

## Effect of Cell Size and Cell Distribution on Dielectric Constant of Expanded Polystyrene Foam

D.Goudarzi<sup>1</sup>, S. M. Hossaini<sup>2</sup>, M. R.Pourhossaini<sup>3\*</sup>,M. Razavizadeh<sup>4</sup>,M. Khabiri<sup>5</sup>, S.Dare Khandan<sup>6</sup>

\*. Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 22/ 10 /2024, revised: 29/09/2024 ,Accepted:22/10/2024 , published: 06/11/2024)

DOR:

### Abstract

Polymers have the lowest dielectric constant among materials because they mainly lack magnetic dipole moment, electric non-polar structure, amorphous microstructure and low specific weight (lower molecular density). These properties of polymers have caused them to be highly regarded by the electricity, telecommunication and communication industries. Also, preparing foams from polymer materials is a very effective way to further reduce their dielectric constant. The technology of preparing materials with desired dielectric constants is used in designing and manufacturing telecommunication equipment, including reflectors, Fresnel and Luenberg lenses, etc. The purpose of this article is to investigate the effect of the morphology of expanded polystyrene foams on the dielectric constant, which is the ratio of the displacement current density of electromagnetic waves to the conduction current density of waves in a lossy medium. Expanded polystyrene foam samples with different porosity, cavity wall thickness, average cavity size, and homogeneity and heterogeneity were prepared using an oven, and the structure of cavities, dielectric characteristics of foams were analyzed with scanning electron microscope, vector network analyzer, respectively. and lensed trumpet antenna were investigated using dielectric measurement method in free space method. The effect of the size of the diameter of the holes of polystyrene foams in equal and different densities on the dielectric constant was investigated in this article. The results show that in expanded polystyrene foams, the dielectric constant does not necessarily decrease with the increase in the size of the sponge cavities, but sometimes the dielectric constant increases, so that, with the increase in density, the average size of the sponge cavities increases and the dielectric constant and the loss coefficient It has an increasing trend, but at porosity and density equal to the increase in the average size of the foam cavities, it causes a decrease in the dielectric constant and the loss coefficient. It has also been determined that the dielectric constant and loss coefficient of the homogeneous sample is lower than that of the heterogeneous sample.

**Keywords:** Dielectric constant, expanded polystyrene, morphology, average cell size, size distribution

\* Corresponding author E-mail: [mr\\_pourhossaini@yahoo.com](mailto:mr_pourhossaini@yahoo.com)

علمی- پژوهشی

## تأثیر اندازه حفره‌ها و توزیع اندازه حفره‌ها بر ثابت دی الکتریک اسفنج پلی استایرن انبساطی

داریوش گودرزی<sup>۱</sup>، سید محمد حسینی<sup>۲</sup>، محمدرضا پورحسینی<sup>۳\*</sup> ID، محمود رضوی زاده<sup>۴</sup>، محمد خبیری<sup>۵</sup>، سجاد دره خندان<sup>۶</sup>

