy EEG i eye trackingu.

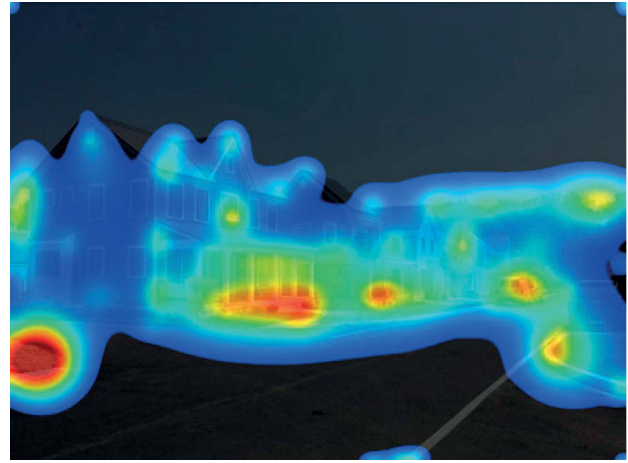
Source/źródło: (Głaz and Dworek, 2022).



Ill. 13. Regions of interest diagram of Chance Street in Devens.

Il. 13. Obszary zainteresowań na Chance Street w Devens.

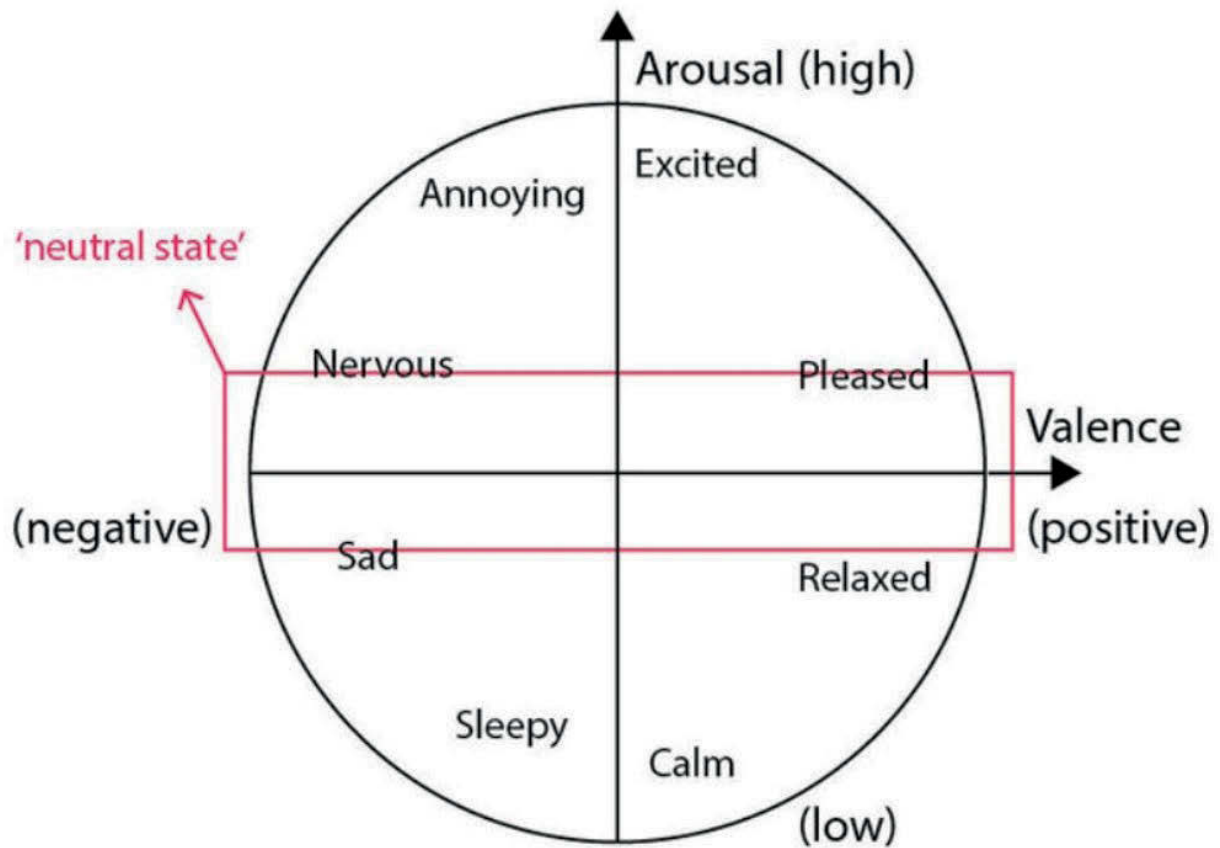
Source/źródło: (Hollander et al., 2021).



Ill. 14. 'Heat map' of Chance Streets in Devens.

Il. 14. „Mapy ciepłne” (mapy fiksacji wzroku) Chance Street w Devens.

Source/źródło: (Hollander et al., 2021).



Ill. 15. The arousal/valence space of emotions (the position of the emotional states are only approximated) in the diagram of A. Mehrabian and J.A. Russell.

Il. 15. Przestrzeń pobudzenia/wartości emocji (pozycja stanów emocjonalnych jest przybliżona) na wykresie A. Mehrabiana i J.A. Russella.

Source/źródło: (Maghool, Homolja and Schnabel, 2020).

1. WPROWADZENIE I CEL PRACY

Architekci, projektując konkretny budynek, nie zawsze mogą w pełni pojąć i zrozumieć potrzeby przyszłych jego użytkowników, co często czyni fazę projektową trudnym i zawiłym procesem podporządkowanym bardziej subiektywnym decyzjom projektanta niż intersubiektywnym potrzebom użytkowników. Problem pojawia się w szczególności wtedy, kiedy kontakt z przyszłymi użytkownikami jest w jakimś stopniu utrudniony lub wręcz niemożliwy — takimi grupami docelowymi są m.in. małe dzieci do wieku przedszkolnego i osoby z niepełnosprawnościami, które nie są w stanie wyartykułować w bezpośredni sposób swoich potrzeb. Nie są to jednak jedyne grupy, których dotyczy omawiane tu zagadnienie — badania dowodzą bowiem, że nasze dobre samopoczucie w przestrzeni zależy często od innych czynników niż subiektywne poczucie estetyki i gustu oraz niekoniecznie jest odzwierciedleniem tego, co aktualnie czujemy. Dlatego też badana może być każda grupa ludzi, niezależnie od wieku i poziomu możliwości wyrażania potrzeb. Naprzeciw takim problemom wychodzi interdyscyplinarna dziedzina kryjąca się pod ogólnym pojęciem neuronauk. Artykuł ma na celu przegląd i przybliżenie specyfiki badań z tego zakresu mających potencjał wykorzystania w procesie projektowania architektonicznego. Jest propozycją merytorycznego wstępu do systematyki i szczegółowego opisu sposobów wykorzystania poszczególnych metod badawczych w dziedzinie architektury.

2. MATERIAŁY I METODY

Głównymi metodami badawczymi były przegląd literatury oraz analiza opublikowanych w latach 2017–2022 wyników badań z zakresu korelacji neuronauk i architektury. Celem studiów literaturowych było znalezienie definicji omawianych pojęć, przybliżenie ich współzależności oraz selekcja rodzajów badań z zakresu neuronauk, które mają — lub potencjalnie mogą mieć — zastosowanie w projektowaniu architektonicznym. Do takich badań należą:

- fMRI (funkcjonalny rezonans magnetyczny);
- EEG (elektroencefalografia) + VR (virtual reality);
- badania wykorzystujące eye tracking + 3M VAS (Visual Attention Software);
- badania wykorzystujące opaski EDA (electrodermal activity).

Następnym krokiem były poszukiwania (za pomocą metody przeglądu systematycznego z użyciem słów kluczowych) najnowszych wyników wyżej

wymienionych badań przeprowadzanych w celu oceny wpływu środowiska zaprojektowanego na samopoczucie i zachowanie człowieka. Przy opisie każdego z rodzajów badań przytoczono konkretny, najaktualniejszy przykład jego zastosowania w dziedzinie architektury oraz podjęto próbę oceny możliwości zastosowania omawianego badania na etapie procesu projektowego.