۱- دانشجوی دکتری-۲ کارشناسی ارشد، ۳، ۴-۵، ۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵-۲۶-۲۷-۲۸-۲۹-۳۰-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۵-۴۶-۴۷-۴۸-۴۹-۵۰-۵۱-۵۲-۵۳-۵۴-۵۵-۵۶-۵۷-۵۸-۵۹-۶۰-۶۱-۶۲-۶۳-۶۴-۶۵-۶۶-۶۷-۶۸-۶۹-۷۰-۷۱-۷۲-۷۳-۷۴-۷۵-۷۶-۷۷-۷۸-۷۹-۸۰-۸۱-۸۲-۸۳-۸۴-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۱-۹۲-۹۳-۹۴-۹۵-۹۶-۹۷-۹۸-۹۹-۱۰۰-۱۰۱-۱۰۲-۱۰۳-۱۰۴-۱۰۵-۱۰۶-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۱۱-۱۱۲-۱۱۳-۱۱۴-۱۱۵-۱۱۶-۱۱۷-۱۱۸-۱۱۹-۱۲۰-۱۲۱-۱۲۲-۱۲۳-۱۲۴-۱۲۵-۱۲۶-۱۲۷-۱۲۸-۱۲۹-۱۳۰-۱۳۱-۱۳۲-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۱۳۷-۱۳۸-۱۳۹-۱۴۰-۱۴۱-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۴۵-۱۴۶-۱۴۷-۱۴۸-۱۴۹-۱۵۰-۱۵۱-۱۵۲-۱۵۳-۱۵۴-۱۵۵-۱۵۶-۱۵۷-۱۵۸-۱۵۹-۱۶۰-۱۶۱-۱۶۲-۱۶۳-۱۶۴-۱۶۵-۱۶۶-۱۶۷-۱۶۸-۱۶۹-۱۷۰-۱۷۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳-۱۸۴-۱۸۵-۱۸۶-۱۸۷-۱۸۸-۱۸۹-۱۹۰-۱۹۱-۱۹۲-۱۹۳-۱۹۴-۱۹۵-۱۹۶-۱۹۷-۱۹۸-۱۹۹-۲۰۰-۲۰۱-۲۰۲-۲۰۳-۲۰۴-۲۰۵-۲۰۶-۲۰۷-۲۰۸-۲۰۹-۲۱۰-۲۱۱-۲۱۲-۲۱۳-۲۱۴-۲۱۵-۲۱۶-۲۱۷-۲۱۸-۲۱۹-۲۲۰-۲۲۱-۲۲۲-۲۲۳-۲۲۴-۲۲۵-۲۲۶-۲۲۷-۲۲۸-۲۲۹-۲۳۰-۲۳۱-۲۳۲-۲۳۳-۲۳۴-۲۳۵-۲۳۶-۲۳۷-۲۳۸-۲۳۹-۲۴۰-۲۴۱-۲۴۲-۲۴۳-۲۴۴-۲۴۵-۲۴۶-۲۴۷-۲۴۸-۲۴۹-۲۵۰-۲۵۱-۲۵۲-۲۵۳-۲۵۴-۲۵۵-۲۵۶-۲۵۷-۲۵۸-۲۵۹-۲۶۰-۲۶۱-۲۶۲-۲۶۳-۲۶۴-۲۶۵-۲۶۶-۲۶۷-۲۶۸-۲۶۹-۲۷۰-۲۷۱-۲۷۲-۲۷۳-۲۷۴-۲۷۵-۲۷۶-۲۷۷-۲۷۸-۲۷۹-۲۸۰-۲۸۱-۲۸۲-۲۸۳-۲۸۴-۲۸۵-۲۸۶-۲۸۷-۲۸۸-۲۸۹-۲۹۰-۲۹۱-۲۹۲-۲۹۳-۲۹۴-۲۹۵-۲۹۶-۲۹۷-۲۹۸-۲۹۹-۳۰۰-۳۰۱-۳۰۲-۳۰۳-۳۰۴-۳۰۵-۳۰۶-۳۰۷-۳۰۸-۳۰۹-۳۱۰-۳۱۱-۳۱۲-۳۱۳-۳۱۴-۳۱۵-۳۱۶-۳۱۷-۳۱۸-۳۱۹-۳۲۰-۳۲۱-۳۲۲-۳۲۳-۳۲۴-۳۲۵-۳۲۶-۳۲۷-۳۲۸-۳۲۹-۳۳۰-۳۳۱-۳۳۲-۳۳۳-۳۳۴-۳۳۵-۳۳۶-۳۳۷-۳۳۸-۳۳۹-۳۴۰-۳۴۱-۳۴۲-۳۴۳-۳۴۴-۳۴۵-۳۴۶-۳۴۷-۳۴۸-۳۴۹-۳۵۰-۳۵۱-۳۵۲-۳۵۳-۳۵۴-۳۵۵-۳۵۶-۳۵۷-۳۵۸-۳۵۹-۳۶۰-۳۶۱-۳۶۲-۳۶۳-۳۶۴-۳۶۵-۳۶۶-۳۶۷-۳۶۸-۳۶۹-۳۷۰-۳۷۱-۳۷۲-۳۷۳-۳۷۴-۳۷۵-۳۷۶-۳۷۷-۳۷۸-۳۷۹-۳۸۰-۳۸۱-۳۸۲-۳۸۳-۳۸۴-۳۸۵-۳۸۶-۳۸۷-۳۸۸-۳۸۹-۳۹۰-۳۹۱-۳۹۲-۳۹۳-۳۹۴-۳۹۵-۳۹۶-۳۹۷-۳۹۸-۳۹۹-۴۰۰-۴۰۱-۴۰۲-۴۰۳-۴۰۴-۴۰۵-۴۰۶-۴۰۷-۴۰۸-۴۰۹-۴۱۰-۴۱۱-۴۱۲-۴۱۳-۴۱۴-۴۱۵-۴۱۶-۴۱۷-۴۱۸-۴۱۹-۴۲۰-۴۲۱-۴۲۲-۴۲۳-۴۲۴-۴۲۵-۴۲۶-۴۲۷-۴۲۸-۴۲۹-۴۳۰-۴۳۱-۴۳۲-۴۳۳-۴۳۴-۴۳۵-۴۳۶-۴۳۷-۴۳۸-۴۳۹-۴۴۰-۴۴۱-۴۴۲-۴۴۳-۴۴۴-۴۴۵-۴۴۶-۴۴۷-۴۴۸-۴۴۹-۴۵۰-۴۵۱-۴۵۲-۴۵۳-۴۵۴-۴۵۵-۴۵۶-۴۵۷-۴۵۸-۴۵۹-۴۶۰-۴۶۱-۴۶۲-۴۶۳-۴۶۴-۴۶۵-۴۶۶-۴۶۷-۴۶۸-۴۶۹-۴۷۰-۴۷۱-۴۷۲-۴۷۳-۴۷۴-۴۷۵-۴۷۶-۴۷۷-۴۷۸-۴۷۹-۴۸۰-۴۸۱-۴۸۲-۴۸۳-۴۸۴-۴۸۵-۴۸۶-۴۸۷-۴۸۸-۴۸۹-۴۹۰-۴۹۱-۴۹۲-۴۹۳-۴۹۴-۴۹۵-۴۹۶-۴۹۷-۴۹۸-۴۹۹-۵۰۰-۵۰۱-۵۰۲-۵۰۳-۵۰۴-۵۰۵-۵۰۶-۵۰۷-۵۰۸-۵۰۹-۵۱۰-۵۱۱-۵۱۲-۵۱۳-۵۱۴-۵۱۵-۵۱۶-۵۱۷-۵۱۸-۵۱۹-۵۲۰-۵۲۱-۵۲۲-۵۲۳-۵۲۴-۵۲۵-۵۲۶-۵۲۷-۵۲۸-۵۲۹-۵۳۰-۵۳۱-۵۳۲-۵۳۳-۵۳۴-۵۳۵-۵۳۶-۵۳۷-۵۳۸-۵۳۹-۵۴۰-۵۴۱-۵۴۲-۵۴۳-۵۴۴-۵۴۵-۵۴۶-۵۴۷-۵۴۸-۵۴۹-۵۵۰-۵۵۱-۵۵۲-۵۵۳-۵۵۴-۵۵۵-۵۵۶-۵۵۷-۵۵۸-۵۵۹-۵۶۰-۵۶۱-۵۶۲-۵۶۳-۵۶۴-۵۶۵-۵۶۶-۵۶۷-۵۶۸-۵۶۹-۵۷۰-۵۷۱-۵۷۲-۵۷۳-۵۷۴-۵۷۵-۵۷۶-۵۷۷-۵۷۸-۵۷۹-۵۸۰-۵۸۱-۵۸۲-۵۸۳-۵۸۴-۵۸۵-۵۸۶-۵۸۷-۵۸۸-۵۸۹-۵۹۰-۵۹۱-۵۹۲-۵۹۳-۵۹۴-۵۹۵-۵۹۶-۵۹۷-۵۹۸-۵۹۹-۶۰۰-۶۰۱-۶۰۲-۶۰۳-۶۰۴-۶۰۵-۶۰۶-۶۰۷-۶۰۸-۶۰۹-۶۱۰-۶۱۱-۶۱۲-۶۱۳-۶۱۴-۶۱۵-۶۱۶-۶۱۷-۶۱۸-۶۱۹-۶۲۰-۶۲۱-۶۲۲-۶۲۳-۶۲۴-۶۲۵-۶۲۶-۶۲۷-۶۲۸-۶۲۹-۶۳۰-۶۳۱-۶۳۲-۶۳۳-۶۳۴-۶۳۵-۶۳۶-۶۳۷-۶۳۸-۶۳۹-۶۴۰-۶۴۱-۶۴۲-۶۴۳-۶۴۴-۶۴۵-۶۴۶-۶۴۷-۶۴۸-۶۴۹-۶۵۰-۶۵۱-۶۵۲-۶۵۳-۶۵۴-۶۵۵-۶۵۶-۶۵۷-۶۵۸-۶۵۹-۶۶۰-۶۶۱-۶۶۲-۶۶۳-۶۶۴-۶۶۵-۶۶۶-۶۶۷-۶۶۸-۶۶۹-۶۷۰-۶۷۱-۶۷۲-۶۷۳-۶۷۴-۶۷۵-۶۷۶-۶۷۷-۶۷۸-۶۷۹-۶۸۰-۶۸۱-۶۸۲-۶۸۳-۶۸۴-۶۸۵-۶۸۶-۶۸۷-۶۸۸-۶۸۹-۶۹۰-۶۹۱-۶۹۲-۶۹۳-۶۹۴-۶۹۵-۶۹۶-۶۹۷-۶۹۸-۶۹۹-۷۰۰-۷۰۱-۷۰۲-۷۰۳-۷۰۴-۷۰۵-۷۰۶-۷۰۷-۷۰۸-۷۰۹-۷۱۰-۷۱۱-۷۱۲-۷۱۳-۷۱۴-۷۱۵-۷۱۶-۷۱۷-۷۱۸-۷۱۹-۷۲۰-۷۲۱-۷۲۲-۷۲۳-۷۲۴-۷۲۵-۷۲۶-۷۲۷-۷۲۸-۷۲۹-۷۳۰-۷۳۱-۷۳۲-۷۳۳-۷۳۴-۷۳۵-۷۳۶-۷۳۷-۷۳۸-۷۳۹-۷۴۰-۷۴۱-۷۴۲-۷۴۳-۷۴۴-۷۴۵-۷۴۶-۷۴۷-۷۴۸-۷۴۹-۷۵۰-۷۵۱-۷۵۲-۷۵۳-۷۵۴-۷۵۵-۷۵۶-۷۵۷-۷۵۸-۷۵۹-۷۶۰-۷۶۱-۷۶۲-۷۶۳-۷۶۴-۷۶۵-۷۶۶-۷۶۷-۷۶۸-۷۶۹-۷۷۰-۷۷۱-۷۷۲-۷۷۳-۷۷۴-۷۷۵-۷۷۶-۷۷۷-۷۷۸-۷۷۹-۷۸۰-۷۸۱-۷۸۲-۷۸۳-۷۸۴-۷۸۵-۷۸۶-۷۸۷-۷۸۸-۷۸۹-۷۹۰-۷۹۱-۷۹۲-۷۹۳-۷۹۴-۷۹۵-۷۹۶-۷۹۷-۷۹۸-۷۹۹-۸۰۰-۸۰۱-۸۰۲-۸۰۳-۸۰۴-۸۰۵-۸۰۶-۸۰۷-۸۰۸-۸۰۹-۸۱۰-۸۱۱-۸۱۲-۸۱۳-۸۱۴-۸۱۵-۸۱۶-۸۱۷-۸۱۸-۸۱۹-۸۲۰-۸۲۱-۸۲۲-۸۲۳-۸۲۴-۸۲۵-۸۲۶-۸۲۷-۸۲۸-۸۲۹-۸۳۰-۸۳۱-۸۳۲