3. NEURONAUKA I ARCHITEKTURA — DEFINICJE I POCZĄTKI WSPÓLNYCH BADAŃ

Aby dobrze zrozumieć powiązanie neuronauki i architektury, należy przytoczyć ich najogólniejsze i najprostsze definicje. Oczywiście obie te dyscypliny mogą być definiowane na wiele sposobów o znaczącym stopniu komplikacji, lecz badając ich podstawowe zależności, warto sięgnąć do podstaw.

Mianem architektury określa się dyscyplinę *organizującą i kształtującą przestrzeń w realnych formach niezbędnych do zaspokojenia materialnych i duchowych potrzeb człowieka* (Architektura, 2010). Z kolei zgodnie z najśłynniejszym traktatem Witruwiusza *O architekturze ksiąg dziesięć* architektura powinna być również *trwała, użyteczna i piękna* (Witruwiusz, 1999, s. 32).

Neuronauka, według najbardziej ogólnej definicji, to interdyscyplina naukowa zajmująca się badaniem układu nerwowego, głównie OUN (ośrodkowego układu nerwowego). Sytuuje się ona na pograniczu wiedzy medycznej, biologicznej, biochemicznej, biofizycznej, informatycznej, psychologicznej. Znajduje zastosowanie głównie w neurologii, w mniejszym stopniu również w psychiatrii.

Wspólną płaszczyzną dla powyżej opisanych dyscyplin jest zatem kwestia duchowych potrzeb człowieka — odpowiada jej kategoria użyteczności w przypadku architektury oraz psychologia i badania OUN ze strony neuronauk. Zastosowanie neuronauk w architekturze jest zjawiskiem stosunkowo nowym (w kontekście nauk w ogóle) i stale rozwijanym z uwagi na ciągły postęp technologiczny oraz poszerzające się możliwości i nowe sposoby badań. Jednym z głównych ośrodków zajmujących się powiązaniem tych dwóch dyscyplin jest Academy of Neuroscience in Architecture (ANFA) z siedzibą w Salk Institute for Biological Studies (La Jolla, Kalifornia, USA).

ANFA ukształtowała się w 2002 roku jako projekt American Institute of Architects (AIA). Założył ją John Paul Eberhard, za co został laureatem Latrobe Prize (przyznawanej co dwa lata nagrody w wysokości 100 tys. dolarów za badania, które

prowadzą do znaczących postępów w architekturze), co dobitnie potwierdziło słuszność idei badań na płaszczyźnie łączącej te dwie dyscypliny. Znaczące dla rozwoju ANFA było również wygłoszone w 2003 roku przemówienie doktora Freda Gage'a, głównego badacza w Instytucie Studiów Biologicznych Salka w La Jolla, poświęcone architekturze i neuronauce, w którym podkreślał on, jak ważne są zależności między tymi dziedzinami. Lokalizacja Akademii w tym konkretnym miejscu również nie jest przypadkowa, ponieważ siedziba Instytutu Salka jest jednym z pierwszych, a na pewno najbardziej znanych przykładów współpracy na linii architekt–neuronaukowiec. Biolog Jonas Salk poprzez zlecony Louisowi Kahnowi (wraz z zespołem) projekt budynku chciał wyzwolić w przyszłych pracownikach bezgraniczną kreatywność i otwartość umysłu. Idea ta z pewnością została zrealizowana, ponieważ do dziś budynek usytuowany na klifie nad Pacyfikiem uważany jest za środowisko sprzyjające twórczym działaniom, a jego forma — dosłownie i w przenośni — otwiera horyzont. Również wnętrze budynku sprzyja umysłowej pracy twórczej — idea otwartych laboratoriów, symbolizująca zatarcie granic pomiędzy poszczególnymi dziedzinami i dyscyplinami oraz ukierunkowanie naukowców na interdyscyplinarność, żelbetowe ściany opływające wodą skierowane w stronę laboratoriów czy wykończenie korytarzy tablicami umożliwiającymi zapisanie pomysłów i idei podczas korzystania z komunikacji — to tylko część rozwiązań projektowych będących owocem współpracy w obszarze tych dwóch dziedzin (il. 1, 2).

4. BADANIA Z ZAKRESU NEURONAUK WYKORZYSTYWANE W ARCHITEKTURZE

Badania obserwacyjne, eksperymentalne i laboratoryjne z zakresu psychologii środowiskowej

Wraz z postępem i rozwojem technologii dostępne są coraz bardziej zaawansowane i wyspecjalizowane metody wykorzystania badań z zakresu neuronauk w architekturze. Najbardziej tradycyjne i jednocześnie te z najdłuższą historią to metody obserwacyjne i eksperymentalne z zakresu psychologii środowiskowej, zazwyczaj niewymagające specjalistycznego sprzętu. W tym przypadku powiązanie z architekturą było dosyć naturalne i oczywiste z uwagi na fakt, że dyscyplina ta bada relacje na płaszczyźnie człowiek–środowisko, ze szczególnym uwzględnieniem środowiska zbudowanego (architektonicznego). Wiele badań z zakresu psychologii środowiskowej znalazło

przełożenie na wnioski dotyczące projektowania. Największe dzieło Christophera Alexandra — *Język wzorców* (Alexander i in., 2008) — w dużej mierze opiera się właśnie na wynikach badań dotyczących zachowania i samopoczucia ludzi w danym środowisku; można tam również dostrzec wpływ psychologii rozwojowej oraz socjologii.

Psychologia środowiskowa jest najstarszą ze wszystkich neuronauk wykorzystanych w architekturze i do dzisiaj należy do najważniejszych elementów przy korzystaniu z innych nauk w trakcie procesu projektowego. Jednym z najbardziej obszernych i dokładnych podręczników opisujących wyniki badań na płaszczyźnie człowiek–środowisko jest *Psychologia środowiskowa* (Bell i in., 2005). Zawarty w niej podział na części środowiska oddziałujące na człowieka, a także opis różnego rodzaju eksperymentów i badań dotyczących omawianych zależności stanowią paradygmaty w swej dziedzinie. Ich pionierski charakter poszerzył horyzonty następnym pokoleniom naukowców i skłonił do multidyscyplinarnego charakteru badań. W Polsce wiedzę na temat psychologii środowiskowej bada m.in. Maria Lewicka, autorka *Psychologii miejsca* (Lewicka, 2012) oraz licznych publikacji dotyczących postrzegania konkretnych miejsc przez człowieka. Również publikacje Augustyna Bańki stanowią źródło wiedzy o tej dyscyplinie, a także o psychologii architektury. Publikacje jego autorstwa: *Psychologia środowiskowa jakości życia i innowacji społecznych* (Bańka, 2018) i *Behawioralne podstawy projektowania architektonicznego* (Bańka, 2016), są jednymi z najobszerniejszych i najcenniejszych opracowań dotyczących psychologii środowiskowej.

fMRI (funkcjonalny rezonans magnetyczny)