-۸۳۳-۸۳۴-۸۳۵-۸۳۶-۸۳۷-۸۳۸-۸۳۹-۸۴۰-۸۴۱-۸۴۲-۸۴۳-۸۴۴-۸۴۵-۸۴۶-۸۴۷-۸۴۸-۸۴۹-۸۵۰-۸۵۱-۸۵۲-۸۵۳-۸۵۴-۸۵۵-۸۵۶-۸۵۷-۸۵۸-۸۵۹-۸۶۰-۸۶۱-۸۶۲-۸۶۳-۸۶۴-۸۶۵-۸۶۶-۸۶۷-۸۶۸-۸۶۹-۸۷۰-۸۷۱-۸۷۲-۸۷۳-۸۷۴-۸۷۵-۸۷۶-۸۷۷-۸۷۸-۸۷۹-۸۸۰-۸۸۱-۸۸۲-۸۸۳-۸۸۴-۸۸۵-۸۸۶-۸۸۷-۸۸۸-۸۸۹-۸۹۰-۸۹۱-۸۹۲-۸۹۳-۸۹۴-۸۹۵-۸۹۶-۸۹۷-۸۹۸-۸۹۹-۹۰۰-۹۰۱-۹۰۲-۹۰۳-۹۰۴-۹۰۵-۹۰۶-۹۰۷-۹۰۸-۹۰۹-۹۱۰-۹۱۱-۹۱۲-۹۱۳-۹۱۴-۹۱۵-۹۱۶-۹۱۷-۹۱۸-۹۱۹-۹۲۰-۹۲۱-۹۲۲-۹۲۳-۹۲۴-۹۲۵-۹۲۶-۹۲۷-۹۲۸-۹۲۹-۹۳۰-۹۳۱-۹۳۲-۹۳۳-۹۳۴-۹۳۵-۹۳۶-۹۳۷-۹۳۸-۹۳۹-۹۴۰-۹۴۱-۹۴۲-۹۴۳-۹۴۴-۹۴۵-۹۴۶-۹۴۷-۹۴۸-۹۴۹-۹۵۰-۹۵۱-۹۵۲-۹۵۳-۹۵۴-۹۵۵-۹۵۶-۹۵۷-۹۵۸-۹۵۹-۹۶۰-۹۶۱-۹۶۲-۹۶۳-۹۶۴-۹۶۵-۹۶۶-۹۶۷-۹۶۸-۹۶۹-۹۷۰-۹۷۱-۹۷۲-۹۷۳-۹۷۴-۹۷۵-۹۷۶-۹۷۷-۹۷۸-۹۷۹-۹۸۰-۹۸۱-۹۸۲-۹۸۳-۹۸۴-۹۸۵-۹۸۶-۹۸۷-۹۸۸-۹۸۹-۹۹۰-۹۹۱-۹۹۲-۹۹۳-۹۹۴-۹۹۵-۹۹۶-۹۹۷-۹۹۸-۹۹۹-۱۰۰۰-۱۰۰۱-۱۰۰۲-۱۰۰۳-۱۰۰۴-۱۰۰۵-۱۰۰۶-۱۰۰۷-۱۰۰۸-۱۰۰۹-۱۰۱۰-۱۰۱۱-۱۰۱۲-۱۰۱۳-۱۰۱۴-۱۰۱۵-۱۰۱۶-۱۰۱۷-۱۰۱۸-۱۰۱۹-۱۰۲۰-۱۰۲۱-۱۰۲۲-۱۰۲۳-۱۰۲۴-۱۰۲۵-۱۰۲۶-۱۰۲۷-۱۰۲۸-۱۰۲۹-۱۰۳۰-۱۰۳۱-۱۰۳۲-۱۰۳۳-۱۰۳۴-۱۰۳۵-۱۰۳۶-۱۰۳۷-۱۰۳۸-۱۰۳۹-۱۰۴۰-۱۰۴۱-۱۰۴۲-۱۰۴۳-۱۰۴۴-۱۰۴۵-۱۰۴۶-۱۰۴۷-۱۰۴۸-۱۰۴۹-۱۰۵۰-۱۰۵۱-۱۰۵۲-۱۰۵۳-۱۰۵۴-۱۰۵۵-۱۰۵۶-۱۰۵۷-۱۰۵۸-۱۰۵۹-۱۰۶۰-۱۰۶۱-۱۰۶۲-۱۰۶۳-۱۰۶۴-۱۰۶۵-۱۰۶۶-۱۰۶۷-۱۰۶۸-۱۰۶۹-۱۰۷۰-۱۰۷۱-۱۰۷۲-۱۰۷۳-۱۰۷۴-۱۰۷۵-۱۰۷۶-۱۰۷۷-۱۰۷۸-۱۰۷۹-۱۰۸۰-۱۰۸۱-۱۰۸۲-۱۰۸۳-۱۰۸۴-۱۰۸۵-۱۰۸۶-۱۰۸۷-۱۰۸۸-۱۰۸۹-۱۰۹۰-۱۰۹۱-۱۰۹۲-۱۰۹۳-۱۰۹۴-۱۰۹۵-۱۰۹۶-۱۰۹۷-۱۰۹۸-۱۰۹۹-۱۱۰۰-۱۱۰۱-۱۱۰۲-۱۱۰۳-۱۱۰۴-۱۱۰۵-۱۱۰۶-۱۱۰۷-۱۱۰۸-۱۱۰۹-۱۱۱۰-۱۱۱۱-۱۱۱۲-۱۱۱۳-۱۱۱۴-۱۱۱۵-۱۱۱۶-۱۱۱۷-۱۱۱۸-۱۱۱۹-۱۱۲۰-۱۱۲۱-۱۱۲۲-۱۱۲۳-۱۱۲۴-۱۱۲۵-۱۱۲۶-۱۱۲۷-۱۱۲۸-۱۱۲۹-۱۱۳۰-۱۱۳۱-۱۱۳۲-۱۱۳۳-۱۱۳۴-۱۱۳۵-۱۱۳۶-۱۱۳۷-۱۱۳۸-۱۱۳۹-۱۱۴۰-۱۱۴۱-۱۱۴۲-۱۱۴۳-۱۱۴۴-۱۱۴۵-۱۱۴۶-۱۱۴۷-۱۱۴۸-۱۱۴۹-۱۱۵۰-۱۱۵۱-۱۱۵۲-۱۱۵۳-۱۱۵۴-۱۱۵۵-۱۱۵۶-۱۱۵۷-۱۱۵۸-۱۱۵۹-۱۱۶۰-۱۱۶۱-۱۱۶۲-۱۱۶۳-۱۱۶۴-۱۱۶۵-۱۱۶۶-۱۱۶۷-۱۱۶۸-۱۱۶۹-۱۱۷۰-۱۱۷۱-۱۱۷۲-۱۱۷۳-۱۱۷۴-۱۱۷۵-۱۱۷۶-۱۱۷۷-۱۱۷۸-۱۱۷۹-۱۱۸۰-۱۱۸۱-۱۱۸۲-۱۱۸۳-۱۱۸۴-۱۱۸۵-۱۱۸۶-۱۱۸۷-۱۱۸۸-۱۱۸۹-۱۱۹۰-۱۱۹۱-۱۱۹۲-۱۱۹۳-۱۱۹۴-۱۱۹۵-۱۱۹۶-۱۱۹۷-۱۱۹۸-۱۱۹۹-۱۲۰۰-۱۲۰۱-۱۲۰۲-۱۲۰۳-۱۲۰۴-۱۲۰۵-۱۲۰۶-۱۲۰۷-۱۲۰۸-۱۲۰۹-۱۲۱۰-۱۲۱۱-۱۲۱۲-۱۲۱۳-۱۲۱۴-۱۲۱۵-۱۲۱۶-۱۲۱۷-۱۲۱۸-۱۲۱۹-۱۲۲۰-۱۲۲۱-۱۲۲۲-۱۲۲۳-۱۲۲۴-۱۲۲۵-۱۲۲۶-۱۲۲۷-۱۲۲۸-۱۲۲۹-۱۲۳۰-۱۲۳۱-۱۲۳۲-۱۲۳۳-۱۲۳۴-۱۲۳۵-۱۲۳۶-۱۲۳۷-۱۲۳۸-۱۲۳۹-۱۲۴۰-۱۲۴۱-۱۲۴۲-۱۲۴۳-۱۲۴۴-۱۲۴۵-۱۲۴۶-۱۲۴۷-۱۲۴۸-۱۲۴۹-۱۲۵۰-۱۲۵۱-۱۲۵۲-۱۲۵۳-۱۲۵۴-۱۲۵۵-۱۲۵۶-۱۲۵۷-۱۲۵۸-۱۲۵۹-۱۲۶۰-۱۲۶۱-۱۲۶۲-۱۲۶۳-۱۲۶۴-۱۲۶۵-۱۲۶۶-۱۲۶۷-۱۲۶۸-۱۲۶۹-۱۲۷۰-۱۲۷۱-۱۲۷۲-۱۲۷۳-۱۲۷۴-۱۲۷۵-۱۲۷۶-۱۲۷۷-۱۲۷۸-۱۲۷۹-۱۲۸۰-۱۲۸۱-۱۲۸۲-۱۲۸۳-۱۲۸۴-۱۲۸۵-۱۲۸۶-۱۲۸۷-۱۲۸۸-۱۲۸۹-۱۲۹۰-۱۲۹۱-۱۲۹۲-۱۲۹۳-۱۲۹۴-۱۲۹۵-۱۲۹۶-۱۲۹۷-۱۲۹۸-۱۲۹۹-۱۳۰۰-۱۳۰۱-۱۳۰۲-۱۳۰۳-۱۳۰۴-۱۳۰۵-۱۳۰۶-۱۳۰۷-۱۳۰۸-۱۳۰۹-۱۳۱۰-۱۳۱۱-۱۳۱۲-۱۳۱۳-۱۳۱۴-۱۳۱۵-۱۳۱۶-۱۳۱۷-۱۳۱۸-۱۳۱۹-۱۳۲۰-۱۳۲۱-۱۳۲۲-۱۳۲۳-۱۳۲۴-۱۳۲۵-۱۳۲۶-۱۳۲۷-۱۳۲۸-۱۳۲۹-۱۳۳۰-۱۳۳۱-۱۳۳۲-۱۳۳۳-۱۳۳۴-۱۳۳۵-۱۳۳۶-۱۳۳۷-۱۳۳۸-۱۳۳۹-۱۳۴۰-۱۳۴۱-۱۳۴۲-۱۳۴۳-۱۳۴۴-۱۳۴۵-۱۳۴۶-۱۳۴۷-۱۳۴۸-۱۳۴۹-۱۳۵۰-۱۳۵۱-۱۳۵۲-۱۳۵۳-۱۳۵۴-۱۳۵۵-۱۳۵۶-۱۳۵۷-۱۳۵۸-۱۳۵۹-۱۳۶۰-۱۳۶۱-۱۳۶۲-۱۳۶۳-۱۳۶۴-۱۳۶۵-۱۳۶۶-۱۳۶۷-۱۳۶۸-۱۳۶۹-۱۳۷۰-۱۳۷۱-۱۳۷۲-۱۳۷۳-۱۳۷۴-۱۳۷۵-۱۳۷۶-۱۳۷۷-۱۳۷۸-۱۳۷۹-۱۳۸۰-۱۳۸۱-۱۳۸۲-۱۳۸۳-۱۳۸۴-۱۳۸۵-۱۳۸۶-۱۳۸۷-۱۳۸۸-۱۳۸۹-۱۳۹۰-۱۳۹۱-۱۳۹۲-۱۳۹۳-۱۳۹۴-۱۳۹۵-۱۳۹۶-۱۳۹۷-۱۳۹۸-۱۳۹۹-۱۴۰۰-۱۴۰۱-۱۴۰۲-۱۴۰۳-۱۴۰۴-۱۴۰۵-۱۴۰۶-۱۴۰۷-۱۴۰۸-۱۴۰۹-۱۴۱۰-۱۴۱۱-۱۴۱۲-۱۴۱۳-۱۴۱۴-۱۴۱۵-۱۴۱۶-۱۴۱۷-۱۴۱۸-۱۴۱۹-۱۴۲۰-۱۴۲۱-۱۴۲۲-۱۴۲۳-۱۴۲۴-۱۴۲۵-۱۴۲۶-۱۴۲۷-۱۴۲۸-۱۴۲۹-۱۴۳۰-۱۴۳۱-۱۴۳۲-۱۴۳۳-۱۴۳۴-۱۴۳۵-۱۴۳۶-۱۴۳۷-۱۴۳۸-۱۴۳۹-۱۴۴۰-۱۴۴۱-۱۴۴۲-۱۴۴۳-۱۴۴۴-۱۴۴۵-۱۴۴۶-۱۴۴۷-۱۴۴۸-۱۴۴۹-۱۴۵۰-۱۴۵۱-۱۴۵۲-۱۴۵۳-۱۴۵۴-۱۴۵۵-۱۴۵۶-۱۴۵۷-۱۴۵۸-۱۴۵۹-۱۴۶۰-۱۴۶۱-۱۴۶۲-۱۴۶۳-۱۴۶۴-۱۴۶۵-۱۴۶۶-۱۴۶۷-۱۴۶۸-۱۴۶۹-۱۴۷۰-۱۴۷۱-۱۴۷۲-۱۴۷۳-۱۴۷۴-۱۴۷۵-۱۴۷۶-۱۴۷۷-۱۴۷۸-۱۴۷۹-۱۴۸۰-۱۴۸۱-۱۴۸۲-۱۴۸۳-۱۴۸۴-۱۴۸۵-۱۴۸۶-۱۴۸۷-۱۴۸۸-۱۴۸۹-۱۴۹۰-۱۴۹۱-۱۴۹۲-۱۴۹۳-۱۴۹۴-۱۴۹۵-۱۴۹۶-۱۴۹۷-۱۴۹۸-۱۴۹۹-۱۵۰۰-۱۵۰۱-۱۵۰۲-۱۵۰۳-۱۵۰۴-۱۵۰۵-۱۵۰۶-۱۵۰۷-۱۵۰۸-۱۵۰۹-۱۵۱۰-۱۵۱۱-۱۵۱۲-۱۵۱۳-۱۵۱۴-۱۵۱۵-۱۵۱۶-۱۵۱۷-۱۵۱۸-۱۵۱۹-۱۵۲۰-۱۵۲۱-۱۵۲۲-۱۵۲۳-۱۵۲۴-۱۵۲۵-۱۵۲۶-۱۵۲۷-۱۵۲۸-۱۵۲۹-۱۵۳۰-۱۵۳۱-۱۵۳۲-۱۵۳۳-۱۵۳۴-۱۵۳۵-۱۵۳۶-۱۵۳۷-۱۵۳۸-۱۵۳۹-۱۵۴۰-۱۵۴۱-۱۵۴۲-۱۵۴۳-۱۵۴۴-۱۵۴۵-۱۵۴۶-۱۵۴۷-۱۵۴