Rezonans magnetyczny głowy to technika obrazowania medycznego wykorzystująca pole magnetyczne i generowane komputerowo fale radiowe. Badanie to, mające zastosowanie głównie w neurologii, ma na celu ukazanie potencjalnych zmian w strukturze mózgu, tkanek miękkich, naczyń krwionośnych, węzłów chłonnych i elementów kostnych. Funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) jest metodą rejestrowania aktywności mózgu na podstawie zmian poziomu tlenu we krwi mózgu (Gut i Marchewka, 2004, s. 36). Ze względu na stosunkowo wysoką rozdzielczość przestrzenną jest skuteczny w przypadku lokalizowania obszarów mózgu zaangażowanych w zadania poznawcze (DeYoe i in., 1994). Od momentu rozpowszechnienia we wczesnych latach 90. XX wieku. był szeroko stosowany przez neuronaukowców kognitywnych

w dążeniu do zrozumienia neuronowych podstaw poznania. Kilkanaście lat później zaczęto stosować fMRI w empirycznym podejściu do projektowania architektonicznego. Niestety, o ile istnieje obszerna literatura na temat metodologii fMRI w neuronaukach (zob. Soares i in., 2016, s. 21), o tyle z uwagi na specjalistyczny i trudny język jest ona mało przystępna dla naukowców zajmujących się architekturą i designem. Nie omawia również zagadnień charakterystycznych dla projektowania. Artykuł z początku 2022 roku *Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) in Design Studies: Methodological Considerations, Challenges, and Recommendations* (Hay i in., 2022) stara się wyjaśnić metodykę przeprowadzania badania na potrzeby projektantów, jednak nakreśla on jedynie ramy, które w przyszłości mogą być doprecyzowywane przez naukowców. Nie zmienia to faktu, że przeprowadzone do tej pory badania wykazały dużą zależność pomiędzy reakcjami zachodzącymi w ośrodku zadowolenia (tj. aktywnością neuronalną w środkowej korze przedczołowej) a konkretnymi przestrzeniami architektonicznymi (Coburn i in., 2020). Alexander Coburn w przeprowadzonym badaniu dotyczącym reakcji mózgu na wnętrza budynków wykazał, że *doświadczenie estetyczne wewnątrz architektonicznych opiera się na tych samych systemach nagród, które wiążą się z przyjemnością spoglądania na piękne twarze oraz zaspokajaniem pierwotnych apetytów, takich jak jedzenie i seks* (Kowalska, 2021) Jak w swoim artykule opisują Małgorzata Gut i Artur Marchewka, *Za pomocą fMRI dowiedziono więc, że istotnym elementem zmian plastycznych w mózgu, zachodzących pod wpływem przerwania dopływu określonego rodzaju bodźców, jest reorganizacja map korowych zarówno wewnątrz danej modalności, jak i pomiędzy różnymi modalnościami* (Gut i Marchewka, 2004, s. 40). Sugeruje to, przez wzgląd na plastyczność mózgu, duży wpływ bodźców dostarczanych/odbieranych przez środowisko zbudowane na samopoczucie i zachowanie człowieka.

W 2017 roku przeprowadzono badanie fMRI dotyczące architektury kontemplacyjnej (monumentalnej, o wysokich walorach estetycznych) oraz jej wpływu na ludzki mózg i sposobu jej odbioru (Bermudez i in., 2017). W badaniu wzięło udział 13 zdrowych mężczyzn rasy kaukaskiej w wieku 26–48 lat (średni wiek: 32 lata), bez wad wzroku, praworęcznych. Jeden badany został usunięty z grupy badawczej na podstawie kryterium wykluczenia (wcześniejsze regularne uprawianie medytacji). Wszyscy badani byli architektami czynnymi zawodowo (średnia aktywność zawodowa: 5,4 roku). Podczas badania fMRI wykorzystano cztery obrazy każdego budynku,

aby zasymulować intensywne doznania architektoniczne. Każde zdjęcie zostało wybrane tak, aby oddać fenomenologiczną esencję konkretnego budynku oraz zapewnić widzowi wgląd z zewnątrz do wnętrza. Spośród dziesięciu budynków najczęściej wskazywanych jako generujące nadzwyczajne doświadczenie architektoniczne (Bermudez, 2008; Bermudez, 2009) (il. 3) wybrano pięć skłaniających do kontemplacji — Panteon w Rzymie, katedra w Chartres we Francji, Alhambra w Grenadzie w Hiszpanii, kaplica Notre Dame du Haut w Ronchamp we Francji i Instytut Salka w Kalifornii w USA. Pięć pozostałych to budynki typowe dla współczesnego amerykańskiego życia miejskiego: liceum, biurowiec w śródmieściu, jednorodzinne osiedle podmiejskie, galeria handlowa i miejski wielorodzinny zespół mieszkaniowy. Obrazy prezentowane były w rozdzielczości ekranu 1024 × 768 pikseli. Prezentacja fotografii została zorganizowana jako dwa bloki składające się odpowiednio ze zwykłych budynków (blok kontrolny) i budynków skłaniających do kontemplacji (blok eksperymentalny). Przed każdym badaniem uczestnik otrzymał następującą instrukcję: *Prosimy Cię o zrelaksowanie się, skupienie i próbę wyobrażenia sobie, że realnie doświadczasz miejsc, które zostaną pokazane. Interesuje nas Twoja percepcyjna, emocjonalna lub intuicyjna reakcja, a nie Twój krytyczny osąd. Dlatego wyobraź sobie, że przenosisz się do budynków pokazanych na zdjęciach. Po prostu bądź obecny w tym miejscu i w tej sytuacji i pozwól sobie doświadczyć czegokolwiek, co poczujesz. Proszę, skup się na obrazie i tylko na nim* (Bermudez i in., 2017; tłum. własne). Po badaniu fMRI przeprowadzono również ankiety oraz krótkie rozmowy dotyczące odczuć badanych. Jedenastu z dwunastu uczestników było w stanie w pełni zaangażować i zrelaksować się podczas oglądania budynków przyporządkowanych do grupy obiektów kontemplacyjnych. Dziewięciu zgłosiło, że było emocjonalnie poruszonych i poczuło połączenie z obiektem, określając jednocześnie to doświadczenie jako intensywne. Dwóch uczestników jeszcze bardziej emocjonalnie odebrało prezentowaną architekturę, twierdząc, że doświadczyło utraty poczucia siebie i osiągnięcia jedności z prezentowanymi budynkami. Tylko jeden badany zgłosił, że nie był w stanie w pełni zaangażować się w polecenia zgodnie z podanymi instrukcjami i nie poczuł zaangażowania w obserwacje prezentowanych obrazów. W samym badaniu fMRI zidentyfikowano znaczące, pozytywne związki między poczuciem głębi doświadczenia a regionalnymi aktywacjami wybranych obszarów mózgu w trakcie trwania eksperymentu. Zauważono znaczące różnice

między aktywacją a obserwowanymi budynkami (inne obszary mózgu aktywowane były w trakcie obserwacji architektury kontemplacyjnej, a inne — architektury określonej mianem typowej i zwyczajnej) (il. 4). W badaniu dowiedziono, że obserwacja architektury kontemplacyjnej powoduje uruchomienie tych samych obszarów mózgu, które aktywują się w trakcie medytacji. Potwierdziło to teorię, że środowisko zbudowane jest w stanie wpływać bezpośrednio na emocje człowieka oraz minimalizować takie stany jak stres lub zmęczenie. Jako słabości badania podano możliwość zbyt dosłownego nakierowania na konkretne emocje poprzez instrukcje podane uczestnikom oraz potencjalną możliwość znajomości konkretnych budynków przed przystąpieniem do eksperymentu (co może skutkować wynikami skorelowanymi ze wspomnieniami związanymi z danym budynkiem, a nie postrzeganiem architektury samej w sobie). Czynniki te wymieniono jako aspekty, na które należy zwrócić uwagę w przyszłych badaniach. Pomimo tych ograniczeń uznano, że tego typu badania mogą ułatwić dalszą dyskusję i działania w dotychczas słabo rozwiniętej poddziedzinie wiedzy architektonicznej i środowiskowej oraz mają rzeczywisty potencjał wykorzystania w pracy projektowej i badawczej.

EEG (elektroencefalografia) i VR (virtual reality)

Za pomocą badania EEG sprawdza się czynność bioelektryczną mózgu. Wykorzystuje się w tym celu elektrody przymocowane do skóry głowy na specjalnym elektroencefalografie (łącznie dziewiętnaście elektrod — osiem elektrod nad każdą półkulą, trzy elektrody w linii pośrodkowej) (Glomb i in., 2022, s. 142). Urządzenie przypomina z wyglądu czepek z siatki, do którego doczepione są kolorowe elektrody (il. 5, 6).