## ۱- مقدمه

با توسعه سریع شبکه ارتباطی 5G، مواد پلیمری با ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۲/۵ و ضریب تلفات دی‌الکتریک کم برای استفاده در دستگاه‌های ارتباطی با سرعت بالا کاربرد پیدا کرده‌اند [۱-۲]. هنگامی که مقدار ثابت دی‌الکتریک مواد پلیمری به ۱/۵ کاهش یابد، سرعت انتقال سیگنال ۱/۶ برابر افزایش می‌یابد [۳]. در نتیجه، پلیمرهای با ثابت دی‌الکتریک پائین، مواد جذابی برای استفاده در شبکه‌های ارتباطی با سرعت بالا، مانند دی‌الکتریک‌های لایه‌ای مورد استفاده در بازتابنده‌ها، آنتن‌ها، لنزهای لوئبرگ و فرنل، تجهیزات مختلف مخابراتی و غیره هستند [۴]. اسفنج‌های پلی‌استایرن به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر قیمت بسیار کم، خواص مکانیکی مناسب، عایق حرارت بودن [۱]، قابلیت جذب انرژی در مواجهه با ضربه [۲]، خواص دی‌الکتریک [۳] و جذب امواج [۴] دارای کاربردهای فراوانی در صنایع مختلفی نظیر خودروسازی [۵]، بسته‌بندی [۳، ۶، ۷]، ساختمان‌سازی [۸] و مخابرات [۹] هستند.

در حال حاضر مشخص شده است که تهیه اسفنج از مواد پلیمری، روشی بسیار مؤثر برای کاهش ثابت دی‌الکتریک بیشتر مواد پلیمری است [۱۰-۱۴]. در سال ۲۰۱۹ چن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] تأثیر غلظت‌های مختلف (۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی) نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) را بر خواص مغناطیس و استحکام فشاری اسفنج پلی‌متاکریلیمید (PMI) بررسی کردند. آنان دریافتند، در فرکانس ۱۲ گیگاهرتز با افزایش میزان نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) میانگین اندازه حفره‌ها از ۱۷۰ تا ۳۰۰ میکرون افزایش و ثابت دی‌الکتریک از ۲/۷۴ تا ۲/۸۳ افزایش می‌یابد. در تحقیقی

دیگر برای بررسی رفتار اسفنج‌ها، دینگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۶] نمونه‌هایی از الیاف آهن به عنوان لیف رسانا دارای قطر ۱/۸ میکرومتر و طول ۷/۲-۰/۹ میلی‌متر در زمینه اسفنج پلی‌یورتان را تهیه کردند که از ایزوسیانات و پلی‌اتر پلی‌هیدریک الکل تهیه شده است. سپس به مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی ضریب انعکاس نمونه‌ها در برابر فرکانس پرداختند. آن‌ها دریافتند، هنگامی که نسبت منظر افزایش پیدا می‌کند، ضریب انعکاس از همان فرکانس‌های پائین شروع به افزایش می‌کند و هرچه غلظت الیاف رسانا افزایش پیدا کند، ضریب انعکاس کاهش پیدا می‌کند. همچنین توماسین<sup>۳</sup> و همکاران [۱۷] به بررسی اثر متغیرهای شکل شناسی (اندازه قطر حفره‌ها، چگالی حفره‌ها و ضخامت دیواره) اسفنج میکروحفره‌ها (PMMA/MWNTs) روی رسانایی الکتریکی در مقدار نانو ذره ثابت پرداختند و مقادیر رسانایی الکتریکی را با حالت‌های اسفنج نشده مقایسه نمودند. آنان دریافتند، برای دستیابی به اسفنج‌های مشابه با ثابت دی‌الکتریک کم، اندازه حفره‌ها کوچک، چگالی حفره‌ها بالا و ضخامت دیواره نازک مورد نیاز است. در تحقیقی ژونگلیما<sup>۴</sup> و همکاران [۱۸] خواص مکانیکی و دی‌الکتریک فشاری، دینامیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌کربنات میکروحفره‌ها با توزیع‌های اندازه حفره‌ها همگن یا ناهمگن ساخته شده با استفاده از دی‌اکسید کربن فوق بحرانی سازگار با محیط را بررسی کردند. آنان دریافتند، خواص دی‌الکتریک اسفنج‌های میکروحفره‌ها فقط به تخلخل کل بستگی دارد، اما به توزیع اندازه حفره‌ها یا ریزساختار اسفنج‌ها بستگی ندارد و با افزایش تخلخل، ثابت دی‌الکتریک اسفنج‌های میکروحفره‌ها به

<sup>2</sup> Ding<sup>3</sup> Thomasin<sup>4</sup> Junglima<sup>1</sup> Wenjing Chen

میانگین قطر حفره‌ها، همگنی و ناهمگنی توزیع آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی اندازه‌گیری شد. سپس ثابت دی الکتریک این اسفنج‌ها مورد نظر ارزیابی و تحلیل قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق و ابزارها

برای ساخت اسفنج پلی استایرن انبساطی از پلی استایرن انبساطی نوع HS-321 ساخت پتروشیمی تبریز با چگالی ۰/۳ گرم بر سانتی متر مکعب، اندازه دانه بین ۱-۰/۷ میلی متر و ۵/۲ درصد وزنی پنتان نرمال استفاده شد. ساخت نمونه‌ها با استفاده از یک قالب فلزی با حجم مشخص و کوره در یک فرآیند دو مرحله‌ای انجام شد. ابتدا قالب متناسب با چگالی مدنظر و نسبت ترکیب درصد پلی استایرن پیش‌پف شده پلی استایرن پیش‌پف نشده پر و در کوره در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۶۰ دقیقه قرار داده شده و در مرحله دوم پس از گذشت ۶۰ دقیقه دمای آن از ۱۰۰ به ۱۱۵ درجه تغییر یافت و در همان دما به مدت ۳۵ دقیقه باقی ماند. سپس قالب از اون خارج و در معرض باد سرد قرار داده شد. جدول ۱ شرایط پردازش و ویژگی نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

## ۳- محاسبات

چگالی اسفنج مطابق استاندارد ASTM D-۳۵۷۵ محاسبه شد. میزان تخلخل  $V_{ir}$  با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.  $\rho_f$  چگالی اسفنج و  $\rho_p$  چگالی پلیمر است.

$$V_{ir} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}$$

جدول ۱ ویژگی‌های اسفنج‌های پلی استایرن

تدریج کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۰ لینگ وانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۹] خواص مکانیکی و دی الکتریک اسفنج‌های پلی آریلن اترنیتریل (PEN) مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مشخص شد، با افزایش اندازه حفره‌ها از ۱۰۰ میکرومتر به ۳۶۰ میکرومتر ثابت دی الکتریک از ۱/۲۵ به ۱/۳۳ در ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد.