Impulsy przekazywane pomiędzy neuronami generują sygnał, który jest rejestrowany przez urządzenie i daje obraz w postaci wykresu. Badanie to pierwotnie służyło głównie do diagnozy epilepsji oraz zaburzeń snu, nie było jednak nigdy samodzielnym badaniem diagnostycznym (sam wynik EEG wykraczający poza przyjęte normy nie może przesądzić o postawieniu diagnozy). Z biegiem lat potencjał tego urządzenia zaczął być wykorzystywany w innych dyscyplinach nauki, takich jak kognitywistyka, psychiatria i psychologia. EEG służy również do tzw. BCI (ang. *brain-computer interface*) czy popularnego w ostatnim czasie treningu biofeedback.

VR, czyli virtual reality, to obraz sztucznej rzeczywistości stworzony przy wykorzystaniu technologii informatycznej. System zaczął być opracowywany na przełomie lat 60. i 70. XX wieku

przez Myrona W. Kruegera i od tamtego czasu jest nieustannie ulepszany. Polega na multimedialnym kreowaniu komputerowej wizji przedmiotów, przestrzeni i zdarzeń. Jego zastosowanie dzieli się na rozrywkowe (gry komputerowe, symulatory) i użytkowe (medycyna, lotnictwo, astronautyka itp.). VR pozwala doznawać konkretnych zdarzeń i sytuacji w czasie rzeczywistym dzięki odtwarzaniu obrazu poprzez użycie gogli lub kasku. Aby wzmocnić realność i doznania użytkownika, często wykorzystuje się również dodatkowe elementy, takie jak nagłośnienie, rękawice VR, fotele VR czy np. syntezyatory zapachu.

W architekturze bardzo często znajduje się zastosowanie dla dwóch urządzeń badawczych w jednym czasie (EEG + VR). Metodyka i przebieg badania są stosunkowo proste, jednak odczyt i analiza wyników muszą być poprzedzone analizą pracy mózgu każdego uczestnika z osobna (indywidualizm pracy mózgu). Przeprowadzanie badania z wykorzystaniem tych urządzeń polega na przedstawieniu badanemu zróżnicowanych przestrzeni architektonicznych przy pomocy urządzenia VR i jednoczesnym zapisie odczytu fal mózgowych przez elektroencefalograf. Najczęściej pokazuje się przestrzenie o tej samej funkcji, różnicować można natomiast wszystkie parametry obiektu: wysokość pomieszczenia, poziom nasłonecznienia, tj. wielkość przeszkleń, kolory, materiały itp. (Zhang i in., 2022) To badanie pozwala na obiektywną ocenę samopoczucia i poziomu zadowolenia badanego w konkretnych przestrzeniach architektonicznych bez konieczności budowy mock-upów¹ lub przeprowadzania badań w terenie. Jest zatem badaniem sprawdzającym tylko i wyłącznie odbiór przestrzeni architektonicznej, bez udziału dodatkowych bodźców — podczas gdy w badaniach terenowych należy brać również pod uwagę dystraktory, czyli czynniki zmienne rozprasające uwagę i zmieniające odczucia (takie jak temperatura, wiatr, nasłonecznienie, wilgotność powietrza, hałas, zapachy), które często zaburzają obiektywną ocenę samej przestrzeni architektonicznej.

W 2021 roku opublikowany został artykuł autorstwa Sanghee Kima, Hyejin Park i Seungyeona Choo (2021) dotyczący wpływu zmian w przestrzeniach architektonicznych na reakcje człowieka w kategoriach relaks–pobudzenie na podstawie VR i EEG. Badaniem zostały objęte prywatne pokoje w ośrodku opieki poporodowej, przedstawione w formie modelu

¹ *Mock-up* — z ang. makieta w skali 1:1, umożliwiająca doświadczenie i sprawdzenie projektowanego obiektu (bądź jego fragmentu) lub rozwiązania w rzeczywistej wielkości i z realnymi materiałami.

VR. W Korei Południowej, gdzie przeprowadzane było badanie, matki najczęściej wybierają właśnie tego typu przestrzeń na okres od dwóch do czterech tygodni po porodzie. Autorzy powołali się na badania (Mutua i in., 2020) dowodzące, że ponad 85% matek doświadcza poporodowego przygnębienia, wahań emocjonalnego i zaburzeń nastroju, w związku z czym prywatne pokoje w ośrodkach opieki poporodowej muszą być zaprojektowane w sposób zapewniający im komfort psychiczny. Uczestniczkami tego badania były 33 kobiety, które w przeszłości korzystały z takich pokoi. Głównym celem badania było przedstawienie (na podstawie analizy wyników EEG) naukowych wytycznych, które należy uwzględnić w rzeczywistym projektowaniu architektonicznym. Powodem, dla którego badanie zostało ograniczone do kobiet mających doświadczenie w użytkowaniu takiej przestrzeni, a nie odwoływało się do ogólnej populacji, była konieczność upewnienia się, że wyniki są odpowiednie do zaprojektowania prywatnego pokoju dla ściśle określonej grupy docelowej. W modelu VR użytym podczas badania zastosowano zróżnicowane proporcje przestrzeni, wysokości pomieszczenia oraz wielkości okien, uznając je za aspekty architektoniczne istotne dla postrzegania przestrzeni. Zaprojektowany pokój miał 13 m², zgodnie ze standardem dla pomieszczeń tego typu (il. 7). Badanie skupiało się na weryfikacji wszystkich statystycznie istotnych różnic we wskaźnikach RAB (z ang. *ratio of alpha to beta waves*, tj. stosunek fal alfa do fal beta) przed stymulacją i po niej w odpowiedzi na różne typy elementów architektonicznych w przedstawianych przestrzeniach VR. Zbadano również, czy określone płaty mózgu były zaangażowane w reakcje w kategoriach relaks–pobudzenie. Badanie składało się z trzech części: przedtestowej, EEG i potestowej. W pierwszej z nich uczestnicy odpowiadali na pytania formalne, kolejna była badaniem docelowym EEG, ostatnia — ankietą dotyczącą prezentowanych przestrzeni. Zabieg ten miał na celu wychycenie ewentualnych różnic pomiędzy zapisem fal mózgowych a odczuciami deklarowanymi przez badanego poprzez prosty formularz oceniający pobudzenie/relaksację (w pięciostopniowej skali Likerta) w zależności od ukształtowania wirtualnej przestrzeni. Wyniki eksperymentu dowiodły, że proporcje pomieszczenia, jego wysokość oraz rozmiar okien mogą mieć negatywny lub pozytywny wpływ na reakcje fizjologiczne użytkowników oraz że badanie EEG i ankiety nie są do końca spójne, dlatego też ankiety nie powinny być jedyną metodą badawczą w przypadku oceny jakości przestrzeni. Na podstawie wyników badań stworzono następujące wytyczne projektowe:

- Po pierwsze, zalecane wysokości dla pomieszczeń typów A i B w zależności od współczynnika powierzchni okien [tj. stosunku ich powierzchni do powierzchni całej ściany] wynoszą 2,3 i 3,0 m dla stosunku 60%, 2,7 i 3,0 m dla stosunku 80%, 2,7 i 2,3 m dla stosunku 100%.
- Po drugie, kombinacje wysokości pomieszczenia i współczynnika okien, które wywołały najniższy poziom reakcji pobudzenia, wyniosły 2,3 m i 60% dla typu A (1:1,6) oraz 2,3 m i 100% dla typu B (1,6:1) i, odpowiednio, te kombinacje są zalecane (Kim, Park i Choo, 2021; tłum. własne) (il. 7, il. 8).

Eye tracking (okulografia) i 3M VAS (Visual Attention Software)

Eye tracking to jedna ze stosunkowo mniej skomplikowanych metod badawczych, oprócz medycyny stosowana głównie w badaniach rynku (np. podczas aranżowania wystaw w sklepach galerii handlowych i rozmieszczania produktów na półkach) (il. 9, 10). Eye tracking często nazywany jest metodą śledzenia ruchu gałek ocznych, co w rzeczywistości jednak nie stanowi głównego celu metody, którym jest informacja o „ścieżce” wzrokowej, utworzonej w czasie wodzenia wzrokiem po oglądanym obrazie, przedmiocie — lub, mówiąc ogólnie — w czasie patrzenia (Duchowski, 2007, s. 51). Działanie eye trackerów w przypadku większości nowoczesnych modeli opiera się na metodzie nazywanej odbiciem rogówki (*corneal reflection*), polegającej na wykryciu i śledzeniu położenia i ruchów gałek ocznych. Kamera o dużej rozdzielczości wykrywa położenie źrenic, które oświetlane są niewidzialnym dla człowieka światłem podczerwonym. Podczerwień odbija się od oczu, tworząc w źrenicach dobrze widoczne refleksy, pozwalające zidentyfikować miejsce, w które w danym momencie patrzy badany (Garczarek-Bąk, 2016, s. 57–58). Typowy pomiar eyetrackingowy opiera się na analizie dwóch podstawowych aktywności narządu wzroku — ruchu gałek ocznych (sakkad) oraz ich bezruchu (fiksacji). Mierzone są następujące parametry:

- fiksacje — ruchy gałek ocznych, które stabilizują siatkówkę nad nieruchomym obiektem (trwają one od 100 do 600 milisekund);
- sakkady — szybkie przenoszenie wzroku z jednego punktu skupienia na drugi (zajmują od 20 do 40 milisekund);
- całkowity oraz średni czas poświęcony na oglądanie materiału;
- liczba rewizyt — ponowne oglądanie danych elementów (Kocki i in., 2018, za: Duchowski, 2007, s. 120).

Historia okulografii sięga końca XIX wieku, kiedy stosowano metodę obserwacji ruchu gałek ocznych badanego. Z uwagi na małą dokładność badania z biegiem lat zaczęto wykorzystywać urządzenia wykonujące bardzo precyzyjne pomiary (uwzględniające kierunek patrzenia, długość patrzenia w jeden punkt, długość szukania konkretnych informacji itp.). W architekturze metodę tę stosuje się np. w ocenie trafności i jakości identyfikacji wizualnej budynków (*eye catching*), ale znalazła również zastosowanie w krytycznej ocenie ładu przestrzennego miejskich ulic. Badania takie prowadzone były w Polsce m.in. przez Tomasza Dworka z Politechniki Poznańskiej, który ocenie jakości przestrzeni poddał ulicę Gwarną w Poznaniu, jedną z bardziej zaniedbanych ulic w mieście, chaotycznie wypełnioną reklamami o niejednorodnej i nieuporządkowanej formie graficznej (Głaz i Dworek, 2022). Zadanie badanych polegało na odnalezieniu szyldu krawca wśród innych szyldów, billboardów, reklam i komunikatów (il. 11). Grupą badawczą były osoby młode, które sklasyfikowano jako cechujące się wysokim poziomem spostrzegawczości. Średni czas odnalezienia szyldu wyniósł ok. 6 s, co uznano za długi czas na znalezienie konkretnego napisu na jednym zdjęciu. Dodatkowo posłużono się metodą face readingu (odczytywanie odczuć z mimiki twarzy badanego) i EEG, aby określić emocje towarzyszące poszukiwaniom. Na wykresach zauważalna była narastająca frustracja, natomiast odnalezieniu towarzyszyła satysfakcja i radość (il. 12). Do zbierania informacji ze wszystkich tych źródeł użyto platformy integracji danych iMotions. Najbardziej zrozumiałym i jednoznacznym efektem badań były „mapy cieplne” (ang. *heat maps* — pojęcie nawiązujące do badań kamerą termowizyjną z uwagi na podobne pod względem graficznym ujęcie wyników), które właśnie dzięki metodzie eye trackingu mogły pokazać, na czym i na jak długo badany skupiał uwagę, oraz grafiki ukazujące *gaze plot*, czyli wykres kierunku, w którym podążały jego oczy. Badania te wykazały, że pozytywne emocje pojawiają się po ujrzeniu czegoś już znanego oraz że w trafnym odczytaniu komunikatu i budzeniu pozytywnych emocji pomaga wizualny porządek. Chaos zaś prowadzi do dłuższego szukania konkretnej informacji, poczucia zagubienia i dezorientacji, co w przestrzeniach urbanistycznych jest cechą niepożądaną.

Popularne — i bardziej dostępne dla masowych użytkowników — stało się również wykorzystanie narzędzie VAS firmy 3M, opartej na ponad 30-letniej analizie badań eyetrackingowych. Analizy te pozwoliły wykryć pewien kod określający pięć czynników, którym posługuje się mózg człowieka, chcąc

wstępnie wybrać najbardziej „chwytliwe” informacje wizualne spośród widocznych na „pierwszy rzut oka”. VAS wykorzystuje znajomość tych biologicznych skrótów mózgu, aby symulować sposób, w jaki odbiorcy będą oglądać badane treści.

W 2021 roku na łamach czasopisma *Architectural Science Review* opublikowany został artykuł dotyczący wyników badań urbanistycznych z wykorzystaniem metody 3M VAS (Hollander i in., 2021). We wstępie naukowcy podkreślili, że w psychologii środowiskowej istnieje szereg paradygmatów głoszących, że dobrze zaprojektowane fasady budynków, umiejętnie stworzone krawędzie i linearność ulicy tworzą przestrzenie przyjazne i odbierane pozytywnie, lecz w żadnych z tych badań nie wykazano, w jaki sposób te aspekty faktycznie wpływają na zachowanie człowieka pod względem biologicznym — krótko mówiąc, brak było empirycznych dowodów na to, dlaczego wygląd fasady jest tak ważny. Powołując się na tezę Mallgrave’a (2018), zgodnie z którą w fazie projektowania istotne jest nie tylko przestrzeganie przepisów dotyczących projektowania budynków, ale również uwzględnienie potrzeb ludzi w ich lokalnej społeczności, naukowcy postanowili zbadać, jak ludzki mózg odbiera przestrzenie urbanistyczne. Korzystając z oprogramowania do śledzenia ruchu gałek ocznych, prześledzono nieświadome reakcje ludzi na nowe przestrzenie urbanistyczne skoncentrowane bardziej na ruchu samochodowym niż pieszym. Badanie przeprowadzono w amerykańskich obszarach podmiejskich, skupiając się na elewacjach domów jednorodzinnych. Wykorzystano w nim stosunkowo nowe, gotowe narzędzie, jakim jest oprogramowanie 3M Visual Attention Software (VAS), wprowadzone do użytku w 2011 roku. Za pomocą VAS dokonano pomiaru nieświadomych reakcji ludzi na bodźce wizualne: nowe ulice i mieszkania w Devens w stanie Massachusetts. Przeprowadzone badanie skoncentrowało się na kilku rejonach Devens i jego przedmieść, gdzie naukowcy spędzili kilka dni, fotografując okolice. Zespół skoncentrował się na 17 jednostkach domów jedno- i dwurodzinnych przy Chance Street (il. 13), wykonując 228 zdjęć według ściśle określonych zasad (m.in. każdy fotograf został poinstruowany, aby stanąć przy krawężniku i skierować aparat na drugą stronę ulicy oraz ustawić obiektyw pod takim kątem, aby uchwycić jak najwięcej elewacji budynku naprzeciwko z odległości 5–12 m; wszystkie obrazy zostały zarejestrowane w rozdzielczości minimum 300 dpi). Naukowcy dowiedli, że dzięki zastosowaniu analizy obrazów za pomocą programu VAS możliwe było określenie, jaki rodzaj architektury przyciąga wzrok, a jaki jest pomijany

przez ludzki mózg lub traktowany bardziej pobieżnie. Diagramy obszarów zainteresowania pokazały, w jaki sposób poszczególne elementy przyciągają uwagę. Przykładowo najwięcej uwagi przyciągały frontowe werandy nowych domów z białymi kolumnami oraz symetryczny układ okien, natomiast pozbawione szczegółów i prostsze garaże znajdujące się w pasie parkingowym nie powodowały fiksacji wzroku, co może być zgodne z intencją dewelopera, aby zapewnić prywatność w tej części. Obszary zaznaczone na „mapie cieplnej” (il. 10) na czerwono będą prawdopodobnie najczęściej oglądane (czas skupienia wzroku wynosi od 74% do 98%), a zaznaczone na żółto będą przyciągać umiarkowaną uwagę (od 58% do 63%) (il. 14). Obszary zaznaczone na niebiesko, takie jak dachy budynków czy pusta jezdnia, najprawdopodobniej zostaną zignorowane w ciągu pierwszych 3–5 sekund.