خواص مختلف اسفنج‌های پلی استایرن به هر دو خواص زمینه پلیمری و ساختار حفره‌ها بستگی دارد. خواص مهمی از قبیل تراکم، اندازه، ضخامت دیواره و همگنی ساختار حفره‌ها و میزان تخلخل برای ارزیابی کیفیت ساختار حفره‌ها اسفنج‌های پلی استایرن استفاده می‌شود [۲۰]. در تحقیقی دیگر لیاو و همکاران [۲۱] تأثیر انواع گرافن (بلند و کوتاه و ترکیبی) بر فرآیند اسفنج شدن، ساختار حفره‌ها، ثابت دی الکتریک و آستانه نفوذ را در فرآیند اسفنج نانوکامپوزیتی گرافن- پلی استایرن با استفاده از دی اکسید کربن در دما و فشار مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند، یک درصد حجمی گرافن بیشترین ثابت دی الکتریک در اسفنج پلی استایرن ایجاد می‌کند. همچنین در این تحقیق مشخص شد، اسفنج‌های تهیه شده در شرایط اسفنج سازی ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ مگاپاسکال و ۸۰ درجه سانتی‌گراد حباب کوچک‌تر به نمایش می‌گذارند و تراکم حفره‌ها و رسانایی الکتریکی بالاتری را نشان می‌دهند. هدف این مقاله اثر همزمان دو عامل اندازه قطر حفره‌ها و چگالی اسفنج‌های پلی استایرن انبساطی بر ثابت دی الکتریک آن‌ها است. همچنین تأثیر همگن یا غیر همگن بودن ساختار حفره‌ها اسفنج‌های پلی استایرن انبساطی بر ثابت دی الکتریک آن‌ها مورد توجه است. در این راستا اسفنج‌های پلی استایرن انبساطی با چگالی‌های مختلف یا برابر تهیه و عوامل ساختاری آن‌ها از قبیل

<sup>1</sup> Ling Wang

(۴) هر یک پلیمر کمتر شبکه‌ای شود، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.

(۵) فرآیند اسفنج نمودن پلیمرها باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک آن‌ها می‌شود.

(۶) در چگالی برابر، اسفنج‌های با حفره‌های درشت‌تر ثابت دی‌الکتریک کمتری دارد [۲۳].

ارتباط ریاضی ثابت دی‌الکتریک و ساختار ماده مطابق معادله زیر می‌باشد:

در (۴) معادله  $\epsilon_r total$ ،  $\epsilon_r EPS$  و  $\epsilon_r Air$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک اسفنج، پلی‌استایرن انبساطی و هوا می‌باشند. همچنین  $Fr_{EPS}$  و  $Fr_{Air}$  به ترتیب درصد فراوانی هوا و پلی‌استایرن انبساطی می‌باشند.

ادوات اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک شامل یک دستگاه تحلیل‌گر شبکه و آنتن شیپوری لنزدار است. مشخصات دی‌الکتریک نمونه‌ها در آزمایشگاه مجتمع الکترومغناطیس دانشگاه صنعتی مالک اشتر اندازه‌گیری شد. از سیستم اندازه‌گیری متشکل از دو آنتن باند X لنزدار روبری هم مطابق شکل ۱ استفاده شد. نمونه مورد اندازه‌گیری در فاصله کانونی دو آنتن که ۶۰ سانتی‌متر است قرار گرفت و سیستم اندازه‌گیری با استفاده از یک کالیبراسیون دوگانه واسنجی می‌شود. در مرحله اول سیستم تا دهانه آنتن به روش SOLT واسنجی شده و سپس با استفاده از دروازه‌بندی زمانی و روش TRL، مرجع فاز اندازه‌گیری به دو سطح نمونه منتقل می‌شود. همچنین متغیرهای پراکندگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه اندازه‌گیری شد. مقادیر بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات نمونه‌ها به وسیله تابع طراحی شده در نرم افزار متلب در روش فضای آزاد متفاوت با شیوه محاسبه آن در روش موجبری بدست آمده است [۲۴]. با توجه به ساختار غیرمغناطیسی مولکول اسفنج‌های پلی‌استایرن انبساطی،

نمونه	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مورفولوژی	ضخامت (cm)	درصد تخلخل
EPS-B1-300	0.3	همگن	3	70
EPS-B2-300	0.3	ناهمگن	3	70
EPS-B3-300	0.3	همگن	3	70
EPS-B4-200	0.2	همگن	1	80
EPS-B5-300	0.3	همگن	1	70
EPS-B6-400	0.4	همگن	1	60
EPS-B7-300	0.3	ناهمگن	3	70

میکروسکوپ الکترونی پوشی مدل XL300 ساخت شرکت Philips هلند، به کمک نرم افزار Image-j برای پردازش و بررسی ساختار نمونه‌ها به کار گرفته شد. تعداد حفره‌ها در واحد حجم یا چگالی حفره‌ها، اندازه متوسط حفره‌ها، کسر حجمی حفره‌ها و ضخامت دیواره حفره‌ها از رابطه‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) محاسبه شده است [۲۲].

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left( \frac{\rho_{Ps}}{\rho_{Foam}} - 1 \right)$$

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (۲)$$

$$V_f = \frac{\rho_{Foam}}{\rho_{Ps}} \quad (۴)$$

$$\delta = d \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}}} - 1 \right) \quad (۳)$$

N، d و  $V_f$  به ترتیب تعداد حفره‌ها در واحد حجم یا چگالی حفره‌ها، اندازه متوسط حفره‌ها و کسر حجمی حفره‌ها است.

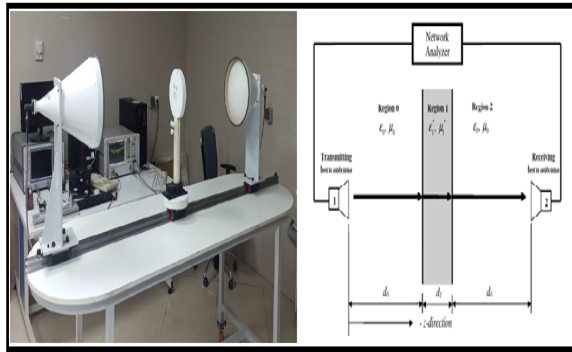
نظریه‌های مطرح در مورد ارتباط ثابت دی‌الکتریک با ساختار مولکولی پلیمرها و مشخصه‌های حفره‌ها اسفنج‌های پلیمری موارد ذیل قابل توجه هستند:

- (۱) هر چه یک پلیمر دارای گروه‌های عاملی قطبی کمتری باشد، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.
- (۲) هر چه یک پلیمر در دمای پائین‌تری باشد به علت تحرک کمتر گروه‌های عاملی آن ثابت دی‌الکتریک کمتر می‌شود.
- (۳) هر چه چگالی یک پلیمر کمتر باشد، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.

$$\tan\delta = \frac{\sigma + \omega\epsilon_r''}{\omega\epsilon_r'} \quad (14)$$

انرژی اتلافی توسط اسفنج جذب می‌شود. بنابراین برای اینکه یک اسفنج امواج را به خوبی عبور دهد و باعث اتلاف آن نشود، باید تا حد امکان  $\tan\delta$  آن کوچک باشد. از آنجایی که جمله اتلاف وابسته به فرکانس است، در فرکانس‌های بالا  $\sigma \gg \omega\epsilon_r''$  برقرار است. بنابراین ضریب تلفات مواد دی الکتریک با رسانایی پائین برابر است با:

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (15)$$



شکل ۱ سیستم اندازه‌گیری مشخصات دی الکتریک نمونه‌ها [۲۵]

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱ نتایج میکروسکوپ الکترونی پوششی

در شکل ۲، نتایج آزمون میکروسکوپ پوششی نمونه‌های اسفنج پلی‌استایرن انبساطی نشان داده شده است. برای بدست آوردن تصاویر واضح از حفره‌های اسفنج، ابتدا نمونه‌ها در نیتروژن مایع برای مدت چند ثانیه غوطه‌ور شد و بعد از ترد و شکننده شدن نمونه‌ها توسط انبر شکسته شدند. با انجام این فرآیند همانطور که در تصاویر مشخص است حفره‌های اسفنج کاملاً باز و قابل رویت می‌باشند.