Według naukowców oprogramowanie wykorzystujące metodę eye trackingu wydaje się mieć potencjał w zakresie projektowania architektury i planowania w obszarach miejskich. Projektanci poprzez przeanalizowanie wizualizacji swojego budynku za pomocą oprogramowania VAS mogą szybko dowiedzieć się, gdzie znajdują się punkty najbardziej skupiające wzrok w projektowanych budynkach, dostosować je i zweryfikować ich skuteczność. Dane te można następnie wykorzystać w projekcie, co uczyni go opartym na dowodach naukowych. Autorzy artykułu podkreślają jednak, że o ile VAS z powodzeniem szacuje, gdzie będziemy patrzeć podczas przetwarzania danego obrazu, o tyle samo to oprogramowanie nie może nam powiedzieć o emocjonalnym charakterze reakcji danej osoby ani o tym, jak ludzie się czują w budynkach lub krajobrazie. W związku z tym proponują łączenie eye trackingu z pomiarami innych danych biometrycznych, w tym EEG, analizą mimiki (face reading) oraz monitorowaniem tętna (np. za pomocą opasek EDA). Można przeprowadzić również wywiad z badanymi lub ankietę na temat tego, jak się czują, odbierając dany bodziec. Śledzenie wzroku i narzędzia takie jak VAS pozostają jednak skuteczne, ponieważ pomagają nam natychmiast zobaczyć, jak znaczna część naszej reakcji na otoczenie jest zdeterminowana nieświadomie (Hollander i in., 2021).

Opaski EDA

Aktywność elektrodermalna (EDA; czasami nazywana galwaniczną odpowiedzią skóry lub GSR — ang. *galvanic skin response*) odnosi się do zmian przewodnictwa elektrycznego skóry w odpowiedzi na wydzielanie potu (często w niewielkich ilościach). Historia badań nad nią sięga 2. połowy XIX wieku,

kiedy Marie Gabriel Romain Vigouroux (1831–1911) przeprowadzał proste badania polegające na pomiarach napięcia na dłoniach w zależności od ruchu rąk. Charles Féré (1852–1907) udowodnił, że oporność skóry w stosunku do płynącego prądu elektrycznego jest zmienna i zależna od kondycji emocjonalnej osoby badanej, a także od stosowanych względem niej bodźców (interesował się ruchami mimowolnymi w trakcie ataku hysterii). Férégo uważa się za odkrywcę odruchu skórno-galwanicznego, co oznacza przejściową zmianę oporności skóry wywołaną działaniem bodźca zewnętrznego (np. hałasu) albo wewnętrznego (myśli, emocji). Kolejne badania poszerzały te teorie i znajdowały dla nich zastosowanie w eksperymentach psychologicznych i psychiatrycznych. Pojawiło się nawet założenie, poparte badaniami (Wincewicz-Cichecka i Nasierowski, 2020, s. 1142), że aktywność elektrodermalna może być biomarkerem tendencji samobójczych, co sugeruje, iż czynnik ten może być nośnikiem wielu istotnych informacji.

Badanie za pomocą opasek EDA sprawdza zatem reakcje na poszczególne bodźce, co posłużyć może również w badaniu reakcji na otoczenie architektoniczne lub urbanistyczne. Z analizy literatury wynika, że rzadko są one używane jako samodzielne urządzenie pomiarowe, najczęściej towarzyszą im dodatkowe metody badawcze. W 2020 roku na konferencji *Anthropologic: Architecture and Fabrication in the Cognitive Age* na Technische Universität w Berlinie przedstawiono wyniki badania opierającego się na cybernetycznym podejściu do przestrzeni wirtualnych wywołujących emocje, a konkretnie do przestrzeni adaptacyjnej² kształtowanej przez aktywność elektrodermalną. Omówiony przez autorów badania projekt badawczy miał na celu *opracowanie systemu, który dostosowuje środowisko (środowisko wirtualne) do swoich mieszkańców w oparciu o predefiniowane potrzeby emocjonalne odbiorców budynku* (Maghool, Homolja i Schnabel, 2020, s. 538; tłum. własne). Naukowcy podkreślili, że istnieje szereg rozwiązań, w których budynek dostosowuje się do zmian środowiska, takich jak pogoda czy promieniowanie słoneczne, natomiast brak jest opracowań, dzięki którym budynek zmieniałby się w zależności od czynnika ludzkiego, czyli m.in. potrzeb emocjonalnych użytkowników. W swoim projekcie naukowcy chcieli stworzyć metodę automatycznego dostosowania budynku do stanu emocjonalnego człowieka dzięki użyciu aparatury VR i opasek EDA.

² Mianem architektury adaptacyjnej określa się budynki, które w zależności od potrzeb użytkowników mogą zmieniać swoją funkcję.

Punktem wyjścia były aktualne teorie emocji: *Choć nie istnieje jednoznaczna definicja emocji, dominujące teorie — w tym teoria Jamesa–Langego, teoria Cannon–Barda i teoria Schachtera–Singera — podkreślają, że reakcje emocjonalne są ściśle powiązane z autonomicznymi reakcjami fizjologicznymi. Niezależnie od wszystkich różnic między tymi zależnościami stale jest to, że odczuwane emocje nigdy nie poprzedzają reakcji fizjologicznych* (Maghool, Homolja i Schnabel, 2020, s. 539; tłum. własne). Takie rozumienie emocji daje ogromne możliwości ich mierzenia i ilościowego określania poprzez mierzenie i ilościowe określanie reakcji fizjologicznych. Badacze podkreślili, że wykorzystanie specjalistycznej aparatury pozwala osiągnąć zdecydowanie mniej subiektywne wyniki niż np. ankiety, ponieważ reakcje fizjologiczne, będące nierozdzielalną częścią emocji, są w większości wynikiem nieświadomych procesów związanych z autonomicznym układem nerwowym i współczulnym układem nerwowym.

W przypadku środowiska zbudowanego celem stworzenia architektonicznego systemu adaptacyjnego może być, w zależności od obiektu, albo maksymalizacja poziomu pobudzenia emocjonalnego (dla budynków pamięci, parków rozrywki, budynków sakralnych itp.), albo jego minimalizacja (np. dla ośrodków zdrowia). Sugeruje to, że bez uwzględnienia kontekstu i programu danego budynku ocena emocjonalnego podejścia do architektury jest bezcelowa. Maghool, Homolja i Schnabel na potrzeby swojego badania zaproponowali „abstrakcyjny architektoniczny cel emocjonalny” (ang. *abstract architectural emotional goal*), którym jest zachowanie neutralności emocjonalnej użytkowników w wirtualnej przestrzeni architektonicznej (il. 11). Na podstawie literatury wybrali oni pięć cech wystroju wewnątrz pozwalających manipulować poziomem pobudzenia emocjonalnego w wirtualnym środowisku: 1) kolor; 2) geometria (liniowa i nielinowa); 3) wielkość; 4) biofilia (z ang. *biophilic*); oraz 5) dźwięk (Maghool, Homolja i Schnabel, s. 541). Dla każdej z tych pięciu cech wyznaczono dwie sytuacje skrajne, nazwane warunkami wywołującymi stres i warunkami redukującymi stres. Stworzono przestrzenie architektoniczne odpowiadające dwóm ekstremom oraz jedną w typie *morphing* (gdzie możliwe jest płynne przejście z jednego ekstremum do drugiego), a następnie za pomocą oprogramowania Blender i Unreal Engine 4 wygenerowano modele do użycia w aparaturze VR. Aby dokonać pomiaru stanu emocjonalnego, zastosowano opaski EDA, a informacje przekazywane były poprzez Bluetooth do niestandardowego modułu Python 3. Badanie, z uwagi na jego pilotażowy

charakter, przeprowadzono na czterech dorosłych osobach, co obniżyło poziom dowodów empirycznych, ale dostarczyło początkowego zbioru danych, potrzebnego, aby sprawdzić, czy system działa i czy można uzyskać za jego pomocą znaczącą odpowiedź galwaniczną skóry (GSR). Odkrycia sugerują, że stworzona konfiguracja VR jest w stanie operować poziomem pobudzenia emocjonalnego mierzonym za pomocą sygnału GSR. Jednak, jak podkreślili badacze, aby dokładnie to ustalić, potrzeba więcej badań naukowych oraz uwzględnienia innej aparatury badawczej, np. EEG czy urządzenia pomiaru mimiki twarzy.