نفوذپذیری مغناطیسی در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل، اطلاعات S21 به عنوان ورودی اولیه به تابع طراحی شده در محیط متلب آورده شده و از S22 استفاده نشده است. تنها با استفاده از دامنه و فاز S21، مشخصات الکتریکی اسفنج‌ها استخراج شده‌اند. برای بدست آوردن بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک حل معادله (۷) بصورت یکتا کافی است.

$$|S_{21}^{Theory}(\epsilon_r, f, d, \dots) - S_{21}^{Measurement}(\epsilon_r, f, d, \dots)| = 0 \quad (7)$$

برای یک محیط رسانای خطی معادله ماکسول و ارتباط بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات مطابق با روابط ذیل می‌باشد (رابطه‌های ۸-۱۵).

$$\nabla \times H = \frac{\partial(\epsilon E)}{\partial t} + \sigma E \quad (8)$$

فرم فازی معادله بالا عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= j\omega\epsilon E + \sigma E \nabla \times H \\ &= j\omega(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')E + \sigma E \\ &= \sigma E + \omega\epsilon_r'' E + j\omega\epsilon_r' E \end{aligned} \quad (9)$$

فرم فازی از جایگزینی دیفرانسیل نسبت به زمان با  $j\omega$  به دست می‌آید. همچنین از آنجایی که:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (10)$$

$\epsilon_0$  و  $\epsilon_r$  به ترتیب گذردهی مطلق و ثابت گذردهی خلاء و گذردهی نسبی یا ثابت دی الکتریک هستند.

معادله:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (11)$$

$\epsilon_r'$ ،  $\epsilon_r''$  و  $j$  به ترتیب جزء حقیقی، جزء موهومی و چگالی جریان الکتریکی هستند. بنابراین:

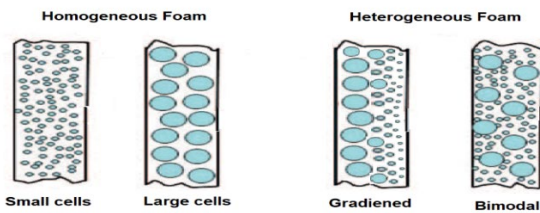
$$\begin{aligned} \nabla \times H &= j\omega(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')E + \sigma E \\ &= \sigma E + \omega\epsilon_r'' E + j\omega\epsilon_r' E \end{aligned} \quad (12)$$

در معادله بالا جمله اول و دوم جمله اتلافی و جمله سوم ذخیره‌ای می‌باشد.

$$\nabla \times H = (\sigma + \omega\epsilon_r'')E + j\omega\epsilon_r' E \quad (13)$$

نسبت جمله اتلاف به ذخیره ضریب تلفات می‌باشد و به صورت ذیل تعریف می‌شود:

طبق نتایج بدست آمده با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۳ انواع ساختار اسفنج‌های همگن و ناهمگن [۲۶]

نتایج در جدول ۲ به خوبی نشان می‌دهد، با افزایش تخلخل از ۶۰ به ۸۰ میانگین اندازه حفره‌ها، حدود ۱۷ میکرون حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

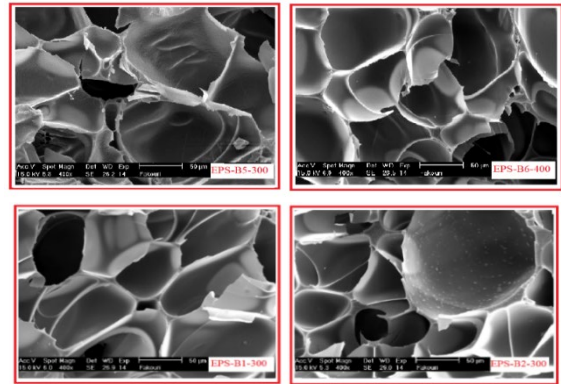
جدول ۲- نتایج آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اسفنج‌های پلی‌استایرن

پلی‌استایرن

نمونه	میانگین اندازه حفره‌ها ( $\mu\text{m}$ )	تراکم حفره‌ها ( $\frac{\text{Cell}}{\text{cm}^3}$ )	درصد تخلخل	ضخامت دیواره سلولی ( $\mu\text{m}$ )
EPS-B1-300	75	$1.69 \times 10^{10}$	70	14.64
EPS-B2-300	77	$1.52 \times 10^{10}$	70	15.03
EPS-B3-300	93	$8.76 \times 10^9$	70	18.15
EPS-B4-200	65	$2.91 \times 10^{10}$	80	07.67
EPS-B5-300	76	$1.57 \times 10^{10}$	70	14.96
EPS-B6-400	82	$1.08 \times 10^{10}$	60	23.86
EPS-B7-300	91	$6.59 \times 10^9$	70	35.62

#### ۴-۲- خواص دی‌الکتریک

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون اندازه‌گیری مشخصات دی‌الکتریک نمونه‌های اسفنج پلی‌استایرن انبساطی در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، ثابت دی‌الکتریک نمونه‌ها از ۱/۲۱۹ تا ۱/۴۳۰ در تغییر است. با این‌که همه نمونه‌ها از جنس پلی‌استایرن انبساطی می‌باشند ولی تغییر در تخلخل و توزیع اندازه حفره‌ها و ریزساختار اسفنج‌ها باعث تغییر قابل ملاحظه در ثابت دی‌الکتریک آن‌ها شده است. چنانکه انتظار می‌رود، با افزایش چگالی در نمونه‌های



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ پویشی اسفنج‌های پلی‌استایرن

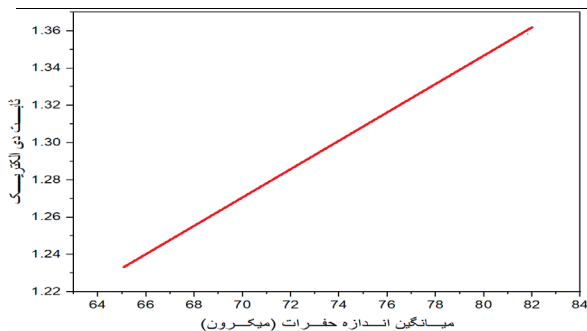
با تغییر در فرآیند انتقال حرارت حین تولید، اسفنج‌هایی با ریزساختار متفاوت و چگالی برابر قابل تهیه هستند. برخی اسفنج‌های تولیدی دارای ساختاری همگن بودند و برخی دارای ساختار کنترل شده ناهمگن بودند. اسفنج‌های همگن دارای حفره‌ها ریز یا حفره‌ها درشت هستند ولی اسفنج‌های ناهمگن یا دو ساختاری<sup>۱</sup> همزمان دارای حفره‌ها ریز و درشت هستند که ناهمگنی در آن‌ها تدریجی<sup>۲</sup> و هدفمند شکل یافته است. در شکل ۳ تفاوت ساختارها نمایش داده شده است.

استحکام مذاب پلی‌استایرن بدلیل انرژی همچسبی ماده، زنجیره‌های پلیمر در دانسیته‌های بالاتر تمایل به پیوستگی و ایجاد حباب‌های بزرگتری دارند.

همچنان‌که در شکل ۳ نمایش داده شده است، اسفنج‌های همگن به طور همزمان دارای حفره‌ها درشت و حفره‌ها ریز هستند. به عبارت دیگر اسفنج ناهمگن در چگالی برابر با اسفنج همگن دارای دو نوع حفره ریز و درشت است که در عرض نمونه‌های اسفنج ناهمگن اندازه حفره‌ها ریز صورت تدریجی و هدفمند به حفره‌ها درشت‌تر تغییر می‌نماید.

<sup>1</sup> Bimodal

<sup>2</sup> Gradient



شکل ۴ ارتباط ثابت دی الکتریک میانگین اندازه حفره‌های حفره‌ها در چگالی‌های متفاوت

با مقایسه ثابت‌های دی الکتریک نمونه‌های EPS-B4-200، EPS-B5-300 و EPS-B6-400 که تخلخل آن‌ها به ترتیب کاهش یافته و چگالی آن‌ها افزایش می‌یابد.

در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز و بررسی حدود ۷۶۰ فرکانس در این ناحیه مشخص شد؛ که با افزایش اندازه حفره‌ها در تمام فرکانس‌های بررسی شده ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد. نمونه مورد اندازه‌گیری به روش فضای آزاد مورد آزمایش قرار گرفتند و متغیرهای پراکندگی نمونه با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه ای اندازه‌گیری شدند.

مقادیر بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات نمونه‌ها به وسیله تابع طراحی شده در نرم افزار متلب برای تعیین مقادیر مذکور از متغیرهای پراکندگی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه تحلیل‌گر شبکه ای بدست آمدند. نمودار شکل ۵ حاصل پردازش ثوابت دی الکتریک اسفنج‌های پلی استایرن در محدوده ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز می‌باشد.

EPS-B4-200 و EPS-B5-300 و EPS-B6-400 تخلخل در آن‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش میانگین اندازه قطر حفره‌ها ملاحظه می‌شود که ثابت‌های دی الکتریک و ضرایب تلفات نمونه‌ها افزایش می‌یابد. طبق نتایج بدست آمده با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد. علت بزرگ شدن حفرات در چگالی‌های بالاتر، با این که هر سه نمونه در دمای برابر پخت شده‌اند بالا رفتن فشار در نمونه‌های با چگالی بیشتر به علت تراکم بیش از حد دانه‌های پلی استایرن انبساطی می‌باشد و همین امر باعث پارگی دیواره حباب‌ها و رشد آن‌ها شده است [۲۸]. به عبارتی با افزایش اندازه حفره‌ها در اسفنج‌ها ثابت دی الکتریک در فرکانس ۸ گیگاهرتز تا ۱۲ گیگاهرتز در بالغ بر ۷۶۰ فرکانس بررسی شده در آن‌ها افزایش می‌یابد.