5. WNIOSKI

Powyższe zestawienie metod badawczych oraz opis przeprowadzonych badań z zakresu neuronauk w architekturze daje wiarygodne dowody na to, że łącząc ze sobą te dwie dyscypliny, uzyskać można innowacyjne i przede wszystkim obiektywne dane. Stworzona w ten sposób neuroarchitektura ma znaczący potencjał w kontekście idei świadomego, inkluzywnego i nowoczesnego projektowania. Jak wynika z opisanego badania fMRI, określony rodzaj architektury może wpływać na pobudzenie poszczególnych struktur mózgu, wywołując konkretne stany emocjonalne, porównywalne do tych generowanych przez podejmowanie angażujących psychicznie czynności — np. medytacji. Sugeruje to, że środowisko zbudowane ma realny wpływ na to, jak funkcjonuje nasz organizm, poprzez wywoływanie lub wzmacnianie poszczególnych odczuć. Dowodzi to jednocześnie, że dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu przestrzeni można zminimalizować takie uczucia, jak stres czy zmęczenie, co ma szczególne znaczenie w obiektach, których funkcja może generować skrajne emocje.

W badaniu VR i EEG dotyczącym projektów prywatnych pokoi dla ośrodków opieki poporodowej wykazano, że istnieje wiele korelacji pomiędzy pomieszczeniem a samopoczuciem (w kontekście proporcji, wysokości i przeszkleń), z których badane osoby nie do końca zdawały sobie sprawę i których nie potrafiły nazwać, i dopiero pomiar pracy fal mózgowych był w stanie określić te odczucia. W badaniu tym potwierdzono, że konkretne zabiegi architektoniczne wpływają na poziom relaksacji na badanej grupie kobiet, dzięki czemu udało stworzyć się wytyczne projektowe sugerujące parametry pożądane w tego typu pomieszczeniach.

Badania wykorzystujące eye tracking oraz bazujący na nim VAS pokazują z kolei, jak bardzo ludzki mózg jest wrażliwy na określone bodźce oraz do

jakiego stopnia potrafi zignorować lub pominąć niektóre czynniki. Badania te, szczególnie pomocne przy ocenie jakości przestrzeni, dowiodły, że można tak operować przestrzenią urbanistyczną czy architektoniczną, aby podkreślić pewne części środowiska zbudowanego lub celowo sprawić, aby były ignorowane. Projektowanie elementów budujących przestrzeń wspólną w sposób czytelny, jasny i uporządkowany powoduje zatem, że ludzie bardziej pozytywnie odbierają np. przestrzenie ulic czy zabudowę mieszkaniową, łatwiej jest im się odnaleźć i czują się bezpieczniej. Z kolei cofnięcie obiektu na dalszy plan i brak detali sprawiają, że ludzkie oko nie skupia się na tego typu obiektach i „idzie dalej”, co jest pomocne przy projektowaniu przestrzeni o charakterze prywatnym, mających nie wzbudzać zainteresowania obcych. Natomiast badanie przy użyciu opasek EDA może mieć przede wszystkim zastosowanie jako dodatkowa metoda badawcza, uzupełniająca kwestionariusze czy metodę VR. Możliwość zapisu poziomu stresu za pomocą tak prostego urządzenia pozwoli na uzyskanie dokładniejszych wyników badań oraz wskazanie konkretnych miejsc generujących napięcie. Wydaje się to szczególnie przydatne w badaniach przestrzeni urbanistycznej, gdzie niekiedy trudno na podstawie ankiet wskazać określony problem danego miejsca.

Zdaniem autorów opisane w artykule badania mają szczególny potencjał nie tylko wśród grup, w których zostały przeprowadzone, ale również wśród osób o ograniczonej możliwości kontaktu czy wyrażania emocji i preferencji (małe dzieci, osoby z niepełnosprawnościami). Możliwość wykorzystania szeregu zaawansowanych badań dających wiedzę o ludzkim mózgu niesie duży potencjał w projektowaniu architektonicznym, czyniąc cały proces bardziej holistycznym i nastawionym na konkretne potrzeby. Szczególnie metoda rezonansu magnetycznego funkcjonalnego (fMRI) oraz połączenie metod VR i EEG wprowadzają nową jakość do obiektywnej oceny konkretnych rozwiązań projektowych. Analizując wyniki badań, można założyć, że zastosowanie tych metod na etapie koncepcji może zmniejszyć prawdopodobieństwo pojawienia się błędów funkcjonalnych czy estetycznych w projekcie. Optymalnym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie tego typu badań na grupie składającej się z przyszłych użytkowników (lub modelowych przyszłych użytkowników), aby architektura odpowiadała na konkretne potrzeby danych odbiorców, nie opierając się jedynie na istniejących założeniach czy wytycznych projektowych, które często bywają zbyt ogólne.

Podsumowując, istnieje duże zapotrzebowanie na kontynuację i poszerzenie badań w zakresie neuroarchitektury, może wnieść to bowiem pozytywne zmiany, z których w innym wypadku moglibyśmy nigdy nie zdać sobie sprawy. Postęp technologii powoduje rozwój coraz nowszych metod badawczych (lub ulepszenie obecnych, czym zajmuje się np. firma Neuralink, projektująca wszczepialne interfejsy mózg–maszyna), a badania prowadzone w wielu krajach odkrywają kolejne możliwości zastosowania metod z zakresu neuronauk w architekturze. W ciągu kilku ostatnich lat nastąpił znaczny wzrost zainteresowania tą tematyką, co jednocześnie pociągnęło za sobą pozytywne konsekwencje w postaci powstania licznych publikacji, konferencji i grup badawczych zajmujących się powyższymi zagadnieniami. Opisane w artykule obszary badań wydają się nieść duży potencjał oraz możliwość reorganizacji i wzbogacenia znanego nam do tej pory procesu projektowego.