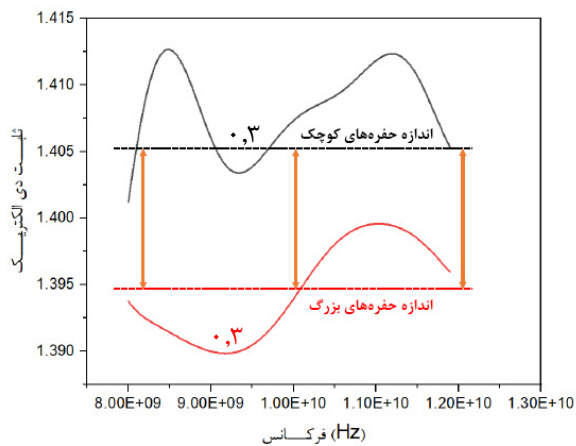
جدول ۳- مشخصات دی الکتریک اسفنج‌های پلی استایرن در

فرکانس ۱۰ گیگاهرتز

نمونه	ضریب اتلاف	ثابت دی الکتریک حقیقی	ثابت دی الکتریک موهومی
EPS-B1-300	0.0184	1.405	0.0258
EPS-B2-300	0.0241	1.430	0.0344
EPS-B3-300	0.0181	1.391	0.0251
EPS-B4-200	0.0020	1.219	0.0024
EPS-B5-300	0.0114	1.327	0.0151
EPS-B6-400	0.0030	1.354	0.0040
EPS-B7-300	0.0067	1.298	0.0087

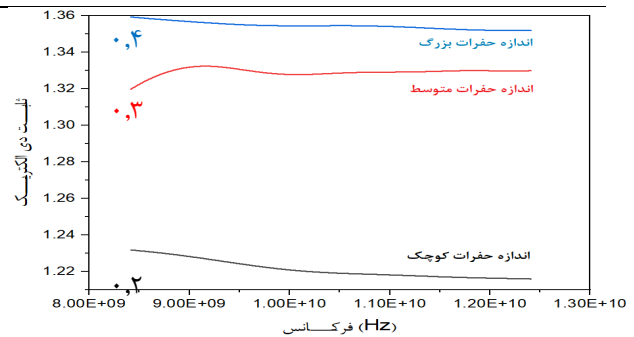
در شکل ۴ با افزایش میانگین اندازه حفره‌ها از ۶۵ میکرون تا ۸۲ میکرون ثابت دی الکتریک از ۱/۲۱۹ تا ۱/۳۵۴ افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش اندازه حفره‌ها در تخلخل‌های متفاوت ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد و از میزان عبور امواج الکترومغناطیس در اسفنج کاسته می‌شود.





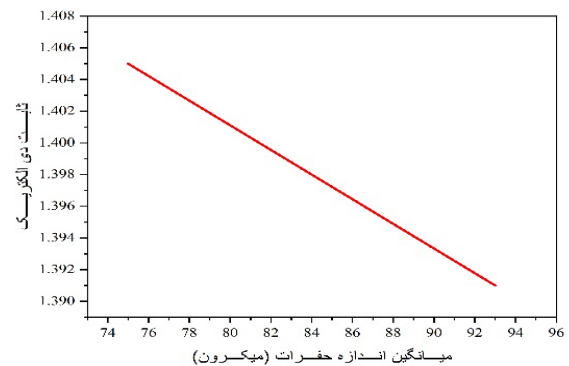
شکل ۷ ارتباط ثابت دی الکتریک با میانگین اندازه حفره‌های در اسفنج‌های پلی‌استایرن با چگالی برابر

در بررسی نمونه EPS-B1-300 و EPS-B3-300 که ساختار همگن و تخلخل یکسانی دارند، ثابت دی‌الکتریک از  $1/40.5$  به  $1/39.1$  کاهش و ضریب اتلاف از  $0.184$  به  $0.181$  کاهش می‌یابد. این روند کاهش به خوبی نشان می‌دهد در تخلخل برابر و همگنی ساختار حفره‌ها با افزایش میانگین قطر حفره‌ها، ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف کاهش می‌یابد. با توجه به این نکته مشخص است، میانگین قطر حفره‌ها در تخلخل کل برابر تأثیری ۱ درصدی بر ثابت دی‌الکتریک و تأثیر  $1/6$  درصدی بر ضریب اتلاف دارد. این روند تأثیر میزان درصد هوا در اسفنج را با بزرگ‌تر شدن اندازه حفره‌ها همراه با کاهش ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف را نشان می‌دهد. در شکل ۸ بصورت شماتیک علت افزایش ثابت دی‌الکتریک به کاهش اندازه حفره‌ها بیان شده است. در این تئوری با کاهش اندازه حفره‌ها، امواج الکترومغناطیس باید از تعداد بیشتری حفره عبور نماید. اگر حفره‌ها در قالب منظم‌تری به تصویر کشیده شود امواج برای عبور باید از تعداد بیشتری لایه دی‌الکتریک عبور نماید.



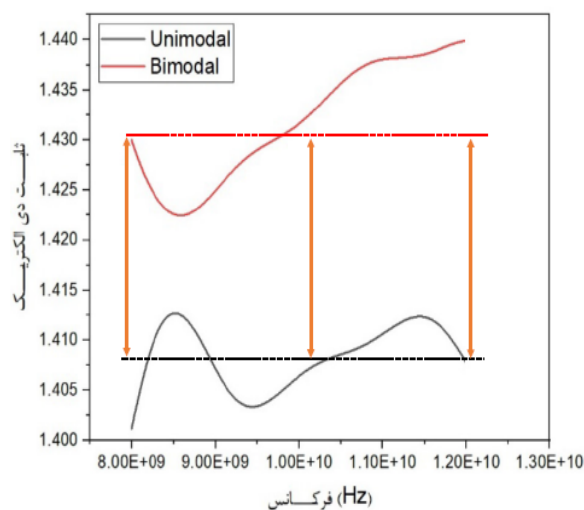
شکل ۵ ارتباط ثابت دی‌الکتریک با فرکانس برای سه نمونه با اندازه حفره‌های متفاوت

در آزمایشی دیگر که بین دو نمونه اسفنج EPS-B1-300 و EPS-B3-300 که دارای تخلخل برابر ولی اندازه میانگین اندازه حفره‌ها آن‌ها متفاوت است انجام شد، مشخص شد که در حالی که نمونه‌ها دارای چگالی برابر هستند ولی میانگین قطر حفره‌ها، اندازه حفره‌های نمونه EPS-B3-300 بیشتر از نمونه EPS-B1-300 است. با افزایش ضخامت دیواره سلولی قطبش بین سطحی<sup>۱</sup> مکانیزم غالب است و در بازتاب‌های چندگانه<sup>۲</sup> کمتر می‌شود.



شکل ۶ ارتباط ثابت دی‌الکتریک میانگین اندازه حفره‌های حفره‌ها در چگالی‌های برابر

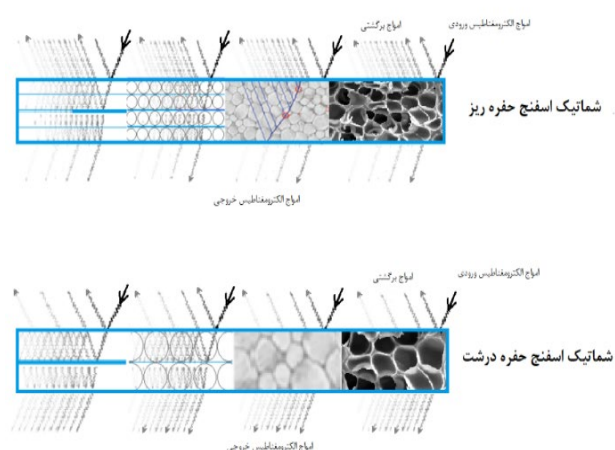
در این آزمایش مطابق شکل ۷ مشخص شد که برعکس نمونه‌های با چگالی متفاوت در نمونه‌های با چگالی برابر با درشت‌تر شدن اندازه حفره‌های اسفنج ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد.



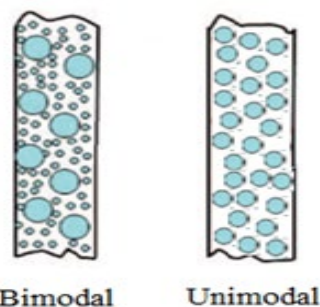
شکل ۱۰ ارتباط ثابت دی الکتریک با فرکانس در اسفنج‌های همگن و ناهمگن

همچنین در آزمایش مقایسه نمونه EPS-B1-300 و EPS-B2-300 مشخص شده است که در بررسی فرکانس ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز ضریب تلفات نمونه همگن در اکثر محدوده فرکانسی کمتر از نمونه ناهمگن می‌باشد. نمودار ۱۱ ارتباط ضریب تلفات با فرکانس را در نمونه‌های همگن و ناهمگن نشان می‌دهد.

در برخورد با ماده همگن موج مسیر مستقیم‌تر و کوتاه‌تری را طی کرده و کمتر دچار بازتاب چندگانه می‌شود ولی در ماده ناهمگن بدلیل نوسانات اندازه قطر حفره‌ها موج مسیر طولانی‌تر و شکسته‌تری را طی نموده و دچار بازتاب و اتلاف بیشتری می‌شود. رفتار اتلافی اسفنج ناهمگن در شکل ۱۱ به خوبی نمایش داده شده است.



شکل ۸ اثر اندازه حفره‌ها بر عبور امواج الکترومغناطیس [۲۷] با مقایسه نمونه EPS-B1-300 با ساختار همگن و EPS-B2-300 با ساختار ناهمگن (مشابه شکل ۹) مشخص شده است که در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز، ثابت دی الکتریک نمونه همگن در تمام محدوده فرکانسی کمتر از نمونه ناهمگن است.

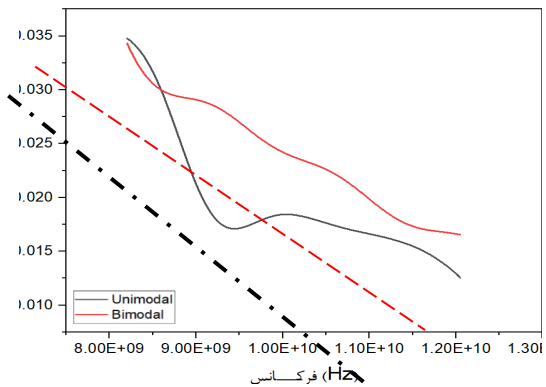


شکل ۹ انواع ساختار اسفنج‌های همگن و ناهمگن [۲۶] شکل ۱۰ ارتباط ثابت دی الکتریک با فرکانس را در نمونه‌های همگن و ناهمگن نشان می‌دهد.

نمونه همگن از نمونه ناهمگن کمتر است. این تحقیق به طراحی و ساخت مواد با ثابت های دی الکتریک تعیین شده و دلخواه کمک می کند و فناوری تهیه مواد کامپوزیتی با پایه پلی استایرن انبساطی با ثابت های دی الکتریک دلخواه، و کنترل عوامل موثر بر ثابت دی الکتریک، در طراحی و ساخت تجهیزات مخابراتی از جمله بردهای راجرز، آنتن ها، رفلکتورها، لنزهای فرنل، لوتنبرگ و غیره کاربرد دارد.

## ۶- مراجع:

- [1] Schellenberg, Jürgen, and Mario Wallis. "Dependence of thermal properties of expandable polystyrene particle foam on cell size and density," *Journal of Cellular Plastics*, 46, 209-222, 2012.
- [2] Beverte, Ilze. "Deformation of polypropylene foam Neopolen P in compression," *Journal of cellular plastics*, 40, 191-204, 2004.
- [3] Rodriguez-Sanchez, Alejandro E., et al. "Numerical analysis of energy absorption in expanded polystyrene foams," *Journal of Cellular Plastics*, 56, 411-431, 2020.
- [4] Wang, Gehuan, et al. "Integrated multifunctional macrostructures for electromagnetic wave absorption and shielding," *Journal of Materials Chemistry A*, 46, 24368-24387, 2020.
- [5] Raps, Daniel, et al. "Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology," *Polymer*, 56, 5-19, 2015.
- [6] Turner, Andrew. "Foamed polystyrene in the marine environment: sources, additives, transport, behavior, and impacts," *Environmental Science & Technology*, 54, 10411-10420, 2020.
- [7] Block, C., B. Brands, and T. Gude. "Packaging Materials 2. Polystyrene for Food Packaging Applications—Updated Version," *International Life Sciences Institute*, 13, 321-336, 2017.
- [8] Ramli Sulong, Nor Hafizah, Siti Aisyah Syaerah Mustapa, and Muhammad Khairi Abdul Rashid, "Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review,"



شکل ۱۱ ارتباط ضریب تلفات با فرکانس در نمونه های همگن و ناهمگن

همانطور که مشخص است، ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات نمونه همگن از نمونه ناهمگن کمتر می باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، نقش اندازه حفره ها و توزیع اندازه آن ها بر خواص دی الکتریک اسفنج های پلی استایرن انبساطی ارزیابی شده است. بدین منظور نمونه های اسفنج پلی استایرن انبساطی با میزان تخلخل، ضخامت، میانگین اندازه حفره های متفاوت، همگنی و ناهمگنی با استفاده از کوره برنامه پذیر تهیه و ساختار حفره ها، مشخصات الکترومغناطیسی اسفنج ها به ترتیب با میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون مشخصات دی الکتریک بررسی شدند. نتایج نشان می دهد، در اسفنج های پلی استایرن انبساطی با افزایش اندازه حفره های اسفنج لزوماً ثابت دی الکتریک کاهش نمی یابد، بلکه برخی اوقات ثابت دی الکتریک افزایش می یابد، بدین صورت که، با افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره های اسفنج افزایش می یابد و ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف روند افزایشی دارد، اما در تخلخل و چگالی برابر افزایش میانگین اندازه حفره های اسفنج باعث کاهش ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات می شود. همچنین مشخص شده است، ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات

- interference shielding,” *Carbon*, 105, 305-313, 2016.
- [18] Ma, Zhonglei, et al. “Mechanical and dielectric properties of microcellular polycarbonate foams with unimodal or bimodal cell-size distributions,” *Journal of Cellular Plastics*, 51, 307-327, 2015.
- [19] Wang, Lingling, et al. “Ultralow dielectric constant polyarylene ether nitrile foam with excellent mechanical properties,” *Chemical Engineering Journal*, 384, 123-231, 2020.
- [20] Azdast, T., and R. Hasanzadeh. “A review on principles and fundamentals of fabrication of polymeric foams in regards to increasing cell density/reducing cell size,” *Modares Mechanical Engineering*, 19, 211-222, 2019.
- [21] Xiao, Wei, et al. “Strategy to enhance conductivity of polystyrene/graphene composite foams via supercritical carbon dioxide foaming process,” *The Journal of Supercritical Fluids*, 142, 52-63, 2018.
- [22] Okolieocha, Chimezie, Daniel Raps, Kalaivani Subramaniam, and Volker Altstädt. “Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004–2015) and future directions—A review,” *European Polymer Journal*, 73, 500-519, 2015.
- [23] Ahmad, Zulkifli. “Polymer dielectric materials,” *In Dielectric material. IntechOpen*, 12, 60-85, 2012.
- [24] Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., & Nelson, S. O. “Phase-shift ambiguity in microwave dielectric properties measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,” 49(1), 56-60, 2000.
- [25] Büyüköztürk, O., Yu, T. Y., & Ortega, J. A. “A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements,” *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 349-359, 2006.
- Journal of Applied Polymer Science*, 136, 475-495, 2017.
- [9] Bezborodov, V. I., et al. “Differential phase sections based on form birefringence in the terahertz frequency range,” *Telecommunications and Radio Engineering*, 74, 43-59, 2015.
- [10] X. Lei, L. Tong, H. Pan, G. Yang, X. Liu. “Preparation of polyarylene ether nitriles/fullerene composites with low dielectric constant by cosolvent evaporation,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 30, 18297-18305, 2019.
- [11] C. Yuan, K. Jin, K. Li, S. Diao, J. Tong, Q. Fang. “Non-porous low-k dielectric films based on a new structural amorphous fluoropolymer,” *Adv. Mater*, 25, 4875-4878, 2013.
- [12] Wang, Lingling, et al. “Low dielectric constant polymers for high speed communication network,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 34, 138-148, 2020.
- [13] Mateusz Barczewski, Czesław Kozakiewicz, Izabella Krucińska. “The effect of foam morphology on dielectric properties of closed-cell foams based on high-density polyethylene,” *Polymer Testing*, 89, 231-245, 2020.
- [14] Yuqi Zhang, Yaoyao Yang, Yongji Xu, Kejian Chen. “Low-Dielectric Constant Foam Materials through Polymer Blends,” *Journal of Applied Polymer Science*, 49, 321-420, 2020.
- [15] Chen, Wenjing, et al. “Electromagnetic and microwave absorption performance of Ni<sub>0.4</sub>Zn<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/polymethacrylimide foam synthesized via polymerization,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 16991-17002, 2019.
- [16] J. Ding, R. Gong, L. Liu, L. Chang, X. Guo, and R. Yang. “The electromagnetic properties of conducting fiber-foam composite,” in *World Automation Congress*, 78, 1-5, 2008.
- [17] T. Kuang, L. Chang, F. Chen, Y. Sheng, D. Fu, and X. Peng. “Facile preparation of lightweight high-strength biodegradable polymer/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite foams for electromagnetic

\* Corresponding author E-mail: mr\_pourhossaini@yahoo.com

- 
- [26] Bao, J. B., Weng, G. S., Zhao, L., Liu, Z. F., & Chen, Z. R. "Tensile and impact behavior of polystyrene microcellular foams with bi-modal cell morphology," *Journal of Cellular Plastics*, 50(4), 381-393, 2014.
- [27] Juntavee, N., & Attashu, S. "Effect of sintering process on color parameters of nano-sized yttria partially stabilized tetragonal monolithic zirconia," *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 10(8), e794, 2018.
- [28] Moeini, M.H, Navid Famili, M.H, Kayvan Forooraghi, K., Soltani Alkough, M., & Mokhtari Motameni Shirvan, M. "Production of Polystyrene Open-celled Microcellular Foam in Batch Process by Super Critical CO<sub>2</sub>," V23, 3(3), Pages 223-234, 2010.
-