REFERENCES

- Alexander, Ch. et al. (2008), *Język wzorców. Miasta, budynki, konstrukcja*, transl. by Kaczanowska, A., Maliszewska, K. and Trzebiatowska, M., Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
- ‘Architektura’ (2010), [in:] *Encyklopedia PWN*. Available at: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/architektura;3870803.html> (accessed: 23.04.2022).
- Bañka, A. (2016), *Behawioralne podstawy projektowania architektonicznego*, Poznań: Stowarzyszenie Psychologia i Architektura.
- Bañka, A. (2018), *Psychologia środowiskowa jakości życia i innowacji społecznych*, Poznań–Katowice: Stowarzyszenie Psychologia i Architektura and Uniwersytet SWPS.
- Bell, P.A. et al. (2005), *Psychologia środowiskowa*, transl. by Jurkiewicz, A. et al., Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
- Bermudez, J. (2008), ‘Mapping the Phenomenological Territory of Profound Architectural Atmospheres. Results of Two Large Surveys’, [in:] *Proceedings of the International Symposium ‘Creating an Atmosphere’*, Grenoble: Ecole Nationale Supérieure d’Architecture de Grenoble. Available at: https://www.academia.edu/2902123/Mapping_the_Phenomenological_Territory_of_Profound_Architectural_Atmospheres_Results_of_Two_Large_Surveys (accessed: 29.09.2022).
- Bermudez, J. (2009), ‘Amazing Grace. New Research into “Extraordinary Architectural Experiences” Reveals the Central Role of Sacred Places’, *Faith & Form*, 42(2), pp. 8–13. Available at: https://www.academia.edu/3893879/AMAZING_GRACE_New_Research_into_Extraordinary_Architectural_Experiences_Reveals_the_Central_Role_of_Sacred_Places (accessed: 29.09.2022).
- Bermudez, J. et al. (2017), ‘Externally-Induced Meditative States: An Exploratory fMRI Study of Architects’ Re-

- sponses to Contemplative Architecture’, *Frontiers of Architectural Research*, 6(2), pp. 123–136. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263517300055>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.02.002> (accessed: 29.06.2022).
- Coburn, A. et al. (2020), ‘Psychological and Neural Responses to Architectural Interiors’, *Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 126, pp. 217–241. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010945220300332?via%3Dihub>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.01.009> (accessed: 29.06.2022).
- DeYoe, E.A. et al. (1994), ‘Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) of the Human Brain’, *Journal of Neuroscience Methods*, 54(2), pp. 171–187 Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7869750/>, DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0270\(94\)90191-0](https://doi.org/10.1016/0165-0270(94)90191-0) (accessed: 10.04.2022).
- Duchowski, A. (2007), ‘Eye Tracking Techniques’, [in:] idem, *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*, London: Springer, pp. 51–59. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84628-609-4_5#citeas, DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-609-4_5 (accessed: 20.04.2022).
- Garczarek-Bąk, U. (2016), ‘Użyteczność badań eye trackingowych w pomiarze utajonych determinant zachowań zakupowych nabywców’, *Ekonometria = Econometrics*, 3(53), pp. 54–71. Available at: https://dbc.wroc.pl/Content/36365/Garczarek-Bak_Uzytecznosc_Badan_Eye_Trackingowych_w_Pomiarze.pdf, DOI: <https://doi.org/10.15611/ekt.2016.3.05> (accessed: 21.04.2022).
- Glomb, K. et al. (2022), ‘Computational Models in Electroencephalography’, *Brain Topography*, 35, pp. 142–161. Available at https://www.researchgate.net/publication/350469162_Computational_Models_in_Electroencephalography, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10548-021-00828-2> (accessed: 21.04.2022).
- Gład, J. and Dworek, T. (2022), ‘Jak precyzyjnie badać przestrzeń? Badacze zaglądnij w oczy i sprawdzają fale mózgowo’, *Architektura & Biznes*, 04.04.2022. Available at: <https://www.architekturaibiznes.pl/badanie-przestrzeni-eyetracking-eeg-dworek,10992.html> (accessed: 19.04.2022).
- Gut, M. and Marchewka, A. (2004), ‘Funkcjonalny rezonans magnetyczny — nieinwazyjna metoda obrazowania aktywności ludzkiego mózgu’, *Konferencja „Nowe metody w neurobiologii”*, 15 grudnia 2004, pp. 35–40. Available at: http://www.ptbun.org.pl/archiv/nmwn04_gut.pdf (accessed: 14.04.2022).
- Hay, L. et al. (2022), ‘Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) in Design Studies: Methodological Considerations, Challenges, and Recommendations’, *Design Studies*, 78, 101078. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X21000892?via%3Dihub>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2021.101078> (accessed: 16.04.2022).
- Hollander, J.B. et al. (2021), ‘Eye-Tracking Emulation Software: A Promising Urban Design Tool’, *Architectural Science Review*, 64(4), pp. 383–393. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352156990_Eye-tracking_emulation_software_a_promising_urban_design_tool. DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00038628.2021.1929055> (accessed: 02.07.2022).
- Jaspers, E. and Teicholz, E. (2016), ‘The Quantified Building’, *Facility Management Journal*, March/April, pp. 40–45. Available at: http://fmj.ifma.org/publication/?i=295044&article_id=2432700&view=article-Browser (accessed: 30.04.2022).
- Kim, S., Park, H. and Choo, S. (2021), ‘Effects of Changes to Architectural Elements on Human Relaxation-Arousal Responses: Based on VR and EEG’, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4305. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8074029/>, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18084305> (accessed: 02.07.2022).
- Kocki, W. et al. (2018), ‘Eyetracking as a Method to Create New Possibilities in Urbanistic Experimental Research’, *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych, Oddział PAN w Lublinie*, 14(2), pp. 117–124. Available at: <https://ph.pollub.pl/index.php/teka/article/view/1791>, DOI: <https://doi.org/10.35784/teka.1791> (accessed: 21.04.2022).
- Kowalska, M. (2021), ‘Neuroarchitektura’, *Architektura i Biznes*, 11.01.2021. Available at: <https://www.architekturaibiznes.pl/neuroarchitektura,5395.html> (accessed: 17.08.2022).
- Lewicka, M. (2012), *Psychologia miejsca*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar.
- Maghool, A.H., Homolja, M. and Schnabel, M.A. (2020), ‘Cybernetics Approach to Virtual Emotional Spaces — An Electrodermal Activity Actuated Adaptive Space’, [in:] Werner, L.C. and Koering, D. (eds.), *Anthropologic — Architecture and Fabrication in the Cognitive Age: Proceedings of the 38th International Online Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Berlin, Germany, 16th–17th September 2020*, vol. 1, Brussels–Berlin: eCAAF and Institute of Architecture, Technische Universität Berlin, pp. 537–546. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344646817_Cybernetics_Approach_to_Virtual_Emotional_Spaces_-_An_electrodermal_activity_actuated_adaptive_space, DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.1.537> (accessed: 05.07.2022).
- Mutua, J. et al. (2020), ‘A Comparative Study of Postpartum Anxiety and Depression in Mothers with Pre-Term Births in Kenya’, *Journal of Affective Disorders Reports*, 2, 100043. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666915320300433>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jadr.2020.100043> (accessed: 05.07.2022).
- Soares, J.M. et al. (2016), ‘A Hitchhiker’s Guide to Functional Magnetic Resonance Imaging’, *Frontiers in Neuroscience*, 10, 515. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2016.00515/full>, DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00515> (accessed: 18.04.2022).
- Vemou, K. and Horvath, A. (2021), *EDPS TechDispatch: Facial Emotion Recognition*, Luxembourg: Publication Office of the European Union. Available at: https://edps.europa.eu/system/files/2021-05/21-05-26_techdispatch-facial-emotion-recognition_ref_en.pdf, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jadr.2020.100043> (accessed: 05.07.2022).

edps.europa.eu/data-protection/our-work/publications/techdispatch/techdispatch-12021-facial-emotion-recognition_en (accessed: 30.04.2022).

Wincewicz-Cichecka, K. and Nasierowski, T. (2020), 'Aktywność elektrodermalna a ocena ryzyka samobójstwa u osób z zaburzeniami afektywnymi', *Psychiatria Polska*, 54(6), pp. 1137–1147, Available at: http://www.psychiatriapolska.pl/uploads/images/PP_6_2020/1137WincewiczCichecka_PsychiatrPol2020v54i6.pdf, DOI: <https://doi.org/10.12740/PP/110144> (accessed: 23.04.2022).

Witruwiusz (1999), *O architekturze ksiąg dziesięć*, transl. by Kumaniecki, K., Warszawa: Prószyński i S-ka.

Zhang, Y. et al. (2022), 'Prediction of Human Restorative Experience for Human-Centered Residential Architecture Design: A Non-Immersive VR-DOE-Based Machine Learning Method', *Automation in Construction*, 136, 104189. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522000620>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104189> (accessed: 23.04.2022).